

AVALIAÇÃO DA INTENSIDADE DE TRÁFEGO DE TRATORES EM ALGUNS ATRIBUTOS FÍSICOS DE UM ARGISSOLO AMARELO⁽¹⁾

Jorge Wilson Cortez⁽²⁾, Nelci Olszewski⁽³⁾, Wisy Alves Pimenta⁽⁴⁾, Antônio Pereira Patrocínio Filho⁽⁴⁾, Elder Barboza de Souza⁽⁴⁾ & Hideo de Jesus Nagahama⁽⁵⁾

RESUMO

O tráfego intenso das máquinas nos solos cultivados aplica diferentes tensões que combinadas com altos valores de umidade desses podem resultar em sua compactação. A condução deste estudo objetivou avaliar a variação em alguns atributos físicos de um Argissolo Amarelo, em razão do tráfego de tratores agrícolas com diferentes números de passadas. A pesquisa foi conduzida na UNIVASF, em Petrolina, PE, em experimento de faixas com fatorial de dois fatores, sendo tratores agrícolas de 2.650, 2.795 e 3.540 kg, com seis níveis de compactação: zero passagem (testemunha) (N0); uma passagem (N1); duas passagens (N2); quatro passagens (N4); seis passagens (N6); e oito passagens (N8). Foram analisadas a densidade, porosidade e resistência mecânica do solo à penetração nas camadas de 0,00-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; e 0,30-0,40 m. Os dados de densidade e porosidade foram analisados pela análise de variância com comparação de médias e por meio de regressão; enquanto a resistência mecânica do solo à penetração foi analisada por meio da geoestatística. Os maiores valores de densidade e menores de porosidade foram observados para o trator de menor massa, que possui menor área de contato, pior distribuição de cargas entre os eixos e aplica as maiores pressões no solo. As intensidades do tráfego indicaram que, após a segunda passagem da máquina, os valores de densidade, de maneira geral, foram próximos às demais passagens, para a camada de 0,00-0,10 m, enquanto os valores de porosidade para as camadas de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m reduziram com o aumento do número de passadas. Os mapas de resistência

⁽¹⁾ Recebido para publicação em 3 de setembro de 2013 e aprovado em 27 de março de 2014.

⁽²⁾ Professor Adjunto, Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD. Rodovia Dourados Itahum, km 12. Dourados (MS). Bolsista de Produtividade do CNPq. E-mail: jorgecortez@ufgd.edu.br

⁽³⁾ Professora Adjunta, Universidade Federal do Vale do São Francisco - UNIVASF. Av. Antônio Carlos Magalhães, 510, Country Club. CEP 48902-300 Juazeiro (BA). E-mail: nelci.olszewski@univasf.edu.br

⁽⁴⁾ Discentes do curso de Engenharia Agrônômica, UNIVASF. E-mail: wisyalves@hotmail.com, elder.barboza@hotmail.com, ap.patrocinio@hotmail.com Bolsistas do CNPq e Facepe.

⁽⁵⁾ Mestre em Engenharia Agrícola, UNIVASF. E-mail: hideo.nagahama@univasf.edu.br

mecânica do solo à penetração indicaram pontos críticos de resistência, mais evidentes para o trator de menor massa.

Termos de indexação: tráfego de máquinas, geoestatística, física do solo.

SUMMARY: EVALUATION THE INTENSITY OF TRACTOR TRAFFIC ON SOME PHYSICAL PROPERTIES OF AN ARGISSOLO AMARELO (ULTISOL)

Heavy machinery traffic on cropped soils applies different tensions that, combined with high values of soil moisture, can result in soil compaction. The aim of this study was to evaluate the variation in some physical properties of an Argissolo Amarelo (Ultisol) due to farm tractor traffic with different numbers of passes. The study was conducted at UNIVASF in Petrolina, State of Pernambuco PE, Brazil, in an experiment in strips with two factors: tractors of 2,650, 2,795, and 3,540 kg; and six levels of compaction: zero passes (control) (N0), one pass (N1), two passes (N2), four passes (N4), six passes (N6), and eight passes (N8). We analyzed bulk density, porosity, and penetration resistance of the soil layers at 0.00-0.10, 0.10-0.20, 0.20-0.30, and 0.30-0.40 m. Bulk density and porosity were analyzed by analysis of variance with comparison of means, and by regression analysis, whereas penetration resistance was analyzed using geostatistics. The highest values of bulk density and lowest values of porosity were observed for the tractor with least weight but a smaller contact area and worse load distribution between the axles, which applies the greatest pressures on the soil. The traffic intensities indicated that after the second pass of the machine, the values of bulk density, in general, were near the values of the other passes for the 0.00-0.10 m layer. In contrast, the values of porosity for the 0.00-0.10 and 0.10-0.20 m layers decreased with the increase in the number of passes. The maps of soil penetration resistance indicated critical points of resistance, more evident for the tractor of least weight.

Index terms: machinery traffic, geostatistics, soil physics.

INTRODUÇÃO

A manutenção da qualidade física do solo é imprescindível para preservação do ambiente e maximização da produtividade, a fim de se obter sucesso no cultivo das culturas. No entanto, o solo, por ser o suporte da produção agrícola, sofre alterações significativas em seus atributos físicos, sendo a compactação apontada como uma dessas alterações, em virtude do tráfego de tratores e das máquinas agrícolas em condições inadequadas de manejo (Richart et al., 2005). Um solo compactado interfere na densidade, porosidade e resistência à penetração e dificulta o crescimento radicular e a dinâmica de água e dos nutrientes. A compactação limita o crescimento de raízes e diminui o volume de solo explorado pelo sistema radicular e, conseqüentemente, reduz a altura de plantas e produtividade (Beutler & Centurion, 2004; Leonel et al., 2007).

O termo compactação do solo refere-se ao processo de decréscimo de volume de solos não saturados quando determinada pressão externa é aplicada, podendo ser causada pelo tráfego de máquinas agrícolas, equipamentos de transporte ou animais (Lima, 2004). A compactação é um processo decorrente das práticas agrícolas que ocasionam degradação dos solos, sendo expressa por alteração estrutural que causa reorganização das partículas, promovendo, concomitantemente, aumento da densidade do solo e

redução da porosidade total e da macroporosidade (Stone et al., 2002). As maiores alterações nas propriedades físicas do solo são provocadas pelo tráfego de máquinas, quando ocorre o aumento da umidade do solo (Lopes et al., 2011).

A presença de camadas compactadas têm sido avaliada pela resistência mecânica do solo à penetração (Beutler et al., 2007), sendo uma das propriedades físicas diretamente relacionadas ao crescimento das plantas, podendo ser modificada pelos sistemas de seu preparo. A compactação do solo pode também ser avaliada a partir de valores de densidade desse, que apresentam variações de acordo com a textura. Para um mesmo valor de densidade, um solo argiloso pode estar muito compactado, o que pode não acontecer com um solo com textura mais arenosa (Beutler et al., 2008). Os valores de densidade do solo maiores do que 1,70 Mg m⁻³ em solos arenosos são considerados críticos em razão da resistência elevada que diminui ou impede o crescimento radicular (Reichert et al., 2003). A porosidade é variável conforme o estado de compactação do solo e possui relação direta e inversa com a densidade. A faixa de porosidade considerada adequada para solos arenosos está situada entre 0,32 e 0,47 m³ m⁻³ (Reichardt & Timm, 2004).

Pressupõe-se que o tráfego de tratores de diferentes massas em conjunto com a intensidade de passagens pode interferir nos atributos físicos do solo de maneira que esses se tornem restritivos para o desenvolvimento

radicular e de plantas. Assim, a condução deste trabalho objetivou avaliar alterações em alguns atributos físicos de um Argissolo Amarelo do semiárido por causa do tráfego de tratores agrícolas com diferentes números de passadas.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no *Campus* de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), que está situado dentro do Projeto de Irrigação Senador Nilo Coelho, em Petrolina, PE. A área experimental está localizada à latitude 09° 19' 16" sul e longitude 40° 33' 43" oeste, a uma altitude de 373 m. O clima da região, segundo a classificação de Köppen (Brasil, 1973), é tropical semiárido, tipo BSwH, caracterizado pela escassez e irregularidade das precipitações no verão e forte evapotranspiração em consequência das altas temperaturas. O solo foi classificado como Argissolo Amarelo, textura arenosa, por Amaral et al. (2006), utilizando o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2006) (Quadro 1) com declividade inferior a 1 %. O experimento possui sistema linear de irrigação, visando a manutenção da umidade do solo no momento do preparo e durante a coleta de dados (Quadro 2).

Foi realizado o cultivo de sorgo forrageiro na área de estudo, sendo submetido a três cortes para obtenção de forragem até o ano de 2009. Após esse período, essa continuou em pousio até a instalação do experimento em 2012.

Os equipamentos utilizados no preparo do solo foram arado de aiveca, com duas aivecas recortadas, massa de 570 kg e profundidade de trabalho de 0,40 m (preparo primário); e grade leve em "tandem", com sete discos em cada uma das quatro seções, num total de 14 discos recortados na dianteira e 14 lisos na traseira, com diâmetro de 0,51 m (20"), distância entre discos de 0,19 m, largura de 2,62 m, massa de 528 kg e profundidade de trabalho de 0,10 m (preparo secundário).

Foram avaliados os efeitos do tráfego de três diferentes tratores: T1 - trator de 40,5 kW (55 cv) de

potência nominal no motor e pneus dianteiros 6.00-16 F2 e traseiros 14.9-24 R1, com massa de 2.650 kg, sendo distribuídos 30 % dianteiro e 70 % traseiro; T2 - trator com 41 kW (55 cv) de potência nominal no motor, com pneus dianteiros 9.5-24 R1 e traseiros 16.9-28 R1, com tração dianteira auxiliar e massa total de 2.795 kg, sendo distribuídos 40 % dianteiro e 60 % traseiro; T3 - trator com TDA (tração dianteira auxiliar), 55,20 kW (75 cv) de potência nominal no motor, pneus dianteiros 12.4-24 R1 e traseiros 18.4-30 R1 e massa total de 3.540 kg, sendo distribuídos 40 % dianteiro e 60 % traseiro (Quadro 3).

Após o preparo do solo, os tratores trafegaram na área conforme os tratamentos estabelecidos para obtenção dos níveis de compactação: uma passagem (N1); duas passagens (N2); quatro passagens (N4); seis passagens (N6); e oito passagens (N8), sendo as passagens sob o rastro dos pneus da passagem anterior com distribuição em cinco faixas de ensaio, tendo essas comprimento de 25 m e largura de 20 m cada.

O delineamento utilizado foi experimento em faixas no esquema fatorial de dois fatores, sendo três tratores agrícolas e seis níveis de carga (passagens do trator) com quatro repetições. As camadas de solo avaliadas foram 0,00-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; e 0,30-0,40 m.

As amostras de solo indeformadas foram coletadas aleatoriamente em quatro repetições dentro de cada faixa experimental nas profundidades de 0,00-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; e 0,30-0,40 m, utilizando-se equipamento similar ao amostrador de Uhland; essas amostras serviram tanto para determinar a umidade quanto para a densidade e porosidade total do solo.

A densidade do solo (D_s) foi determinada utilizando o método do anel volumétrico, em anéis de 0,05 m de altura e 0,0508 m (2") de diâmetro, apresentando volume total de 101,34 cm³ (Embrapa, 2011).

A porosidade total (P_t) foi obtida após as amostras indeformadas terem sido saturadas em uma bandeja com água até altura de dois terços dos anéis, sendo posteriormente pesadas (Camargo et al., 1986). Os dados de D_s e P_t foram submetidos à análise de variância para cada camada (0,00-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; e 0,30-0,40 m) individualmente e, quando observada significância estatística a pelo menos 5 %, foi utilizado o teste de Tukey para comparação de

Quadro 1. Composição granulométrica, umidade no momento do preparo do solo (UMP), capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP) do Argissolo Amarelo

Prof.	Argila	Areia	Silte	UMP	CC	PMP
m	kg kg ⁻¹			kg kg ⁻¹		
0,00-0,10	0,090	0,878	0,032	0,093	0,107	0,015
0,10-0,20	0,100	0,883	0,017	0,078	0,101	0,018
0,20-0,30	0,080	0,852	0,068	0,086	0,091	0,015
0,30-0,40	0,140	0,807	0,053	0,075	0,136	0,013

Fonte: Adaptado de Cortez et al. (2011).

Quadro 2. Umidade do Argissolo Amarelo no momento da coleta dos dados para os diferentes tratores e número de passadas

Trator	Número de passada					
	N0	N1	N2	N4	N6	N8
Umidade do solo (kg kg ⁻¹)						
0,00-0,10 m						
T1	0,121	0,118	0,110	0,123	0,095	0,093
T2	0,102	0,098	0,132	0,111	0,093	0,091
T3	0,072	0,083	0,038	0,040	0,030	0,035
0,10-0,20 m						
T1	0,122	0,081	0,093	0,082	0,093	0,096
T2	0,078	0,069	0,092	0,062	0,064	0,060
T3	0,122	0,076	0,028	0,031	0,032	0,025
0,20-0,30 m						
T1	0,116	0,041	0,096	0,077	0,083	0,096
T2	0,071	0,054	0,075	0,052	0,056	0,051
T3	0,058	0,066	0,034	0,025	0,028	0,028
0,30-0,40 m						
T1	0,091	0,044	0,079	0,064	0,086	0,098
T2	0,068	0,054	0,065	0,046	0,055	0,043
T3	0,053	0,057	0,035	0,024	0,030	0,029

Quadro 3. Dados dos pneus, área de contato e pressão estimada aplicada pelos rodados dos tratores utilizados no experimento

Trator	Diâmetro do pneu		Largura do pneu		Massa	Área de contato		Pressão aplicada por rodado	
	m		m			m ²		kPa	
	Dianteiro	Traseiro	Dianteiro	Traseiro		Dianteiro	Traseiro	Dianteiro	Traseiro
T1	0,41	0,61	0,15	0,38	2650	0,06	0,15	65,00	60,63
T2	0,61	0,71	0,24	0,43	2795	0,10	0,18	54,80	45,69
T3	0,61	0,76	0,31	0,47	3540	0,10	0,20	57,87	52,07

* Área de contato estimada por meio das equações propostas por Keller (2005) e Lanças et al. (2005).

médias (Banzatto & Kronka, 2006). Utilizou-se para análise o *software Assistat* (Silva & Azevedo, 2006).

Para a análise da resistência mecânica do solo à penetração (RP), utilizou-se um penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf, desenvolvido por Stolf et al. (1983), com as seguintes características: massa de 4 kg com impacto em curso de queda livre de 0,40 m; cone com 0,0128 m de diâmetro e ângulo sólido de 30°; e haste com diâmetro aproximado de 0,01 m. Com o intuito de identificar camadas de maior RP no perfil após o tráfego, foram coletados dados em sentido perpendicular ao deslocamento dos tratores em um comprimento total de 2,00 m com distância entre pontos de coleta de 0,20 m nas camadas (0,00-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; e 0,30-0,40 m), para cada faixa de tráfego. Os dados de RP foram anotados até a profundidade de 0,40 m (Stolf, 1991).

Na geostatística, para a RP, foram construídos semivariogramas, partindo das pressuposições da

estacionaridade da hipótese intrínseca, do cálculo da função semivariância e dos ajustes dos modelos teóricos (Vieira, 2000). No ajuste do semivariograma, observaram-se o maior valor do coeficiente de determinação (R²), menor valor da soma de quadrados dos desvios (RSS), maior valor do avaliador dependência espacial (ADE) e sobrepondo os pontos ao modelo, verificando-se visualmente sua adequação. Os semivariogramas forneceram estimativas dos parâmetros: efeito pepita (C₀), patamar (C₀ + C) e alcance. O semivariograma apresenta efeito pepita puro quando a semivariância for igual para todos os valores de *h*. À medida que *h* aumenta, a semivariância também aumenta até um valor máximo em que se estabiliza. A análise da dependência espacial (ADE) foi efetuada, segundo método descrito por Landim (1998). Em seguida à modelagem dos semivariogramas, foi realizada a interpolação por “krigagem”, ordinária para a estimativa de valores em locais não amostrados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O coeficiente de variação apresentado foi baixo (<12 %) para os valores de Ds e Pt (Quadro 4) em todas as camadas avaliadas, conforme mencionado por Warrick & Nielsen (1980). Perdok & Arts (1987), em estudo que correlacionaram as características dos pneus com as propriedades do solo, observaram que a capacidade de carga desses é fortemente dependente das suas dimensões, da pressão de inflação e do tipo (radial ou diagonal).

Os dados da análise de variância para Ds e Pt dos tratores utilizados e do número de passadas (Quadro 4) indicaram que o T1 (trator de menor massa - 2.650 kg) apresentou os maiores valores de Ds e, conseqüentemente, os menores valores de Pt, em todas as camadas de solo avaliadas. Esses dados podem ser explicados por ser esse o trator com maior desigualdade de distribuição de massa entre seus eixos (de 30 e 70 %, dianteiro e traseiro, respectivamente) e maior pressão aplicada, resultando em maior pressão nos rodados dianteiros que são estreitos (Quadro 3), evidenciando ser esse um ponto importante no processo de compactação do solo. Notou-se também que entre os tratores utilizados neste estudo, o único que não apresentava tração auxiliar foi o que aplicou maior pressão no solo pelo eixo dianteiro e o que possuiu maior desigualdade de distribuição de massa entre os eixos (Quadro 3), gerando maior compactação do solo. Tal fato, apresentou importante função da tração

auxiliar, não só para garantir maior tração de serviço, mas por proporcionar menor aplicação de pressão pelo eixo dianteiro em razão da melhor distribuição de massa entre os eixos e principalmente pela maior área de contato do eixo dianteiro por utilizar pneus mais largos (Quadro 3). A seqüência de maior compactação causada pelo tráfego dos diferentes tratores com base nos valores de Ds e Pt foi: Trator 1 > Trator 2 = Trator 3 para todas as profundidades analisadas. A única exceção foi para os valores de Ds na camada de 0,00-0,10 m em que a seqüência foi: Trator 1 > Trator 2 > Trator 3 (Quadro 4). Essa seqüência está de acordo com a maior pressão aplicada pelo Trator 1, seguida de pressões muito semelhantes aplicadas pelos Tratores 2 e 3 (Quadro 3).

A interação tratores e número de passadas foi significativa (Quadro 5); como o fator N é quantitativo, foi realizada a análise de regressão. Verificaram-se maiores valores de Ds na camada de 0,00-0,10 m para o número de passada igual a uma - N1, para o T2 e T3, e com duas passadas N2 diferiu apenas T1 e T3; no número de passadas igual a quatro - N4, não houve diferença significativa. Para os demais números de passadas, os maiores valores de Ds foram encontrados quando se realizou o tráfego com o T1. Na camada de 0,10-0,20 m, o comportamento da Ds foi um pouco diferente da camada anterior, sendo maior para T1 com o número de passadas igual a oito - N8. Nos demais números de tráfego, o comportamento apresentou algumas alterações, mas prevalecendo

Quadro 4. Análise de variância da densidade do solo e porosidade total do solo para os tratores (T) e níveis de compactação (N)

	Densidade do solo				Porosidade total			
	Profundidade (m)							
	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	0,30-0,40	0,0-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	0,30-0,40
	Mg m ⁻³				m ³ m ⁻³			
Trator (T)								
T1	1,73 a	1,76 a	1,72 a	1,62 a	0,30 b	0,30 b	0,30 b	0,32 b
T2	1,61 b	1,59 b	1,50 b	1,41 b	0,35 a	0,35 a	0,36 a	0,38 a
T3	1,53 c	1,54 b	1,45 b	1,41 b	0,37 a	0,36 a	0,37 a	0,38 a
Nível (N)								
N0	1,45	1,58	1,49	1,47	0,39	0,35	0,36	0,37
N1	1,62	1,62	1,60	1,52	0,35	0,34	0,33	0,34
N2	1,65	1,62	1,56	1,45	0,33	0,34	0,35	0,37
N4	1,66	1,67	1,49	1,44	0,33	0,33	0,36	0,38
N6	1,67	1,64	1,61	1,48	0,33	0,33	0,33	0,35
N8	1,68	1,64	1,57	1,50	0,32	0,31	0,33	0,35
Teste F								
T	21,92**	17,79**	30,87**	20,42**	16,66**	16,51**	24,77**	32,94*
N	8,76	0,54	1,92	0,67	5,67	1,22	1,78	3,33
T × N	6,76**	6,16**	4,34**	4,11**	5,80**	8,65**	4,35**	8,58**
CV (%)	5,44	7,35	7,09	7,73	10,81	9,54	9,99	7,89

T1: Trator de 2650 kg; T2: trator de 2795 kg; T3: trator de 3540 kg. Os níveis de carga foram: uma passagem (N1); duas passagens (N2); quatro passagens (N4); seis passagens (N6) e oito passagens (N8).

valores de Ds maiores para os tratores 1 e 2. Na camada de 0,20-0,30 m, verificou-se para a Ds que no N0 e N1 o T1 e T3 não diferiram; em N2, os valores para os Tratores 1 e 2 foram iguais estatisticamente; os demais níveis apresentaram maiores valores para T1. Na camada de 0,30-0,40 m, os valores de Ds foram maiores para T1, com exceção de N1 em que T1 foi igual ao T3 e nos N2 e N6 em que T1 foi igual a T2. Pôde-se verificar que houve efeito da transmissão de carga até a camada de 0,30-0,40 m para T1, em que se verificou valores de Ds de 1,62 a 1,83 Mg m⁻³ para N4, N6 e N8.

Para a Pt (Quadro 5), verificou-se que, na camada de 0,00-0,10 m, os menores valores ocorreram no T1 nos números de passadas igual a seis e oito (N6 e N8); para o N4, não foi encontrada diferença estatística para o tráfego dos diferentes tratores. Para essa mesma camada e número de passadas igual a 1 e 2, os tratores 1 e 2 apresentaram os menores valores de Pt seguidos pelo trator 3; comportamento inverso foi encontrado no número de passadas igual a 3 (Quadro 5). Na camada de 0,10-0,20 m, os menores valores de Pt ocorreram no T1 para o número de passadas igual a seis e oito - N6 e N8, nos demais números de passadas,

Quadro 5. Desdobramento da interação número de passadas e tratores para densidade e porosidade total do solo com o erro padrão da média

Trator	Número de passada					
	N0	N1	N2	N4	N6	N8
Densidade do solo (Mg m ⁻³)						
0,00-0,10 m						
T1	1,65 ± 0,00 a	1,49 ± 0,07 b	1,76 ± 0,01 a	1,70 ± 0,06 a	1,88 ± 0,03 a	1,90 ± 0,02 a
T2	1,31 ± 0,09 b	1,69 ± 0,04 a	1,68 ± 0,05 ab	1,69 ± 0,05 a	1,69 ± 0,02 b	1,60 ± 0,08 b
T3	1,39 ± 0,00 b	1,69 ± 0,02 a	1,52 ± 0,01 b	1,61 ± 0,02 a	1,44 ± 0,12 c	1,56 ± 0,03 b
0,10-0,20 m						
T1	1,68 ± 0,00 a	1,52 ± 0,03 a	1,77 ± 0,06 a	1,81 ± 0,05 a	1,89 ± 0,01 a	1,91 ± 0,01 a
T2	1,38 ± 0,17 b	1,59 ± 0,10 a	1,67 ± 0,05 ab	1,58 ± 0,06 a	1,70 ± 0,03 a	1,61 ± 0,07 b
T3	1,68 ± 0,00 a	1,74 ± 0,06 a	1,44 ± 0,07 b	1,61 ± 0,10 a	1,34 ± 0,06 b	1,39 ± 0,06 b
0,20-0,30 m						
T1	1,65 ± 0,00 a	1,60 ± 0,11 ab	1,71 ± 0,10 a	1,69 ± 0,06 a	1,86 ± 0,04 a	1,83 ± 0,05 a
T2	1,36 ± 0,11 b	1,48 ± 0,08 b	1,64 ± 0,04 a	1,42 ± 0,04 b	1,59 ± 0,05 b	1,50 ± 0,04 b
T3	1,49 ± 0,00 ab	1,73 ± 0,07 a	1,33 ± 0,05 b	1,37 ± 0,05 b	1,39 ± 0,04 b	1,39 ± 0,07 b
0,30-0,40 m						
T1	1,64 ± 0,00 a	1,52 ± 0,06 ab	1,55 ± 0,02 a	1,62 ± 0,03 a	1,83 ± 0,02 a	1,75 ± 0,03 a
T2	1,38 ± 0,17 b	1,34 ± 0,08 b	1,55 ± 0,07 a	1,32 ± 0,06 b	1,47 ± 0,03 ab	1,39 ± 0,03 b
T3	1,39 ± 0,00 b	1,72 ± 0,05 a	1,26 ± 0,05 b	1,37 ± 0,13 b	1,34 ± 0,04 b	1,36 ± 0,04 b
Porosidade total (m ³ m ⁻³)						
0,00-0,10 m						
T1	0,35 ± 0,00 b	0,42 ± 0,05 a	0,28 ± 0,01 b	0,30 ± 0,03 a	0,24 ± 0,01 b	0,23 ± 0,02 b
T2	0,40 ± 0,02 ab	0,34 ± 0,01 ab	0,32 ± 0,03 ab	0,34 ± 0,02 a	0,34 ± 0,01 a	0,36 ± 0,03 a
T3	0,44 ± 0,00 a	0,31 ± 0,02 b	0,38 ± 0,02 a	0,34 ± 0,00 a	0,41 ± 0,03 a	0,35 ± 0,01 a
0,10-0,20 m						
T1	0,33 ± 0,00 a	0,39 ± 0,02 a	0,31 ± 0,02 b	0,29 ± 0,01 b	0,25 ± 0,01 c	0,23 ± 0,01 c
T2	0,38 ± 0,04 a	0,37 ± 0,01 a	0,32 ± 0,02 ab	0,37 ± 0,03 a	0,33 ± 0,01 b	0,32 ± 0,01 b
T3	0,33 ± 0,00 a	0,28 ± 0,02 b	0,38 ± 0,02 a	0,35 ± 0,03 ab	0,41 ± 0,02 a	0,39 ± 0,01 a
0,20-0,30 m						
T1	0,30 ± 0,00 b	0,35 ± 0,03 a	0,32 ± 0,03 b	0,31 ± 0,02 b	0,26 ± 0,01 b	0,26 ± 0,02 b
T2	0,38 ± 0,01 a	0,39 ± 0,03 a	0,33 ± 0,02 b	0,38 ± 0,02 ab	0,36 ± 0,01 a	0,35 ± 0,02 a
T3	0,41 ± 0,00 a	0,27 ± 0,04 b	0,42 ± 0,01 a	0,39 ± 0,01 a	0,38 ± 0,01 a	0,37 ± 0,01 a
0,30-0,40 m						
T1	0,29 ± 0,00 c	0,35 ± 0,02 a	0,36 ± 0,01 b	0,31 ± 0,01 b	0,30 ± 0,03 b	0,29 ± 0,01 b
T2	0,38 ± 0,04 b	0,39 ± 0,02 a	0,34 ± 0,01 b	0,44 ± 0,02 a	0,38 ± 0,01 a	0,37 ± 0,01 a
T3	0,44 ± 0,00 a	0,28 ± 0,00 b	0,42 ± 0,02 a	0,39 ± 0,01 a	0,38 ± 0,01 a	0,39 ± 0,01 a

Letras iguais minúsculas na coluna não diferem entre si e comparam dentro da mesma camada. T1: trator de 2650 kg; T2: trator de 2795 kg; T3: trator de 3540 kg. Os níveis de carga foram: uma passagem (N1), duas passagens (N2), quatro passagens (N4), seis passagens (N6) e oito passagens (N8).

o comportamento apresentou variações sendo encontrado menores valores de Pt para o T3 em N2, e não se observaram diferenças estatísticas no N1. Para a camada de 0,20-0,30 m, o T1 evidenciou valores de Pt menores para N1, N6 e N8; e para a camada 0,30-0,40 m, o trator 1 apresentou menores valores de Pt nos números de passadas iguais a 1, 4, 6 e 8.

Os maiores valores de Ds e menores de Pt para o T1 podem estar relacionados ao pneu dianteiro direcional de tamanho menor quando comparado com o T2 e T3, sendo esses últimos, pneus de tração. Como os tratores trafegaram em marcha L2 (2ª reduzida), a transferência de carga para o eixo traseiro foi pequena, mantendo a carga sobre o eixo dianteiro. Uma vez que se observaram menores valores de Ds e maiores de Pt para T2 e T3, pôde-se inferir que os pneus desses tratores estavam mais adequados para a carga que esses estavam suportando.

O fator número de passadas, significativo na interação, foi submetido à análise de regressão, apresentando significância para Ds e Pt na camada de 0,00-0,10 m (Figura 1). Na camada de 0,00-0,10 m, o modelo quadrático indicou aumento da Ds na medida em que ocorreu incremento de carga até o N4; a partir desse ponto, observou-se mudança na curvatura do modelo. Observou-se também que, com uma passagem do trator na área, os valores de Ds mudaram de 1,45 para 1,62 Mg m⁻³. Para a Pt na camada de 0,00-0,10 m, o modelo quadrático demonstrou os altos valores dessa variável para sem tráfego (N1) e uma redução drástica quando aplicados os diferentes números de passadas. Os valores da Pt variaram de 0,39 a 0,32 m³m⁻³; quando aplicou-se o N2, a Pt alterou para 0,33 m³m⁻³, mantendo-se para N4 e N6 e voltando a reduzir em N8. Assim, após as primeiras passagens dos tratores na área, os valores de Ds e Pt já apresentaram resultados que se aproximavam dos níveis mais elevados de compactação.

O T1 apresentou significância na regressão para os valores de Ds e Pt; os demais (T2 e T3) não apresentaram modelos significativos em razão do número de passadas (Figura 2). Para a Ds e Pt, observou-se, respectivamente, acréscimo e diminuição linear na medida em que se aumentou o número de passadas.

Com os dados dos semivariogramas ajustados (Quadro 6), pôde-se observar que o modelo ajustado foi o esférico, o que está coerente com Souza et al. (2010). Quando esses autores estudaram os atributos físicos em um Latossolo Vermelho em cultivo de cana-de-açúcar, verificaram os melhores ajustes para os atributos físico-hídricos por meio do modelo esférico. Marasca et al. (2011), ao estudarem a variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e a umidade do solo em sistema de plantio direto na cultura da soja, concluíram que o modelo esférico é um dos modelos de maior ocorrência para atributos do solo.

O maior alcance (A) (Quadro 6) foi observado para o trator T1 ao nível N2 (0,67 m), enquanto o menor

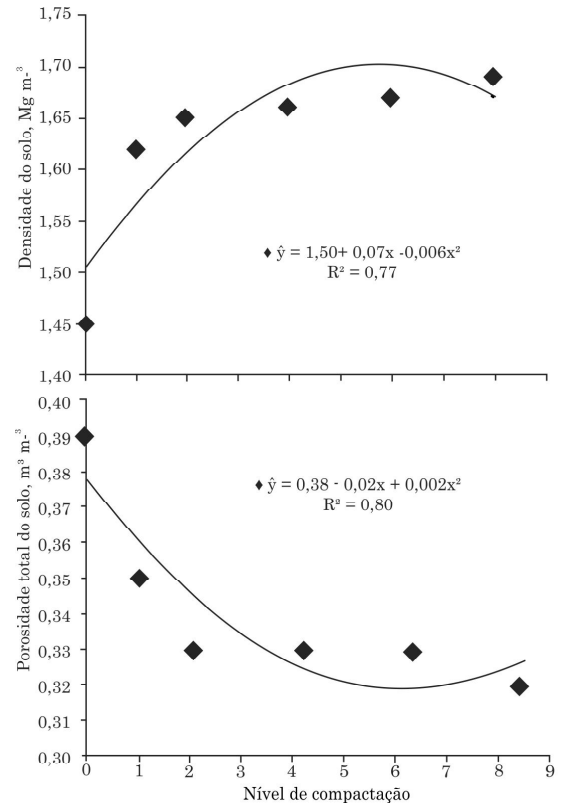


Figura 1. Densidade e porosidade total do solo em função do número de passadas dos tratores para a camada 0,00-0,10 m.

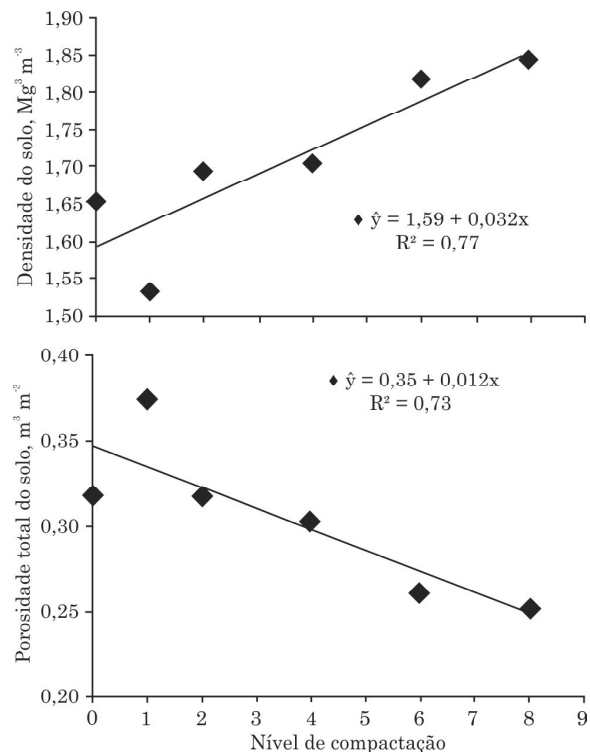


Figura 2. Densidade e porosidade total do solo em função do número de passadas do trator de 2.650 kg (T1).

valor de “A” igual a 0,19 m notou-se no trator T3 ao nível N1, o que pode servir de referência para estudos futuros, conforme Campos et al. (2013), visto que os valores médios do “A” foram 0,51; 0,43; e 0,39 m, respectivamente para os tratores T1, T2 e T3 e que esses são superiores à distância estabelecida na malha inicial (0,20 m).

Para a análise da dependência espacial (ADE) (Quadro 6), pôde-se observar valores variando entre 0,80 a 1,00, o que indicou forte dependência espacial conforme classificação de Zimback (2001), ou seja, quanto maior o valor do ADE, menor é o valor do efeito pepita (Co) em relação ao valor do patamar (Co + C). Cavalcante et al. (2011), ao estudarem a variabilidade espacial de atributos físicos do solo sob diferentes usos e manejos, encontraram grau de dependência espacial forte e moderado para os diferentes usos e manejos do solo, evidenciando que a distribuição dos atributos físicos no espaço não é aleatória.

Os mapas de isolinhas, que foram construídos utilizando-se da interpolação por krigagem para a representação da RP em perfil do solo, após deslocamento dos tratores T1, T2 e T3, para os diferentes números de passadas N1, N2, N4, N6 e N8, estão apresentados na figura 3. Na passagem N1 do T1, verificaram-se altos valores de RP em perfil, sendo esses superiores a 6,0 MPa, o que é demonstrado pela distribuição de zonas compactadas a partir da camada 0,10-0,20 m até a camada 0,30-0,40 m.

A presença de zonas compactadas em maior quantidade no T1 - N1 provavelmente ocorreu em razão

dos maiores valores de Ds para o trator T1, uma vez que a Ds tem relação direta com a RP, conforme verificado por Cunha et al. (2002), os quais, ao analisarem o comportamento da RP, medida pelo Índice de Cone, de um solo argiloso submetido a condições controladas de umidade e Ds, constaram que o incremento na Ds e a diminuição da umidade provocaram aumento linear da RP. Mion et al. (2012), ao estudarem a variabilidade espacial da Pt, resistência do solo à penetração e a umidade em uma área de pastejo rotacionado de ovinos, concluíram que a RP aumenta à medida que a Pt e umidade do solo exerce menor influência sobre o solo.

Pôde-se verificar que a pressão exercida pelos rodados do T3 foi mais evidente na passagem N8, que apresentou zonas de compactação acima de 6,0 MPa, a partir da camada 0,20-0,30 m (Figura 3). Resultados semelhantes foram encontrados por Carvalho et al. (2008), ao avaliarem a variabilidade espacial da RP e da umidade do solo em área sob sistema de manejo de colheita mecanizada da cana-de-açúcar, no município de Rio Brilhante, MS; essa maior variabilidade foi atribuída, segundo os autores, à exposição do solo e ao intenso tráfego de máquinas em condições inadequadas de umidade, contribuindo, portanto, na alteração da qualidade estrutural do solo.

O T1 apresentou maior concentração de camadas compactadas do que o T2 e T3, provavelmente por causa da conformação dos rodados e da distribuição de massa sobre esses, enquanto o T3 possui rodado que permite maior área de contato e, com isto, melhor

Quadro 6. Semivariograma ajustado para os níveis de compactação e tratores para a resistência mecânica do solo à penetração

Nível	Modelo	Co	Co + C	A	R ²	SQR	ADE	Classe
T1								
N1	Esférico	1,62	17,51	0,47	0,97	0,91	0,91	Forte
N2	Esférico	0,01	16,09	0,67	0,98	1,45	0,99	Forte
N4	Esférico	1,21	6,64	0,40	0,82	0,59	0,82	Forte
N6	Esférico	0,01	24,52	0,60	0,97	4,67	1,00	Forte
N8	Esférico	0,33	1,98	0,42	0,96	0,01	0,83	Forte
T2								
N1	Esférico	0,13	4,26	0,48	0,95	0,111	0,93	Forte
N2	Esférico	0,13	1,85	0,55	0,99	0,01	0,95	Forte
N4	Esférico	0,30	1,53	0,41	0,89	0,01	0,80	Forte
N6	Esférico	0,11	0,86	0,40	0,96	2,39	0,86	Forte
N8	Esférico	0,001	1,12	0,31	0,90	0,02	0,99	Forte
T3								
N1	Esférico	0,47	2,23	0,19	0,87	0,303	0,80	Forte
N2	Esférico	0,001	1,34	0,48	0,82	0,101	0,99	Forte
N4	Esférico	1,37	20,37	0,66	0,98	0,95	0,93	Forte
N6	Esférico	3,40	35,65	0,30	0,99	0,56	0,90	Forte
N8	Esférico	0,01	31,08	0,30	0,99	2,44	1,00	Forte

T1: Trator de 2650 kg; T2: trator de 2795 kg; T3: trator de 3540 kg. Os níveis de carga foram: uma passagem (N1), duas passagens (N2), quatro passagens (N4), seis passagens (N6) e oito passagens (N8).

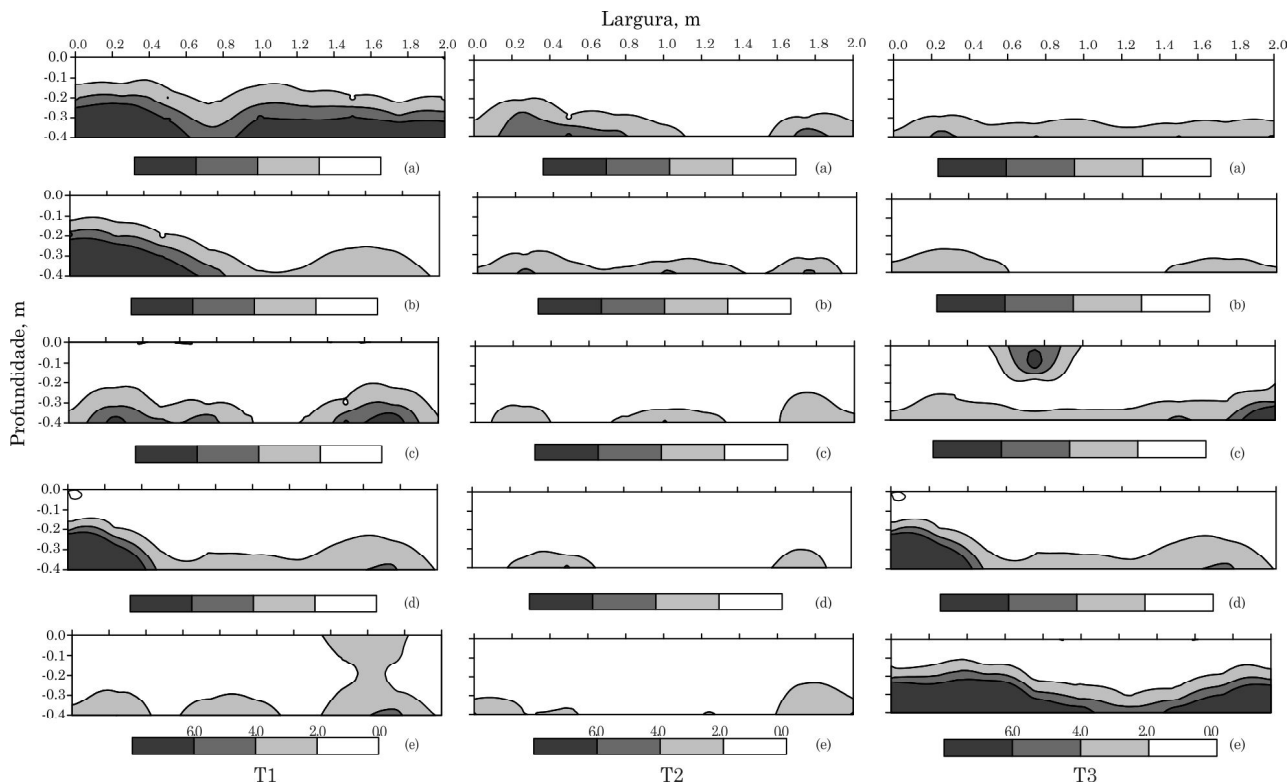


Figura 3. Resistência mecânica do solo à penetração (RP em MPa) para: T1 - trator de massa de 2.650 kg; T2 - trator de massa de 2.795 kg; T3 - trator de massa de 3.540 kg (T3). As intensidades de tráfego foram: uma passagem (a); duas passagens (b); quatro passagens (c); seis passagens (d) e oito passagens (e).

distribuição de carga. Pôde-se observar na passagem N1 e N2 menor pressão sobre a superfície do solo; entretanto, com aumento do número de passadas, verificou-se maior ocorrência de camadas compactadas não somente nos locais de deslocamento como também nas áreas adjacentes, visto que o efeito da pressão ocorre em forma de bulbos no local de aplicação da carga (Balastreire, 1987).

Para o T2, com a evolução do número de passagens, não houve camadas compactadas a ponto de dificultar o desenvolvimento do sistema radicular, sendo o valor considerado crítico de RP para solos arenosos de 6,0 MPa (Sene et al., 1985).

Os maiores valores de RP para o T2 encontraram-se concentrados na camada 0,30-0,40 m, enquanto para o T1 e T3, nas camadas 0,20-0,30 e 0,30-0,40 m. Esses resultados diferem dos de Machado et al. (2005), os quais, ao avaliarem a influência da inflação dos pneus na RP, concluíram que a região do solo acometida com maiores compactações foram as camadas 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.

CONCLUSÕES

1. Os maiores valores de densidade do solo foram observados para o trator de menor massa e

inversamente para porosidade total, ao apresentar menores valores.

2. Os valores de densidade do solo, na segunda passagem dos tratores, de maneira geral, foram próximos aos demais, para a camada de 0,00-0,10 m, enquanto os de porosidade total para a mesma camada reduziram com o aumento do número de passadas.

3. O trator de menor massa com significância para o número de passadas apresentou valores crescentes de densidade do solo e decrescente para os valores de porosidade total do solo.

4. Os mapas de isolinhas para o perfil do solo indicaram pontos críticos de resistência à penetração do solo, mas evidentes para o trator de menor massa em virtude dos rodados mais estreitos.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela concessão de bolsas aos autores. A FACEPE - Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco pela concessão de bolsa à um dos autores. Os autores agradecem ao CRAD - Centro de Recuperação de Áreas Degradadas da UNIVASF, pela cessão de uso do trator para a

condução do experimento. Os autores agradecem ao CEMA-FAUNA - Centro de Conservação e Manejo da Fauna da UNIVASF pela cessão de uso do trator para a condução do experimento.

LITERATURA CITADA

- AMARAL, F.C.S.; SILVA, E.F. & MELO, A.S. Caracterização pedológica e estudos de infiltração da água no solo em perímetros irrigados no Vale do São Francisco. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2006. 104p.
- BALASTREIRE, L.A. Máquinas agrícolas. São Paulo, Manole, 1987. 310p.
- BANZATTO, D.A. & KRONKA, S.N. Experimentação agrícola. Jaboticabal, FUNEP, 2006. 237p.
- BEUTLER, A.N. & CENTURION, J.F. Compactação do solo no desenvolvimento radicular e na produtividade da soja. *Pesq. Agropec. Bras.*, 39:581-588, 2004.
- BEUTLER, S.J.; LOSS, A.; PEREIRA, M.G.; ANJOS, L.H.C.; FERREIRA, E.P. & SANTOS, L.L. & SILVA, E.M.R. Frações oxidáveis do carbono orgânico cultivado sob manejo orgânico. In: FERTBIO, 2008. Desafios para o uso do solo com eficiência e qualidade ambiental. Londrina, 2008. Anais... Londrina, 2008. CD-ROM
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F. & SILVA, A.P. Comparação de penetrômetros na avaliação da compactação de Latossolos. *Eng. Agríc.*, 27:146-151, 2007.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Levantamento exploratório - reconhecimento de solos do Estado de Pernambuco. Recife, Sudene, 1973. 354p. (Boletim Técnico, 26)
- 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 Agronômico de Campinas. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 1986. 94p. (Boletim Técnico, 106)
- CAMPOS, M.C.C.; SOARES, M.D.R.; SANTOS, L.A.C.; OLIVEIRA, I.A.; AQUINO, R.E. & BERGAMIN, A.C. Variabilidade espacial dos atributos físicos em Argissolo Vermelho sob floresta. *Comum. Sci.*, 4:168-173, 2013.
- CARVALHO, L.A.; MARIANO NETO, V.J.; SILVA, L.F.; PEREIRA, J.C.; NUNES, W.A.G.A. & CHAVES, C.H.C. Resistência mecânica do solo à penetração (RMP) sob cultivo de cana-de-açúcar, no município de Rio Brilhante - MS. *Agrarian*, 2:7-22, 2008.
- CAVALCANTE, E.G.S.; ALVES, M.C.; SOUZA, Z.M. & PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo sob diferentes usos e manejos. *R. Bras. Eng. Agríc. Amb.*, 3:237-243, 2011.
- CORTEZ, J.W.; ALVES, A.D.S.; MOURA, R.D.; OLSZEWSKI, N. & NAGAHAMA, H.J. Atributos físicos do Argissolo Amarelo do semiárido nordestino sob sistemas de preparo. *R. Bras. Ci. Solo*, 35:1207-1216, 2011.
- CUNHA, J.P.A.R.; VIEIRA, L.B. & MAGALHÃES, A.C. Resistência mecânica do solo à penetração sob diferentes densidades e teores de água. *Eng. Agríc.*, 10:1-7, 2002.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. Manual de métodos de análise do solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 2011. 230p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, Centro Nacional de Pesquisas de Solos, 2006. 360p.
- KELLER, T. A model for the prediction of the contact area and the distribution of vertical stress below agricultural tyres from readily available tyre parameters. *Bios. Eng.*, 92:85-96. 2005.
- LANDIM, P.M.B. Análise estatística de dados geológicos. São Paulo, Fundação Editora da UNESP, 1998. 226p. (Ciência e Tecnologia)
- LANÇAS, K. P. SILVA, R. B. da; GUERRA, S. P. S.; PEREIRA, F. J. de S.; ACOSTA, J. J. B.; JESUÍNO, P. R.; LANÇAS, K. J. G.; PAULA, C. A. de; CAMARGO, B. F.; CAVALHEIRO, B. A. Pneus radiais. *Cultivar Máquinas*, 48:3-10, 2005.
- LEONEL, C.L.; FREDDI, O.S.; BEUTLER, A.N.; CENTURION, M.A.P.C. & CENTURION, J.F. Influência da compactação do solo no crescimento radicular e na produtividade do amendoim. *Científica*, 35:51-60, 2007.
- LIMA, C.L.R. Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2004. 70p. (Tese de Doutorado)
- LOPES, E.S.; SAMPIETRO, J.A.; LOMBARDI, K.C. & DIAS, A.N. Avaliação da umidade na compactação do solo submetido ao tráfego de máquinas de colheita florestal. *R. Árvore*, 35:659-667, 2011.
- MACHADO, A.L.T.; REIS, A.V.; FERREIRA, M.F.P.; MACHADO, R.L.T.; MACHADO, A.L.C. & BAUER, G.B. Influência da pressão de inflação do pneu do trator na resistência do solo à penetração. *R. Bras. Agroci.*, 4:481-486, 2005.
- MARASCA, I.; OLIVEIRA, C.A.A.; GUIMARÃES, E.C.; CUNHA, J.P.A.R.; ASSIS, R.L.; PERIN, A. & MENEZES, L.A.S. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e o teor de água em sistema de plantio direto na cultura da soja. *Biosci. J.*, 2:239-246, 2011.
- MION, R.L.; NASCIMENTO, E.M.S.; SALES, F.A.L.; SILVA, S.F.; DUARTE, J.M.L. & SOUSA, B.M. Variabilidade espacial da porosidade total, umidade e resistência do solo à penetração de um Argissolo Amarelo. *Semina: Ci. Agron.*, 33:2057-2066, 2012.
- PERDOK, U.D. & ARTS, W.B.M. The performance of agricultural tyres in soft soil conditions. *Soil Till. Res.*, 10:319-330, 1987.

- REICHARDT, K. & TIMM, L.C. Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações. Barueri, Manole, 2004. 478p.
- REICHERT, J.M.; REINERT, D.J. & BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. Ci. Amb., 27:29-48, 2003.
- RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O.R.; LLANILLO, R.F. & FERREIRA, R. Compactação do solo: Causas e efeitos. Semina: Ci. Agron., 26:321-344, 2005.
- SENE, M.; VEPRASKAS, M.J.; NADERMAN, G.C. & DENTON, H.P. Relationship of soil texture and structure to corn yield response to subsoiling. Soil Sci. Soc. Am. J., 49:422-427, 1985.
- SILVA, F.A.S. & AZEVEDO, C.A.V. A new version of the Assistat - Statistical Assistance Software. In: WORLD CONGRESS ON COMPUTERS IN AGRICULTURE, 4., Orlando, 2006. Proceedings... Reno, American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2006. p.393-396.
- SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J. & PEREIRA, G.T. Geoestatística e atributos do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. Ci. Rural, 1:48-56, 2010.
- STOLF, R. Teoria e teste experimental de formulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. R. Bras. Ci. Solo, 15:229-235, 1991.
- STOLF, R.; FERNANDES, J. & FURLANI NETO, V. Penetrômetro de impacto - modelo IAA/Planalsucar - STOLF. STAB, 1:18-23, 1983.
- STONE, L.F.; GUIMARÃES, C.M. & MOREIRA, J.A.A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. I: Efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. R. Bras. Eng. Agric. Amb., 6:207-212, 2002.
- VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H. & SCHAEFER, C.E.G.R., eds. Tópicos em ciência do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p.1-54.
- 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. p.319-344.
- ZIMBACK, C.R.L. Análise especial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo. Botucatu, Universidade Estadual Paulista, 2001. 114p. (Tese de Doutorado)