

SEÇÃO I - FÍSICA DO SOLO

TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA NA AVALIAÇÃO DA DENSIDADE DE UM SOLO DO SEMI-ÁRIDO BRASILEIRO⁽¹⁾

L. FANTE JUNIOR⁽²⁾, J. C. M. OLIVEIRA⁽³⁾, L. H. BASSOI⁽⁴⁾,
C. M. P. VAZ⁽⁵⁾, A. MACEDO⁽⁵⁾, O. O. S. BACCHI⁽⁶⁾, K. REICHARDT^(6, 7),
A. C. CAVALCANTI⁽⁸⁾ & F. H. B. B. SILVA⁽⁸⁾

RESUMO

A densidade do solo de amostras indeformadas foi determinada por meio das técnicas de tomografia computadorizada e do torrão impermeabilizado, visando à identificação de processos de compactação do solo e a comparação de métodos. A pesquisa também visou auxiliar um levantamento pedológico elaborado com fins de classificação de terras para irrigação. As amostras de solo foram coletadas da região semi-árida de Petrolina (PE), ao longo de perfis do solo, da superfície até 1 m de profundidade, em camadas de 0,1 m e em duas áreas distintas quanto à sua ocupação vegetal e manejo: (1) vegetação natural (caatinga); (2) área cultivada e irrigada por pivô central. As tomografias foram realizadas com um tomógrafo de primeira geração, constituído por uma fonte de radiação gama de ¹³⁷Cs e um detector cintilador de NaI(Tl), com eletrônica padrão de espectrometria gama e sistema de movimentação de amostra controlados por uma interface específica acoplada a um microcomputador. Na área de caatinga, os resultados evidenciam a ocorrência de um adensamento do solo em camadas mais profundas, abaixo de 0,4 m, bem como de uma camada adensada e, ou, compactada entre aproximadamente 0 e 0,4 m, na área cultivada com pivô central, possivelmente em virtude da ação de máquinas e implementos utilizados no preparo e cultivo do solo.

Termos de indexação: adensamento, compactação, radiação gama.

⁽¹⁾ Trabalho parcialmente financiado pela FAPESP. Recebido para publicação em novembro de 2000 e aprovado em agosto de 2002.

⁽²⁾ Professor da Faculdade de Ciências Matemáticas e da Natureza da Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP. Rodovia do Açúcar, km 156, CEP 13400-901 Piracicaba (SP). E-mail: lfjunior@unimep.br

⁽³⁾ Professor da Escola de Engenharia de Piracicaba – EEP. Av. Monsenhor Salgot 560, Caixa Postal 226, CEP 13414-040 Piracicaba (SP).

⁽⁴⁾ Pesquisador da Embrapa Semi-Árido de Petrolina (PE). Caixa Postal 23, CEP 56300-970 Petrolina (PE).

⁽⁵⁾ Pesquisador da Embrapa Instrumentação Agropecuária de São Carlos (SP). Caixa Postal 741, CEP 13560-970 São Carlos (SP). Bolsista do CNPq.

⁽⁶⁾ Pesquisador, Laboratório de Física do Solo, CENA/USP, Caixa Postal 96, CEP 13400-970 Piracicaba (SP). Bolsista do CNPq.

⁽⁷⁾ Professor da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP. Av. Pádua Dias 11, CEP 13418-900 Piracicaba (SP).

⁽⁸⁾ Pesquisador da Embrapa Solos. Rua Antonio Falcão 402, CEP 51020-240 Recife (PE).

SUMMARY: *COMPUTED TOMOGRAPHY FOR THE SOIL DENSITY EVALUATION OF SAMPLES OF SEMI-ARID BRAZILIAN SOILS*

The soil bulk density of undisturbed samples was evaluated using computed tomography and paraffin-sealed soil clod techniques, with the objective of identifying soil compaction processes and to compare the applied methodologies. Data were also used to complement a soil classification survey for irrigation purposes. Samples were collected from soil profiles of the semi-arid region of Petrolina (PE), Brazil, from the soil surface down to a depth of 1 m, in 10 cm layers. Two distinct areas were chosen: (1) native vegetation ("caatinga"), and (2) cultivated area under central pivot irrigation. Tomographies were obtained by a first generation tomograph, using a ^{137}Cs gamma source, a NaI (TI) scintillation crystal, and a standard electronic counting system linked to a sample moving system, controlled by a specific computational interface. Results suggest a density increase at greater depths (below 0.4 m) for the "caatinga" area. In the central pivot area, a compacted soil layer was detected between approximately 0 and 0.4 m, consisting of natural and/or dense layers, possibly due to machinery action during soil tillage.

Index terms: dense layer, compaction, gamma radiation.

INTRODUÇÃO

A compactação do solo é verificada quando ocorre uma compressão em uma condição não saturada, que expulsa o ar do espaço poroso, reduzindo o volume de poros e aumentando a sua densidade (Gupta & Allmaras, 1987; Gupta et al., 1989). Essa compressão é resultante de uma ação antrópica, em que há aplicação de pressão por meios mecânicos (Gomes, 1996).

O adensamento do solo consiste na redução natural do espaço poroso pelo rearranjo de suas partículas, que, conseqüentemente, leva ao aumento da densidade de camadas ou horizontes do solo (Curi, 1993). O termo adensamento não é utilizado apenas quando há redução de volume resultante de um processo pedogenético, mas também quando há expulsão de água do espaço poroso provocado por uma compressão do solo (Dias Junior, 2000).

Tanto a compactação como o adensamento podem afetar a dinâmica da água (Libardi et al., 1982; Silva et al., 1992), a dinâmica de solutos (Landina & Klevenk, 1984), a distribuição do sistema radicular (Demattê, 1980; Alvarenga et al., 1996), a porosidade total, tamanho e continuidade dos poros (Warkentin et al., 1971).

No Brasil, tem sido verificado o adensamento em vários solos (Jacomine, 1974; Maltoni, 1994; Oliveira, 1994; Gomes, 1996; Moniz, 1996; Vidal Torrado et al., 1999), sendo comum, no Nordeste brasileiro, a presença de camadas adensadas em solos dos Tabuleiros Costeiros (Fonseca, 1986; Silva & Ribeiro, 1992; Silva & Ribeiro, 1997). No Vale do São Francisco, compreendido pelos municípios de Petrolina (PE) e Juazeiro (BA), onde ocorrem os solos do Tabuleiro Sertanejo ou Interioranos, a área com

agricultura irrigada aumentou significativamente nas últimas décadas. Levantamentos pedológicos efetuados nessa região têm demonstrado a expressiva ocorrência de solos com adensamento subsuperficial (Burgos & Cavalcanti, 1988; Cavalcanti et al., 1999), resultante não só de processos pedogenéticos, tais como: eluviação e iluviação de argila, que favorecem o acúmulo desta partículas e de silício, ferro e alumínio no horizonte B, mas também de processos de plintização e salinização, influenciados por ciclos alternados de umedecimento e secagem (Silva, 2000), que podem limitar o uso destas áreas.

A ocorrência dos processos de compactação e de adensamento pode ser avaliada pela densidade do solo ao longo de seu perfil. Considerando que as técnicas convencionais, como os métodos do torrão impermeabilizado e do anel volumétrico, têm sido, em muitos casos, limitadas em razão da necessidade do conhecimento do comportamento da densidade do solo em uma escala milimétrica, novas técnicas têm sido utilizadas para tal fim (Crestana & Vaz, 1997).

A utilização da técnica da tomografia computadorizada de raios gama (Petrovic et al., 1982; Crestana, 1985; Vaz et al., 1989; Crestana et al., 1992; Oliveira et al., 1995; Vaz et al., 1996; Naime et al., 1997) tem-se destacado na determinação da densidade do solo com maior resolução, possibilitando a investigação do interior de amostras indeformadas de maneira contínua e milimétrica.

Com o propósito de auxiliar a complementação de informações sobre um levantamento pedológico com fins de classificação de terras para irrigação na região semi-árida do Nordeste brasileiro, este trabalho teve como objetivos: a) avaliar a ocorrência

dos processos de compactação e de adensamento de um solo, em duas áreas distintas, quanto ao seu uso e manejo; (b) utilizar a técnica da tomografia computadorizada na determinação da densidade do solo, em comparação a um método convencional.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado no Projeto de Irrigação Bebedouro (EMBRAPA), no município de Petrolina (PE) (latitude 09 ° 09 ' S, longitude 40 ° 22 ' W, altitude 365 m), onde foram selecionadas duas áreas adjacentes e distintas quanto à sua ocupação vegetal: AVN - área sob vegetação nativa (caatinga); APC - área de soja e milho em cultivos alternados e irrigada por pivô central.

Para cada área selecionada, foi aberta uma trincheira para a descrição pedológica do solo de acordo com os critérios definidos por Lemos & Santos (1996). De acordo com EMBRAPA (1999), o solo de ambas as áreas é classificado como Argissolo Amarelo eutrófico abráptico plântico fase caatinga hiperxerófila de relevo plano. A litogia e a geologia foram descritas como material sedimentar argilo-arenoso do Terciário/Quaternário (Pleistoceno/Plioceno). O material originário são sedimentos retrabalhados, submetidos a intensos processos pedogenéticos. O solo apresenta erosão laminar ligeira e drenagem moderada a imperfeita, e ausência de pedregosidade

e rochosidade. A distância entre as duas trincheiras era de aproximadamente 420 m. Para cada horizonte, foram coletadas amostras deformadas de solo para a determinação da sua granulometria e classe textural (EMBRAPA, 1997) (Quadro 1).

Nestas mesmas trincheiras, foram coletadas amostras indeformadas em camadas de solo de espessura 0,1 m (monolitos de 0,1 x 0,1 x 0,1 m), da superfície até 1 m de profundidade. Cada monolito retirado foi envolvido com parafina, com vistas em manter a sua estrutura e umidade de campo. No total, foram coletadas 20 amostras indeformadas, 10 por área avaliada, que foram utilizadas na determinação da densidade do solo (D_s , kg m⁻³) segundo a técnica da tomografia computadorizada de raios gama (Vaz et al., 1992) e o método do torrão impermeabilizado (EMBRAPA, 1997).

O tomógrafo computadorizado utilizado, pertencente ao Laboratório de Física do Solo do CENA/USP, campus de Piracicaba (SP), é constituído por uma fonte radioativa de ¹³⁷Cs de atividade de 300 mCi e por um detector cintilador de NaI(Tl) de 3" x 3" e fotomultiplicadora, com sistema de colimação cilíndrico de 0,002 m de diâmetro e distância de aproximadamente 0,2 m entre fonte e detector. A varredura da amostra de solo e a aquisição dos dados foram feitas em uma mesa com movimentos de translação e rotação e com auxílio de uma eletrônica-padrão, sistemas controlados por uma interface específica acoplada a um microcomputador (Vaz et al., 1989; Crestana et al., 1992).

Quadro 1. Caracterização dos horizontes e análise granulométrica do Argissolo Amarelo eutrófico plântico, para as áreas sob vegetação nativa (AVN) e sob cultivo constante e irrigada por pivô central (APC)

Horizonte (camada)	Areia	Silte	Argila	Classe textural
m	g kg ⁻¹			
	Área: ANV			
A ₁ (0-0,18)	860	60	80	areia franca
A ₂ (0,18-0,33)	860	60	80	areia franca
A ₃ (0,33-0,45)	820	80	100	areia franca
Bt ₁ (0,45-0,60)	660	100	240	franco-argilo-arenosa
Bt _{r1} (0,60-0,75)	520	110	370	argila arenosa
Bt _{r2} (0,75-1,10)	510	140	350	argila arenosa
Bt ₄ (1,10-1,70)	540	180	280	argila arenosa
Bt ₅ (1,70-2,05)	490	190	320	argilo-arenosa
	Área: APC			
Ap ₁ (0-0,15)	840	80	80	areia franca
Ap ₂ (0,15-0,27)	850	70	80	areia franca
Bt ₁ (0,27-0,45)	720	80	200	franco-argilo-arenosa
Bt ₂ (0,45-0,65)	580	140	280	franco-argilo-arenosa
Bt _{r1} (0,65-1,10)	520	90	390	argila arenosa
Bt _{r2} (1,10-1,60)	590	110	300	argila arenosa
Bt _{r3} (1,60-2,00)	560	140	300	argila arenosa
Bt ₆ (2,00-2,30)	530	130	340	argila arenosa

Na calibração do tomógrafo, utilizaram-se os meios homogêneos água, glicerina, álcool, latão, alumínio, acrílico e "nylon". Na determinação dos valores médios dos coeficientes de atenuação linear (μ , m^{-1}), efetuaram-se medidas de transmissão do feixe de raios gama em diferentes pontos da amostra de espessura conhecida. Para cada amostra considerada, também foi obtida uma imagem tomográfica em um plano longitudinal desta, determinando-se um valor médio para a grandeza adimensional, denominada Unidade Tomográfica (UT), admitindo-se a região central da amostra e representativa da imagem (Vaz, 1989).

As imagens tomográficas das amostras indeformadas de solo foram obtidas segundo um plano longitudinal, obedecendo à coordenada de profundidade do solo no campo (trincheira) e em torno de uma região central de cada amostra. Considerando uma dimensão de 80 x 80 para a matriz dos valores de UT e a geometria utilizada, foi possível discriminar finas camadas de 0,0025 m ao longo da profundidade do solo, para cada amostra indeformada de 0,1 x 0,1 x 0,1 m.

Utilizando a relação entre μ e UT e a equação que relaciona UT e a densidade do solo (D_S , $kg\ m^{-3}$), descrita por Crestana (1985), ou seja:

$$D_S = \frac{UT}{k(\mu_S + \mu_a U)} \quad (1)$$

determinaram-se os valores médios de D_S referentes a cada camada de 0,0025 m (média dos valores UT de determinada linha da matriz especificada) e a toda amostra considerada (camada de 0,1 m; média de todos os valores de UT da matriz em questão). Na equação 1, μ_S e μ_a ($m^2\ kg^{-1}$) são os coeficientes de atenuação de massa para o solo em questão e para a água, respectivamente, k o coeficiente angular da relação entre μ e UT e U ($kg\ kg^{-1}$) a umidade de campo da amostra. Os valores de μ_S e μ_a foram obtidos pelo acondicionamento do solo e da água em recipiente de geometria conhecida e transmissão de feixe de raios gama em diferentes pontos do recipiente. Após a obtenção das imagens tomográficas, retirou-se a parafina de cada amostra de solo (monolito), a qual foi levada à estufa a 110 °C, por 36 horas, determinando-se U pelo método gravimétrico (EMBRAPA, 1997).

Posteriormente, de cada amostra indeformada de 0,1 x 0,1 x 0,1 m foram retiradas subamostras, as quais foram novamente parafinadas para a determinação da densidade do solo, segundo o método do torrão impermeabilizado (EMBRAPA, 1997). Assim, para cada uma das 20 amostras (10 por área avaliada: APC e VAN), determinou-se também, por este método, uma densidade média do solo correspondente a cada camada de 0,1 m considerada.

Os valores médios da densidade do solo foram determinados pela média aritmética de aproximadamente

50 valores, para o método da tomografia computadorizada, e de 10 valores, para o método do torrão impermeabilizado, com a avaliação dos erros e, ou, incertezas associados realizada a partir do respectivo desvio-padrão (σ) e, conseqüentemente, do coeficiente de variação (CV). Comparando as duas áreas selecionadas e os dois métodos empregados, as diferenças nos valores de densidade foram verificadas, considerando-se os intervalos relativos a $\pm\sigma$ e $\pm 2\sigma$ (Spiegel, 1985). Tal procedimento foi adotado, uma vez que em cada área selecionada realizou-se apenas uma repetição por camada de solo amostrada, impossibilitando a comparação de resultados a partir de testes de médias.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado da calibração do tomógrafo computadorizado é apresentado na figura 1, observando-se uma boa relação linear entre as grandezas μ e UT, com significativo valor do coeficiente de determinação ($R^2 = 0,997$). O valor médio encontrado para m_S foi de $0,754\ m^2\ kg^{-1}$, valor este que está em concordância com o especificado na literatura ($\mu_S = 0,775\ m^2\ kg^{-1}$, Ferraz & Mansell, 1979).

Os valores médios de densidade do solo (D_S), seus erros associados (s_{DS}) e coeficientes de variação (CV), para cada amostra indeformada, correspondentes às camadas de 0,10 m das áreas avaliadas e determinados pela aplicação dos dois métodos, tomografia computadorizada e torrão impermeável, estão apresentados no quadro 2. Com relação aos

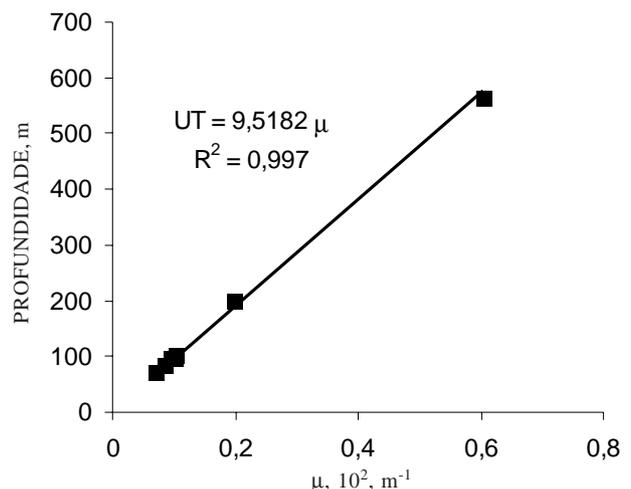


Figura 1. Relação entre coeficiente de atenuação linear (μ) e unidades tomográficas (UT), na calibração do tomógrafo computadorizado através da utilização dos meios conhecidos e homogêneos.

valores encontrados para CV, estes se apresentaram razoavelmente baixos, independentemente do método utilizado e da área considerada.

Quanto à comparação dos valores de D_S entre as áreas avaliadas (AVN e APC), para cada camada do solo e cada método empregado (Quadro 2 e Figuras 2a e 2b), pode-se verificar que, considerando o intervalo de $\pm\sigma$, os resultados apresentaram-se diferentes nas camadas do solo entre 0 e 0,3 m, para o método da tomografia computadorizada, e entre 0,1 e 0,4 m, para o método do torrão impermeabilizado. Para o intervalo de $\pm 2\sigma$ (Quadro 2), estas diferenças são também verificadas para o método do torrão impermeabilizado; entretanto, para o método da tomografia computadorizada, os resultados mostraram-se diferentes somente para a camada entre 0,2 e 0,3 m. Desta forma, os maiores valores de D_S obtidos para APC indicam, nesta área, a ocorrência de camada superficial de solo compactada, causada pelo uso de máquinas e implementos agrícolas no preparo e cultivo do solo.

No quadro 2 e nas figuras 2c e 2d, na comparação entre os métodos (tomografia e torrão), admitindo-se o intervalo ($\pm\sigma$), observaram-se diferenças nos resultados de D_S nas camadas de 0,2-0,3, 0,5-0,6 e

0,6-0,7 m, para a AVN, e de 0,3-0,4, 0,4-0,5, 0,5-0,6, 0,7-0,8 e 0,8-0,9 m, para a APC. Entretanto, admitindo o intervalo ($\pm 2\sigma$), observou-se diferença entre os respectivos valores, apenas na camada de 0,7-0,8 m, para a APC (Quadro 2). Nesta comparação, as principais diferenças foram verificadas em camadas mais profundas do solo, com menores valores de D_S obtidos pelo método da tomografia computadorizada em comparação ao do torrão impermeabilizado.

Nas figuras 2c e 2d, principalmente para a AVN e para o método do torrão impermeabilizado, verificou-se também uma tendência de aumento da densidade do solo ao longo do seu perfil, aproximadamente a partir da profundidade 0,45 m onde ocorre a transição abrupta dos horizontes A e B e do gradiente textural (Quadro 1), evidenciando a presença de adensamento do solo em suas camadas mais profundas.

Comparando os métodos para determinação da densidade do solo, ressalta-se que a aplicação da técnica da tomografia computadorizada apresenta uma vantagem significativa em relação aos métodos convencionais, uma vez que permite uma avaliação quase que pontual da amostra de solo e,

Quadro 2. Valores médios de densidade do solo (D_S), erros associados (σ_{D_S}) e coeficiente de variação (CV), para os métodos da tomografia computadorizada e do torrão impermeável, referentes às áreas sob vegetação nativa (AVN) e sob cultivo irrigado por pivô central (APC)

Área	Camada	Tomografia computadorizada			Torrão impermeável		
		$D_S \times 10^3$	$\sigma_{D_S} \times 10^3$	C.V.	$D_S \times 10^3$	$\sigma_{D_S} \times 10^3$	C.V.
	m	kg m ⁻³		%	kg m ⁻³		%
AVN	0-0,1	1,65 ADbd	0,06	3,7	1,67 ADad	0,04	2,4
	0,1-0,2	1,56 ADbd	0,04	2,7	1,52 ADbe	0,04	2,6
	0,2-0,3	1,46 BDbe	0,05	3,6	1,55 ADbe	0,01	0,6
	0,3-0,4	1,54 ADad	0,04	2,8	1,61 ADbe	0,03	1,9
	0,4-0,5	1,62 ADad	0,07	4,5	1,65 ADad	0,05	3,0
	0,5-0,6	1,65 BDad	0,06	3,4	1,78 ADad	0,04	2,2
	0,6-0,7	1,72 BDad	0,05	3,0	1,84 ADad	0,06	3,3
	0,7-0,8	1,76 ADad	0,05	2,9	1,90 ADad	0,05	2,6
	0,8-0,9	1,70 ADad	0,05	2,9	1,78 ADad	0,10	5,6
	0,9-1,0	1,78 ADad	0,05	2,9	1,87 ADad	0,06	3,2
APC	0-0,1	1,81 ADad	0,04	2,1	1,78 ADad	0,08	4,5
	0,1-0,2	1,71 ADad	0,06	3,4	1,71 ADad	0,02	1,2
	0,2-0,3	1,79 ADad	0,04	2,1	1,81 ADad	0,04	2,2
	0,3-0,4	1,59 BDad	0,07	4,2	1,76 ADad	0,03	1,7
	0,4-0,5	1,63 BDad	0,05	3,2	1,72 ADad	0,02	1,2
	0,5-0,6	1,60 BDad	0,06	3,6	1,74 ADad	0,04	2,3
	0,6-0,7	1,67 ADad	0,06	3,5	1,76 ADad	0,06	3,4
	0,7-0,8	1,44 BEad	0,09	6,1	1,75 ADad	0,04	2,3
	0,8-0,9	1,75 BDad	0,06	3,3	1,72 ADad	0,10	5,8
	0,9-1,0	1,58 ADad	0,03	2,2	1,72 BDad	0,05	2,9

Médias seguidas pela mesma letra maiúscula, na linha, e médias seguidas pela mesma letra minúscula, na coluna, não diferem estatisticamente para os intervalos de $\pm\sigma$ e $\pm 2\sigma$, respectivamente.

AVN = área sob vegetação nativa. APC = área sob cultivo constante e irrigada por pivô central.

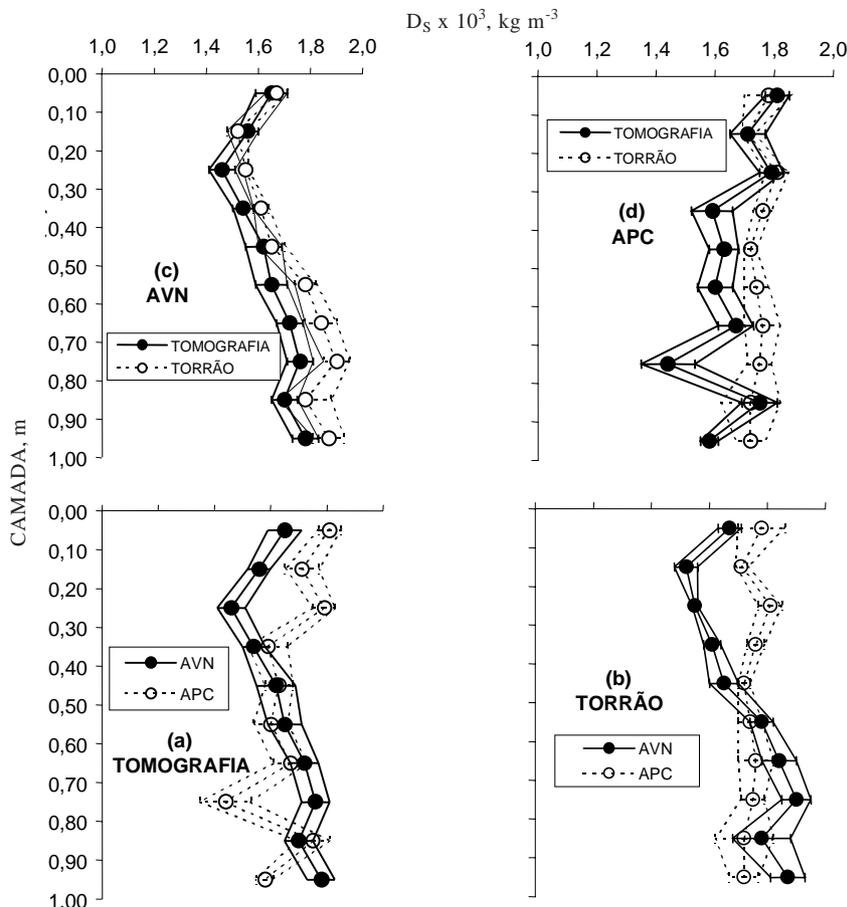


Figura 2. Valores médios de densidade do solo (D_s) com seus respectivos desvios (intervalo de $\pm\sigma$), determinados em camadas de 0,10 m, da superfície até 1 m de profundidade, considerando-se as duas áreas avaliadas, área sob vegetação nativa (AVN) e área sob cultivo constante e irrigada por pivô central (APC), segundo a aplicação do método da tomografia computadorizada e do torrão impermeável.

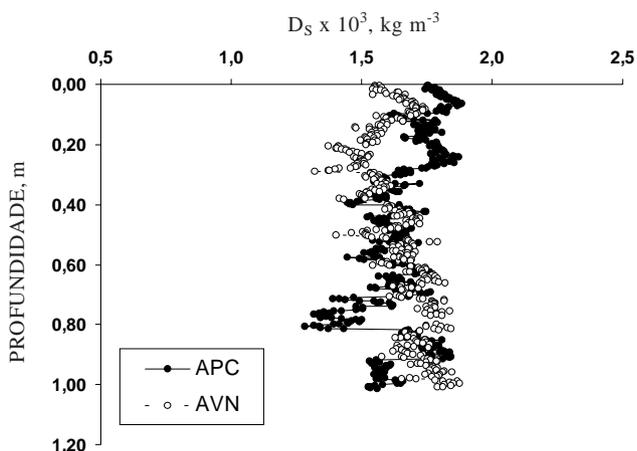


Figura 3. Valores médios de densidade do solo (D_s) determinados em camadas de 0,0025 m, da superfície até 1 m de profundidade, pela aplicação do método da tomografia computadorizada e para as duas áreas avaliadas, área sob vegetação nativa (AVN) e área sob cultivo constante e irrigada por pivô central (APC).

conseqüentemente, uma análise do comportamento da sua densidade em finas camadas, no caso de 0,0025 m, como apresentado na figura 3. Este comportamento reflete os efeitos de estrutura do solo, a partir das flutuações nos valores de D_s em regiões mais pontuais em comparação ao tamanho da amostra de solo considerado em qualquer método convencional.

CONCLUSÕES

1. Os métodos do torrão impermeabilizado e da tomografia computadorizada na determinação da densidade do solo apresentaram resultados razoavelmente concordantes, com maior sensibilidade e resolução espacial para o método da tomografia computadorizada, que permitiu maior detalhamento do comportamento da estrutura e da densidade do solo ao longo de seu perfil.

2. Em relação à área sob vegetação natural (AVN), a área cultivada e irrigada com pivô central

(APC) apresentou uma camada inicial do solo compactada, basicamente em torno de 0 a 0,3 m, graças à utilização de equipamentos agrícolas no seu preparo e cultivo.

3. O aumento da densidade do solo em profundidade, observado principalmente na área sob vegetação natural (AVN), decorre do adensamento existente nas camadas subsuperficiais em solos da região semi-árida nordestina.

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.
- BURGOS, N. & CAVALCANTI, A.C. Levantamento detalhado de solos da área de sequeiro do CPATSA. Petrolina, EMBRAPA-SNLCS-CPATSA, 1988. (Boletim de Pesquisa, 38)
- CAVALCANTI, A.C.; ARAÚJO FILHO, J.C. & PARAHYBA, R.B.V. Levantamento detalhado de solos e do potencial de uso das terras do SPSB. Petrolina, EMBRAPA-CNPS-ERP-NE, 1999. (Boletim técnico, no prelo)
- CRESTANA, S. A tomografia computadorizada como um novo método para estudo da física da água no solo. São Carlos, Universidade de São Paulo, 1985. 145p. (Tese de Doutorado)
- CRESTANA, S.; CRUVINEL, P.E.; VAZ, C.M.P.; CESARO, C.; MASCARENHAS, S. & REICHARDT, K. Calibração e uso de um tomógrafo computadorizado em ciência do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:161-167, 1992.
- CRESTANA, S. & VAZ, C.M.P. A instrumentação como uma ferramenta na pesquisa em conservação e manejo dos solos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., Rio de Janeiro, 1997. Anais. Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. CD-ROM
- CURI, N. Vocabulário da ciência do solo. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1993. 89p.
- DEMATTE, J.L.I. Characteristics of Brazilian soils related to root growth. In: SYMPOSIUM ON THE SOIL/ROOT SYSTEM IN RELATION TO BRAZILIAN AGRICULTURE, Londrina, 1980. Proceedings. Londrina, Fundação Instituto Agrônomico do Paraná, p.103-114.
- DIAS JUNIOR, M.S. Compactação do solo. In: TÓPICOS EM CIÊNCIA DO SOLO (TOPICS IN SOIL SCIENCE) Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p.55-94.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solo. Manual de métodos de análise de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solo. Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro, 1999. 412p.
- FERRAZ, E.S.B. & MANSSELL, R.S. Determining water content and bulk density of soil by gamma ray attenuation methods. Flórida, IFAS, 1979. 51p. (Technical Bulletin, 807)
- FONSECA, O.O.M. Caracterização e classificação de solos Latossólicos e Podzólicos desenvolvidos nos sedimentos do Terciário no litoral brasileiro. Rio de Janeiro, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 1986. 185p. (Tese de Mestrado)
- GOMES, T.C.A. Análise de trilha no estudo de fatores físicos e químicos relacionados ao adensamento e, ou, à compactação em dois solos do Norte de Minas Gerais. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1996. 105p. (Tese de Mestrado)
- GUPTA, S.C. & ALLMARRAS, R.R. Models to access the susceptibility of soil to excessive compaction. *Adv. Soil Sci.*, 6:65-100, 1987.
- GUPTA, S.C.; HADAS, A. & SCHAFER, R.L. Modeling soil mechanical behavior during compaction. In: LARSON, W.E.; BLAKE, G.E.; ALLMARRAS, R.R.; VOORHEES, W.B. & GUPTA, S.C., eds. Mechanics and related process in structured agricultural soils. The Netherlands, Kluwer Academic Publishers, 1989. p.137-152.
- JACOMINE, P.K.T. Fragipans em solos de "tabuleiros": características, gênese e implicações no uso agrícola. Recife, Universidade Federal de Pernambuco, 1974. 113p. (Tese de Livre Docência)
- LANDINA, M.M. & KLEVENSK, I.L. Effect of soil compaction and composition of soil air. *Sov. Soil Sci.*, 16:46-54, 1984.
- LEMOES, R.C. & SANTOS, R.D. Manual de descrição e coleta de solo no campo. 3 ed. Campinas, Sociedade Brasileira para o Progresso da Ciência, 1996. 83p.
- LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K.; NIELSEN, D.R.; JOSÉ, C. & BAZZA, M. An approximate method of estimating soil water diffusivity for different soil bulk densities. *Water Res. Res.*, 18:177-181, 1982.
- MALTONI, K.L. Estudo de compactação e/ou adensamento em superfície de Latossolos sob diferentes usos. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1994. 139p. (Tese de Doutorado)
- MONIZ, A.C. Evolução de conceitos no uso estudo da gênese de solos. *R. Bras. Ci. Solo*, 20:349-352, 1996.
- NAIME, J.M.; CONCIANI, W.; SOARES, M.M.; BERNADES FILHO, R.; CRUVINEL, P.E. & CRESTANA, S. Estudo de solos colapsíveis utilizando a tomografia computadorizada: Experimento de campo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., Rio de Janeiro, 1997. Anais. Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. CD-ROM
- OLIVEIRA, J.C.M.; VAZ, C.M.P. & REICHARDT, K. Efeito do cultivo contínuo da cana-de-açúcar em propriedades físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro. *Sci. Agric.*, 52:50-55, 1995.
- OLIVEIRA, T.S. Efeitos dos ciclos de umedecimento e secagem sobre propriedades físicas e químicas de quatro latossolos brasileiros. Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1994. 104p. (Tese de Mestrado)
- PETROVIC, A.M.; SIEBERT, J.E. & RIEKE, P.E. Soil bulk density analysis in three dimensions by computed tomography scanning. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 46:445-450, 1982.

- SILVA, A.J.N. & RIBEIRO, M.R. Caracterização de um Latossolo Amarelo sob cultivo contínuo de cana de açúcar no Estado de Alagoas: atributos morfológicos e físicos. *R. Bras. Ci. Solo*, 21:677-684, 1997.
- SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. & CAMARGO, O.A. Influência da compactação nas características físicas de dois Latossolos. *R. Bras. Ci. Solo*, 10:91-95, 1992.
- SILVA, M.S.L. Caracterização e gênese do adensamento subsuperficial em solos de tabuleiro do semi-árido do Nordeste do Brasil. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000. 126p. (Tese de Doutorado)
- SILVA, M.S.L. & RIBEIRO, M.R. Influência do cultivo contínuo da cana de açúcar em propriedades morfológicas e físicas de solos argilosos de tabuleiro no estado de Alagoas. *R. Bras. Ci. Solo*, 16:397-402, 1992.
- SPIEGEL, M.R. Estatística. 2.ed. São Paulo, MacGraw Hill, 1985. 454p.
- VAZ, C.M.P. Tomografia computadorizada aplicada a estudos de compactação de solos. Piracicaba, CENA-USP, 1989. 110p. (Tese de Mestrado)
- VAZ, C.M.P.; CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S.; CRUVINEL, P.E.; REICHARDT, K. & STOLF, R. Using a computed tomography miniscanner for studying tillage induced soil compaction. *Soil Technol.*, 2:313-321, 1989.
- VAZ, C.M.P.; CRESTANA, S. & REICHARDT, K. Tomografia computadorizada na avaliação da compactação de solos. *R. Bras. Ci. Solo*, 16:153-159, 1992.
- VAZ, C.M.P.; CRESTANA, S.; OLIVEIRA, J.C.M. & REICHARDT, K. Avaliação do adensamento de um solo cultivado com cana-de-açúcar usando a tomografia computadorizada. São Carlos, EMBRAPA-CNPDIA, 1996. 14p. (Boletim de Pesquisa, 3)
- VIDAL TORRADO, P.; LEPSCH, I.F.; CASTRO, S.S.; COOPER, M. Pedogênese em uma seqüência Latossolo-Podzólico na borda de um platô na Depressão Periférica paulista. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:909-921, 1999.
- WARKENTIN, B.P.; BARNES, K.K.; CARLETON, W.M.; TAYLOR, H.M.; THROCKMORTON, R.J. & VANDEN BERG, G.E. Effects of compaction on content and transmission of water in soils. In: *Compactions of agricultural soils*. ed. Madison, American Society Agriculture Engineering, 1971. p.126-153.