UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
CENTRO DE ENERGIA NUCLEAR NA AGRICULTURA

LUIZ FERNANDO PIRES

**Tomografia computadorizada, atenuação de raios gama e análise
micromorfológica na avaliação de alterações na estrutura e retenção de
água pelo solo**

Piracicaba

2006

**AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE
TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO,
PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Seção Técnica de Biblioteca - CENA/USP

Pires, Luiz Fernando

Tomografia computadorizada, atenuação de raios gama e
análise micromorfológica na avaliação de alterações na estrutura
e retenção de água pelo solo / Luiz Fernando Pires; orientador
Osny Oliveira Santos Bacchi. - - Piracicaba, 2006.

217p. : fig.

Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Ciências.
Área de Concentração: Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente) –
Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São
Paulo.

1. Amerício 2. Energia nuclear 3. Física nuclear 4. Porosidade do
solo 5. Radioisótopos 6. Umidade do solo I. Título

CDU 621.039.8:631.434

LUIZ FERNANDO PIRES

Físico

**Tomografia computadorizada, atenuação de raios gama e análise
micromorfológica na avaliação de alterações na estrutura e retenção de
água pelo solo**

Tese apresentada ao Centro de Energia Nuclear
na Agricultura da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de Concentração: Energia Nuclear na Agricultura e
no Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Osny Oliveira Santos Bacchi

Piracicaba

2006

DEDICO ESTE TRABALHO

Aos meus pais, Veríssimo e Leonor, pela sabedoria com a qual eles têm me guiado desde o meu nascimento, e aos meus irmãos, Carlos, Marcos, Ricardo e Marcia, pela amizade, amor, e constante incentivo durante as caminhadas da vida.

AGRADECIMENTOS

À Jesus Cristo o maior de todos os revolucionários.

À sua divina graça A. C. Bhaktivedanta Swami Prabhupada pelos ensinamentos através de seu próprio exemplo pessoal.

Ao Prof. Dr. Osny Oliveira Santos Bacchi pela orientação, amizade e colaboração durante a realização deste projeto de tese.

Ao Prof. Dr. Klaus Reichardt pela colaboração na confecção dos meus artigos científicos e discussões gerais sobre ciências.

Aos pesquisadores Dr. Luis Cerqueira Alves, Dr. Eduardo Alves e Filomena Baptista do Instituto Tecnológico e Nuclear de Portugal pelos auxílios na análise de PIXE.

Aos contribuintes do estado de São Paulo e de todo o Brasil por tornarem possível a realização de minha tese com bolsa de doutorado pela Fapesp (Processo no. 02/05066-5) e bolsa de estágio no exterior pela Capes (Processo no. BEX 1245/05-8).

Ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA/USP) pela oportunidade da realização deste trabalho de tese.

Ao Dudu e Ademir (equipe técnica do laboratório de Física dos Solos do CENA/USP) pela amizade e companheirismo.

À todos os revisores que analisaram os meus artigos e contribuíram valiosamente através de suas críticas para a minha formação acadêmica.

Ao pessoal da seção técnica da biblioteca, informática e secretaria da pós-graduação do CENA/USP.

À FAPESP, pelo suporte financeiro através de concessão de bolsa de estudo de doutorado.

Ao Centro Internacional de Física Teórica, em Trieste, Itália, pelo apoio financeiro para a realização de cursos importantes para a minha formação acadêmica.

À Nívea pelo seu sorriso, carinho e paciência ao longo desses últimos anos.

Ao Einstein e Marx pelos momentos de descontração.

Aos amigos e colegas, Adilson, Adriana, Alessandro, Alexandro, Célia, Cléber, Cristiane, Cristina, Débora, Edgar, Elektra, Fabiano, Fabio Cássaro, Felipe (Tico), Galo, Helen, Júlio (Papito), Lorival, Lu, Lúcio, Marcão, Marcelo, Renatão, Robinho, Sérgio Moraes, Valquíria, Vilsão, Vladia, Tânia Tominaga, Tatiele e Timm.

À todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

*“Pois quem quiser salvar a sua vida, perdê-la-á;
quem perder a vida por minha causa, esse a salvará.
Que aproveita ao homem ganhar o mundo inteiro,
se vier a perder-se, ou a causar dano a si mesmo?”*
(Lucas, 9: 24-25)

*“O homem deixa de SER e manifestar sua vida
na medida em que passa a TER e sua vida se
torna mais alienada”*
Karl Marx

*“O homem tornou-se um super-homem...Mas super-homem com poderes sobre
humanos que não atingiu o nível de razão super-humana. Na medida em que
aumentam seus poderes, ele se torna um homem cada vez mais pobre...Impõe-se
sacudir nossa consciência ao fato de que nos tornamos tanto mais desumanos
quanto mais nos convertemos em super-homens.”*

Albert Schweitzer

SUMÁRIO

RESUMO	xii
ABSTRACT	xv
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.2 CICLOS DE UMEDECIMENTO E SECAMENTO	4
1.3 ATENUAÇÃO DE RAIOS GAMA	7
1.4 TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA NA PESQUISA CIENTÍFICA	9
1.5 MICROMORFOLOGIA EM ESTUDOS AMBIENTAIS	10
2 OBJETIVOS	15
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
3.1 RELAÇÕES MASSA-ÁREA-VOLUME DO SOLO	16
3.1.1 DENSIDADE DE PARTÍCULAS (ρ_p)	17
3.1.2 DENSIDADE DO SOLO (ρ_s)	18
3.1.3 POROSIDADE DO SOLO (ϕ)	18
3.1.4 UMIDADE DO SOLO	20
3.1.4.1 UMIDADE À BASE DE MASSA (U)	20
3.1.4.2 UMIDADE À BASE DE VOLUME (θ)	21
3.2 ASPECTOS BÁSICOS DA INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA	22
3.2.1 DEFINIÇÃO	22
3.2.2 PROCESSOS DE INTERAÇÃO DA RADIAÇÃO COM A MATÉRIA	24
3.2.2.1 EFEITO FOTOELÉTRICO OU ABSORÇÃO FOTOELÉTRICA	24
3.2.2.2 EFEITO COMPTON	26
3.2.2.3 PRODUÇÃO DE PAR ELÉTRON-PÓSITRON	29
3.2.3 COEFICIENTE DE ATENUAÇÃO	31
3.2.4 ATENUAÇÃO DA RADIAÇÃO PELA MATÉRIA	34
3.2.5 VARIÂNCIA DOS COEFICIENTES DE ATENUAÇÃO: ÁGUA E SOLO	36
3.3 TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA	38
3.3.1 TOMÓGRAFOS USADOS EM PESQUISAS APLICADAS E MEDICINA	38

3.3.2 PRINCÍPIOS BÁSICOS DA TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA	41
3.3.3 BASES DO MÉTODO DA RETROPROJEÇÃO FILTRADA	44
3.3.4 CALIBRAÇÃO DO SISTEMA TOMOGRÁFICO	46
4 CURVA DE RETENÇÃO DA ÁGUA NO SOLO DETERMINADA PELA TÉCNICA DE ATENUAÇÃO DE RAIOS GAMA	
RESUMO	49
ABSTRACT	49
4.1 INTRODUÇÃO	50
4.2 TEORIAS	52
4.2.1 MÉTODO DE RICHARDS	52
4.2.2 ATENUAÇÃO DE RAIOS GAMA	54
4.2.3 ERRO ESTATÍSTICO PELO MÉTODO NUCLEAR	55
4.3 MATERIAL E MÉTODOS	56
4.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	60
4.5 CONCLUSÕES	68
5 DANOS ÀS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO CAUSADOS POR DIFERENTES MÉTODOS DE AMOSTRAGEM DETERMINADOS POR TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS GAMA	
RESUMO	69
ABSTRACT	69
5.1 INTRODUÇÃO	70
5.2 MATERIAL E MÉTODOS	72
5.2.1 SOLOS E AMOSTRAGEM	72
5.2.2 SISTEMA TOMOGRÁFICO	74
5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	77
5.4 CONCLUSÕES	84
6 ATENUAÇÃO DE RAIOS GAMA NA DETERMINAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA TEXTURA NA DEFORMAÇÃO DA ESTRUTURA DO SOLO	
RESUMO	85
ABSTRACT	86
6.1 INTRODUÇÃO	86
6.2 MATERIAL E MÉTODOS	88
6.2.1 AMOSTRAGEM DO SOLO	88

6.2.2 INSTRUMENTAÇÃO E ARRANJO EXPERIMENTAL	90
6.2.3 ANÁLISE DOS DADOS	91
6.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	92
6.4 CONCLUSÕES	97
7 APLICAÇÃO DA TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS GAMA NA ANÁLISE DA ESTRUTURA DE AMOSTRAS USADAS NA DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DO SOLO	
RESUMO	98
ABSTRACT	98
7.1 INTRODUÇÃO	99
7.2 MATERIAL E MÉTODOS	101
7.2.1 AMOSTRAGEM DO SOLO	101
7.2.2 TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA	101
7.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	104
7.4 CONCLUSÕES	108
8 MUDANÇAS NA ESTRUTURA DO SOLO DEVIDO A CICLOS DE UMEDECIMENTO E SECAMENTO AVALIADAS PELA TÉCNICA DE TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS GAMA	
RESUMO	109
ABSTRACT	110
8.1 INTRODUÇÃO	110
8.2 MATERIAL E MÉTODOS	112
8.2.1 SISTEMA TOMOGRÁFICO	112
8.2.2 PREPARAÇÃO DO SOLO	114
8.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	115
8.4 CONCLUSÕES	131
9 EFEITO DA AMOSTRAGEM E CICLOS DE UMEDECIMENTO E SECAMENTO NA ESTRUTURA DE AMOSTRAS DE SOLO INDEFORMADAS AVALIADAS PELA TÉCNICA DE ANÁLISE MICROMORFOLÓGICA	
RESUMO	133
ABSTRACT	134
9.1 INTRODUÇÃO	134

9.2 MATERIAL E MÉTODOS	138
9.2.1 AMOSTRAGEM DO SOLO E CICLOS DE UMEDECIMENTO E SECAMENTO (U-S)	138
9.2.2 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA ANÁLISE DE IMAGENS	139
9.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	142
9.3.1 INFLUÊNCIA DOS CICLOS DE UMEDECIMENTO E SECAMENTO NA ESTRUTURA DO SOLO	142
9.3.2 INFLUÊNCIA DA AMOSTRAGEM E CICLOS DE UMEDECIMENTO E SECAMENTO NA ESTRUTURA DO SOLO	154
9.4 CONCLUSÕES	166
10 VARIAÇÕES NA RETENÇÃO DE ÁGUA DEVIDO AOS CICLOS DE UMEDECIMENTO E SECAMENTO	
RESUMO	167
ABSTRACT	167
10.1 INTRODUÇÃO	168
10.2 MATERIAL E MÉTODOS	171
10.2.1 COLETA E PREPARO DAS AMOSTRAS DE SOLO	171
10.2.2 VARIAÇÕES NA RETENÇÃO DE ÁGUA E NOS VOLUMES DE MICRO E MACROPOROS	171
10.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	172
10.3.1 VARIAÇÃO NA ESTRUTURA E INSTABILIDADE NA RETENÇÃO DE ÁGUA	173
10.3.2 VARIAÇÃO DA MICRO E MACROPOROSIDADE COM OS CICLOS DE U-S	176
10.3.3 CURVAS DE RETENÇÃO	178
10.4 CONCLUSÕES	186
11. CONCLUSÃO GERAL	187
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	192
ANEXO	210

RESUMO

PIRES, L. F. **Tomografia computadorizada, atenuação de raios gama e análise micromorfológica na avaliação de alterações na estrutura e retenção de água pelo solo.** 2006. 217p. Tese (Doutorado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

A estrutura do solo está relacionada com o arranjo das partículas, agregados e poros que constituem este meio poroso. As influências estruturais do solo atuam em diversas escalas tanto macroscópicas como microscópicas. Mudanças estruturais em escala microscópica são importantes porque causam alterações no arranjo das partículas do solo e, conseqüentemente, mudanças na distribuição de poros. A qualidade das amostras de solo está diretamente relacionada a sua estrutura, a qual é extremamente importante devido à influência que exerce no desenvolvimento das raízes, fauna do solo, movimento e retenção de água e gases, etc. As alterações que ocorrem na estrutura do solo podem ser induzidas tanto por forças naturais quanto pela ação humana. Ciclos de umedecimento e secamento (U-S) causam grandes modificações na estrutura do solo, especialmente na distribuição do tamanho de poros, a qual reflete a distribuição espacial e temporal da umidade do solo. Conseqüentemente, estes processos podem afetar a retenção e o movimento de água e nutrientes no solo, tendo importantes conseqüências práticas em determinações de armazenamento e potencial mátrico da água no solo, amplamente usados em irrigação. O objetivo principal deste estudo foi aplicar as técnicas de tomografia computadorizada, atenuação de raios gama e análise micromorfológica como ferramentas na compreensão de como a estrutura do solo pode ser afetada por procedimentos de amostragem e ciclos de umedecimento e secamento. Foi feita uma análise crítica sobre o comportamento da estrutura do solo quando submetido a sucessivos ciclos de U-S e qual o impacto que possíveis alterações estruturais podem ocasionar na retenção de água pelo solo. Foram usadas amostras de três diferentes solos

coletadas em anéis volumétricos. Cada amostra foi submetida à aplicação de três e nove ciclos de U-S. As amostras controle não foram submetidas a nenhum ciclo de U-S. O tomógrafo usado é de primeira geração equipado com uma fonte radioativa de ^{241}Am e permitiu a obtenção de perfis de unidades tomográficas e imagens em 2-D das amostras de solo. O sistema de atenuação de raios gama é equipado com a mesma fonte radioativa do tomógrafo e possibilitou medidas de densidade e umidade do solo. A análise micromorfológica tornou possível quantificar a distribuição do formato, tamanho e arranjo dos poros dos solos. As análises realizadas através da técnica não invasiva de atenuação de raios gama permitiram determinar curvas de retenção usando um único umedecimento da amostra. Obteve-se também uma maior exatidão na definição do tempo de equilíbrio e redução do tempo requerido para obtenção da curva no intervalo de potencial mátrico de 0 a -100 kPa. As análises usando-se a técnica de tomografia computadorizada tornaram possível mostrar o impacto de diferentes procedimentos de amostragem na estrutura do solo, alterações ocorridas nesta estrutura oriundas dos ciclos de U-S e investigar a qualidade de amostras de solo usadas em medidas de densidade. A partir da análise das imagens tomográficas ficou evidenciado que procedimentos de amostragem causam compactações próximo às bordas em amostras coletadas com anéis volumétricos e que quanto menor a dimensão do anel, maior é a deformação sofrida pela amostra. Com relação aos ciclos de U-S, a tomografia tornou possível acompanhar as modificações na estrutura com a evolução dos ciclos e permitiu identificar aumentos na porosidade do solo e desenvolvimento de grandes macroporos. A análise micromorfológica permitiu uma investigação da estrutura do solo em escala micrométrica. Através desta técnica foi possível a realização de um exame minucioso das modificações no arranjo, formato e distribuição dos poros das amostras de solos submetidas aos ciclos de U-S e procedimentos de amostragem. Os resultados mostraram que a estrutura do solo sofre mudanças importantes tanto no formato como na distribuição de tamanho dos

poros, corroborando os resultados obtidos pela técnica tomográfica. Finalmente, foram realizadas ainda análises do impacto das mudanças na estrutura do solo na retenção de água. Os resultados permitiram mostrar que todos os solos apresentam variações na curva de retenção à medida que sofrem a aplicação de sucessivos ciclos de U-S. Esta informação é importante pelo fato de que os dados da curva são usados em simulações do transporte de água e produtos químicos ao longo do solo, em estimativas da quantidade de água a ser usada para irrigação e na predição de taxas de infiltração.

Palavras-chave: Densidade do solo. Curva de retenção. Técnicas nucleares. Física Nuclear aplicada.

ABSTRACT

PIRES, L. F. **Computed tomography, gamma-ray attenuation, and micromorphologic analysis to evaluate changes on soil structure and water retention.** 2006. 217p. Thesis (Doctoral) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

Soil structure is related to the arrangement of soil particles, aggregates, and pores, which makes part of this porous media. The influence of structure on soil physical phenomena ranges from macro to microscope scale. Structure changes in microscope scale are important because affect the soil particle arrangement and, consequently, the pores distribution. Soil sample quality is directly related to soil structure, which is one of the most important properties that influences root development, water and gas movement and retention, soil fauna, etc. Natural forces and human action are the main factors that affect soil structure. Wetting and drying (W-D) cycles cause strong modifications on soil structure, especially in the pore size distribution, which reflects the temporal and spatial distribution of soil water and, consequently, these processes can affect soil water and nutrient retention and movement; having important practical consequences when calculating soil water storages and matric potentials, widely used in irrigation management. The main objective of this work was to use computed tomography (CT), gamma-ray attenuation, and micromorphologic analysis techniques as tools to investigate how soil structure can be affected by soil sampling procedures and wetting and drying cycles. A critical analysis about the behavior of soil structure when submitted to W-D cycles and the impact of possible structure changes on water retention was made. Core samples were collected from profiles of three soils with volumetric rings. Each soil sample was submitted to the application of three and nine W-D cycles. For the soil samples called control, none W-D cycle was applied. The CT scanner used is a first-generation system with a fixed source-detector arrangement and translation/rotational

movements of the samples, equipped with a radioactive gamma-ray source of ^{241}Am . The CT system permitted to obtain 2-D soil sample images and tomographic unit profiles. The gamma-ray attenuation system is equipped with the same radioactive source of the tomograph and it was used to evaluate soil density and water content. The pore size distribution, arrangement, and size of pores were analyzed through the micromorphologic analysis technique. By the analyses carried out through the non-invasive gamma-ray attenuation technique it was possible to evaluate soil water retention curves using a unique wetting cycle. The results allow to conclude that the nuclear method presents some advantages in relation to the traditional method (Richards method), like the higher accuracy in the determination of time of equilibrium, and reduction in the time required for the retention curve determination at the matric potential range of 0 to -100 kPa. The analyses using the CT technique allowed to confirm that soil compaction near the volumetric ring wall occur and that the effects of sampling procedures on soil structure need to be taken into account. It was showed that the size of the volumetric rings is very important and that small ones cause strong modifications on soil structure. Regarding the wetting and drying cycles, on the one hand, the technique allowed following the modifications on soil structure induced by these cycles, on the other, it makes possible to identify increases in soil porosity and development of some large macropores with the cycles. The micromorphologic analysis allowed an investigation of soil structure in a micrometric scale. This technique was particularly valuable because it was possible to analyze the changes in soil particle arrangement, shape, and pore distribution of samples submitted to W-D cycles and different sampling procedures. The results showed that soil structure is a dynamic property, suffering important changes on shape and pore size distributions, confirming the results obtained by the CT technique. Finally, analyses of soil structure changes during water retention curve determinations were made. By the results it was possible to conclude that the soil water retention curve is affected by sequences of W-D

cycles. This sort of information is valuable because the water retention curve data are used in simulations of water and chemical products transport through the soil, and evaluations of soil water storages and matric potentials, widely used in irrigation management.

Keywords: Soil density. Soil water retention. Nuclear techniques. Applied Nuclear Physics.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações gerais

Quando uma determinada quantidade de água infiltra no solo, seu movimento está diretamente relacionado com a sua quantidade e energia neste meio poroso. Este movimento pode ser quantificado através de equações como, por exemplo, as de Darcy, Darcy-Buckingham e de Richards. A solução destas equações, dentre outros fatores, depende do conhecimento da curva de retenção, a qual é capaz de fornecer informações a respeito da energia ou potencial da água no solo.

Historicamente, em 1856, Darcy realizou um dos primeiros trabalhos sobre a infiltração de água em solos saturados. Buckingham, em 1907, introduzindo o conceito de potencial mátrico (ψ_m), para a situação em que o solo não se encontrava saturado, apresentou uma equação mais completa para o movimento da água no solo. Porém, foi Richards, em 1928, quem definiu pela primeira vez o conceito de potencial total, a soma dos potenciais mátrico (ψ_m) e gravitacional (ψ_g), tornando a equação de Darcy-Buckingham não restrita apenas à descrição de fluxos ou movimentos da água na direção horizontal e em solos não saturados.

É a curva de retenção que relaciona o potencial mátrico e a umidade volumétrica (θ) ou gravimétrica (U) do solo (RICHARDS, 1941; RICHARDS & FIREMAN, 1943; COILE, 1953; ELRICK & TANNER, 1955; REEVE et al., 1973). Quando a textura e arranjo poroso do solo não sofrem modificações, a curva de retenção torna-se uma característica física deste e possibilita estimar valores de ψ_m a partir do conhecimento de θ (REICHARDT & TIMM, 2004).

Uma boa determinação da curva de retenção é de suma importância, uma vez que essa característica física tem relação com o conteúdo de água no solo e também com a sua disponibilidade para as plantas. Além disso, ela é muito importante na determinação dos gradientes de potencial e também da condutividade hidráulica dos solos. A retenção da água no solo é diretamente influenciada pelo arranjo (estrutura) e distribuição do tamanho de partículas do solo (textura). Um problema que surge quando o solo está submetido a um determinado valor de pressão na câmara de Richards é que no processo de despressurização para pesagem da amostra, o ar sob pressão no interior do solo pode provocar a ruptura do arranjo poroso original (CHAHAL, 1963; CHAHAL & YOUNG, 1965; DE BACKER & KLUTE, 1967; MORAES, 1991). A modificação deste arranjo fará com que o próximo umedecimento da amostra não seja igual ao primeiro. Este fato pode comprometer a representatividade da curva de retenção obtida. Como pelo método de Richards uma mesma amostra de solo pode ser submetida a vários ciclos de umedecimento e secamento (U-S), durante o processo podem ocorrer modificações significativas na estrutura do solo (HUSSEIN & ADEY, 1998) e, conseqüentemente, podem surgir alterações na curva de retenção. Ou seja, a curva obtida experimentalmente não reflete a curva de retenção da água para o solo na sua condição original de estrutura.

O processo de umedecimento da amostra de solo é outro fator que pode influenciar na obtenção da curva de retenção. Conforme o umedecimento da amostra podem ser obtidas diferentes curvas e, portanto, distintas relações entre θ e ψ_m para a amostra. O processo de umedecimento também é importante pelo fato de que bolhas de ar quando aprisionadas podem provocar o rompimento de agregados do solo, quando este é rapidamente umedecido, provocando dessa forma modificações significativas em sua estrutura e, conseqüentemente, modificações na curva de retenção (KLUTE, 1986).

Um dos possíveis fenômenos que pode ser observado durante sucessivos ciclos de umedecimento e secamento consiste em alterações nos agregados que constituem o solo, uma vez que a agregação em solos agrícolas é um resultado de umedecimentos e secamentos sucessivos através de períodos com e sem a presença de chuvas. A ação destes ciclos ocasiona hidratação e desidratação do solo causando contato e retração das partículas de argila e agregados, afetando suas propriedades físicas. Porém, as modificações induzidas nos agregados do solo irão depender do tipo de solo. Alguns resultados obtidos em pesquisas científicas têm mostrado a formação de grandes agregados como resultado dos ciclos de U-S, porém isto está ligado principalmente ao conteúdo de argila, matéria orgânica e a história do solo investigado.

Apesar dos problemas descritos acima, na literatura não existem trabalhos que evidenciem as alterações que podem ocorrer na estrutura do solo devido aos vários ciclos de umedecimento e aplicação de pressão em amostras de solo coletadas em anéis volumétricos e usadas na obtenção da curva de retenção. Neste sentido, a utilização de técnicas que usam análise de imagens, tais como: micromorfologia e tomografia computadorizada podem possibilitar um estudo bastante detalhado de possíveis alterações na estrutura do solo durante ciclos de U-S e fornecer um “insight” sobre os efeitos destas modificações na retenção de água.

A técnica de micromorfologia está baseada na análise de imagem de blocos impregnados com resina ou lâminas delgadas preparadas a partir de amostras indeformadas de solo. Estes blocos e lâminas possibilitam uma caracterização da estrutura do solo pela quantificação da sua porosidade em todos os aspectos (forma do poro, distribuição do tamanho de poros, irregularidades, orientação, continuidade, etc.) (BOUMA et al., 1977; MURPHY et al., 1977a,b; PAGLIAI et al., 1983; PAGLIAI et al., 1998).

A técnica de transmissão de radiação gama monoenergética na ciência do solo data da metade do século passado e possibilita medidas não-destrutivas de propriedades físicas do solo, como a sua densidade e umidade (VOMOCIL, 1954; VAN BAVEL, 1959). Para as pesquisas em física de solos geralmente são utilizadas fontes de ^{137}Cs (661,6 keV) e ^{241}Am (59,54 keV) com feixes colimados de radiação (FERRAZ & MANSELL, 1979).

A tomografia computadorizada (TC) foi introduzida na ciência do solo para a medição da densidade, umidade e movimento de água (PETROVIC et al., 1982; HAINSWORTH & AYLMOORE, 1983; CRESTANA et al., 1985). Atualmente esta técnica tem sido amplamente aplicada para estudos que envolvem: quantificação de macroporos em 3-D (PERRET et al., 1999), avaliação da recuperação de solos degradados através da ação de minhocas (LANGMAACK et al., 2002), compactação e selamento superficial do solo (PIRES et al., 2003), distribuição da densidade do solo (BALOGUN & CRUVINEL, 2003), entre outros. Já a microtomografia computadorizada de raios X tem se mostrado uma ferramenta importante para esses tipos de pesquisas e também para estudos ligados à caracterização da estrutura do solo em uma escala micrométrica (MACEDO et al., 1998; MACEDO et al., 1999).

1.2 Ciclos de umedecimento e secamento

Tessier et al. (1990) mostraram que os ciclos de umedecimento e secamento apresentam efeitos marcantes na estrutura de solos argilosos. Para estes autores os ciclos de umedecimento causam modificações devido a um processo de expansão e aprisionamento de ar que são tão significativos quanto à ação mecânica do impacto de gotas de chuva e durante o processo de secamento as partículas e agregados sofrem re-orientação. As modificações oriundas do umedecimento não são reversíveis e conduzem a um desenvolvimento progressivo da estrutura através de seqüências de ciclos de U-S. O efeito dos umedecimentos

irá depender do tipo e da taxa de umedecimento bem como da composição química da solução com a qual está se dando o processo. As mudanças que irão ocorrer estarão expressas como modificações na macroestrutura evidenciadas por mudanças no tamanho e forma dos agregados, ou mudanças na microestrutura (HUSSEIN & ADEY, 1995).

Pardini et al. (1996) avaliaram as possíveis alterações causadas pelos ciclos de U-S na estrutura e porosidade de solos argilosos susceptíveis a erosão. Observaram que estes ciclos não ocasionaram modificações significativas de rugosidade na superfície e densidade dos solos usados nos experimentos, embora tenham encontrado alterações na estrutura. Com relação à porosidade ficou evidenciado um pequeno aumento em relação ao material não submetido a nenhum ciclo de U-S, no entanto, os autores observaram uma grande variação com relação à distribuição do tamanho e número de poros.

Hussein e Adey (1998) estudaram o efeito dos ciclos de U-S na microestrutura de um vertissolo do Zimbábue. Os resultados mostraram que após os ciclos a estrutura do solo mudou de massiva (menos estruturada), no solo usado em práticas agrícolas, para estruturas planas, em forma de blocos e complexamente fracionadas. As unidades estruturais que se apresentavam inicialmente grosseiras diminuíram para finas e ultrafinas enquanto que os pedes mudaram de fracamente para fortemente desenvolvidos. Com relação aos vazios, os vazios planares dominaram durante os primeiros ciclos de secamento, porém vazios compostos tornaram-se mais presentes à medida que os ciclos aumentavam. Quanto à fábrica do solo foi observado que, geralmente, a orientação da argila diminuiu durante o processo de secamento e também com os sucessivos ciclos de U-S. Lundquist et al. (1999) investigaram o possível aumento da quantidade de carbono orgânico dissolvido devido aos ciclos de U-S, em dois solos agrícolas da Califórnia, e observaram modificações na decomposição da matéria orgânica e uma maior respiração nos solos expostos aos ciclos de U-S.

Denef et al. (2001a) analisaram o efeito dos ciclos de U-S na estabilidade de agregados e dinâmica da matéria orgânica no solo. Os autores mostraram que o primeiro evento de U-S reduziu a quantidade de macroagregados maiores e que após dois ciclos os macroagregados tornaram-se estáveis e resistentes à desintegração. Em um outro artigo Denef et al. (2001b) avaliaram a influência dos ciclos de U-S na inter-relação entre formação de macroagregado e degradação, formação de microagregado dentro de macroagregados, e dinâmica de carbono associada aos agregados. Neste trabalho os ciclos de U-S foram usados para simular um dos efeitos de ruptura dos agregados do solo induzidos pelas práticas de cultivo. Os autores encontraram que os ciclos inibem a estabilização do carbono dentro dos macroagregados devido a um aumento da modificação dos macroagregados, o qual inibe a formação de novos microagregados dentro dos macroagregados e a proteção da matéria orgânica presente nestes microagregados. Após dois ciclos de U-S foi observado que os macroagregados tornam-se resistentes à desintegração.

Li et al. (2004) investigaram, através de análise de imagens em 2-D, o efeito dos ciclos de U-S em solos ricos em argila. Os experimentos mostraram que o processo de agregação produz partículas grandes e irregularmente distribuídas, as quais em estágios posteriores de desenvolvimento são separadas por rachaduras. Nestes materiais as rachaduras representam geralmente um estágio posterior no desenvolvimento do espaço poroso. Os autores mostraram que tanto em experimentos de campo quanto de laboratório o processo de agregação é maior em profundidade. Quando os maiores agregados são dominantes, com exceção para o vertissolo, ocorre à formação de rachaduras. Rachaduras pequenas e pouco profundas são vistas na superfície dos solos após os ciclos de U-S. As causas para a agregação e formação das rachaduras apontadas pelos autores parecem ser a força gravitacional e a expansão durante o umedecimento do solo. Foi mostrado que quando os agregados úmidos maiores encolhiam

durante o secamento, a tendência era produzir rachaduras as quais causavam estresse de uma maneira anisotrópica, formando rachaduras lineares.

1.3 Atenuação de raios gama

A técnica de atenuação de radiação gama monoenergética para a determinação de densidade e ou umidade de solo não é recente. Pelo contrário, é uma técnica já bastante explorada e devido ao caráter não destrutivo da análise, apresenta vantagens em relação aos métodos tradicionalmente utilizados. A técnica de atenuação de radiação gama para a determinação da densidade do solo foi pioneiramente usada por Vomocil, em 1954. Em 1957, com a evolução técnica, Van Bavel, Underwood e Ragar utilizaram uma fonte de ^{137}Cs e detector de cintilação de Iodeto de Sódio (NaI). Em 1959, Van Bavel, utilizando uma fonte de ^{137}Cs , analisou aspectos relacionados à técnica, tais como: a relação da taxa de contagem com a distância entre a fonte e o detector e o efeito da densidade do material nas taxas de contagem.

Feixes colimados de radiação gama foram primeiramente utilizados em investigações de laboratório por Gurr e Ferguson e Gardner entre 1960 a 1962. A fonte escolhida para estas investigações foi o ^{137}Cs devido à relativamente alta energia primária dos fótons (661,6 keV) e à longa meia-vida do isótopo. Para a colimação do feixe foram usados colimadores de chumbo. Uma alternativa ao uso das fontes radioativas de ^{137}Cs foi à proposta do emprego de uma fonte de ^{241}Am . A escolha deste radioisótopo ocorreu em virtude da energia dos fótons emitidos por ela, serem aproximadamente dez vezes menos energéticos do que àqueles emitidos pelo ^{137}Cs , apresentando a possibilidade de uma maior sensibilidade para detectar variações na umidade do solo. Outras vantagens adicionais seriam a longa meia vida e a necessidade de uma menor blindagem de chumbo oferecendo maior segurança ao

pesquisador. O primeiro trabalho usando fonte radioativa de ^{241}Am foi proposto por Miller, em 1955, para medir concentrações de urânio e plutônio em soluções aquosas. Em 1967, King propôs a utilização do ^{241}Am como fonte de radiação gama para uso nestas determinações. Neste trabalho, a utilização do Amerício-241 mostrou-se vantajosa para as medidas pretendidas devido ao aumento da sensibilidade do método. Destacam-se também os trabalhos de De Swart e Groenevelt (1971) utilizando o ^{241}Am no estudo do conteúdo de água no solo e o trabalho de Olesen (1973) medindo o conteúdo de água em solos que sofrem mudanças de densidade nos processos de umedecimento e secamento (solos expansivos). No Brasil, os trabalhos pioneiros utilizando-se a técnica de atenuação da radiação gama na obtenção da densidade e umidade do solo foram realizados por Reichardt (1965) e Ferraz e Mansell (1979).

Comumente, para a determinação da umidade e densidade do solo são utilizadas fontes de ^{137}Cs (661,6 keV) ou ^{241}Am (59,54 keV) (VAN BAVEL, 1959; COPPOLA & REINIGER, 1974; FERRAZ & MANSELL, 1979; OLIVEIRA et al., 1998; VAZ et al., 1999). A escolha do tipo de fonte advém de vários fatores a serem considerados. Primeiro, o espectro de radiação deve mostrar uma boa distinção do pico de energia primária na região livre de interferência. Isto é exigido porque o detector de NaI(Tl), comumente usado neste tipo de medição, tem alta eficiência porém limitada resolução. Outro fator a ser considerado é que a meia-vida do radioisótopo deve ser maior do que a duração do experimento programado, minimizando-se ou eliminando-se as correções de intensidade devido ao decaimento do radioisótopo utilizado. Outro fator a ser considerado é a otimização da geometria, colimação e discriminação eletrônica, para que desta forma um grande número de fótons atinja o detector minimizando-se assim o desvio associado à característica randômica de emissão da fonte.

Uma outra aplicação possível da técnica de atenuação de raios gama foi sua utilização como método auxiliar para a obtenção da curva de retenção da água no solo (BACCHI et al.,

1998; PIRES et al., 2005a). Como este método permite a obtenção da curva sem a necessidade de re-saturação da amostra, é possível utilizá-lo em um estudo comparativo das curvas obtidas sem e com a abertura da câmara de pressão, podendo assim testar as possíveis modificações nas curvas devido ao processo de umedecimentos e secamentos consecutivos da amostra.

1.4 Tomografia computadorizada na pesquisa científica

Godfrey N. Hounsfield foi quem primeiro desenvolveu um tomógrafo computadorizado em 1971 e desde então muitos tipos de tomógrafos têm sido usados em medicina nuclear, estudos biomédicos e outras áreas de conhecimento. Os tomógrafos de raios-X são os que estão recebendo os maiores avanços nos últimos anos. Ainda existem outras técnicas que tem recebido interesse tal como a tomografia por emissão de pósitron na área médica e tomografia de nêutrons na pesquisa aplicada.

A tomografia computadorizada de raios-X ou gama (TC) trata-se de uma técnica não destrutiva utilizada para investigar diferentes fenômenos. Coles et al. (1998) desenvolveram um microtomógrafo de raios-X utilizando radiação sincrotron para obter imagens de poros usados no transporte de fluidos. Stenstrom et al. (1998) aplicaram TC para investigar mudanças morfológicas em pequenos animais. Braz et al. (2000) analisaram a anatomia dental e alguns materiais restaurativos através da microtomografia de raios-X. Schroer (2001) combinou microanálise por fluorescência com técnicas tomográficas para obter mapas de distribuição de elementos químicos.

Na ciência do solo os pioneiros na utilização da TC foram Petrovic et al. (1982), Hainsworth e Aylmore (1983) e Crestana et al. (1985), que usaram a TC na medida da

densidade do solo, distribuição espacial do conteúdo de água e retenção e movimento da água no solo.

Na área de Engenharia Ambiental recentemente Macedo et al. (1999) desenvolveram um tomógrafo de resolução micrométrica para estudarem a distribuição de grãos, possibilitando investigar o selamento superficial do solo e surgimento de fraturas. Brandsma et al. (1999) aplicaram a técnica de TC para determinarem a macroporosidade do solo através de mapeamento químico. Fante Júnior et al. (2002) avaliaram a ocorrência de compactação do solo causada por diferentes práticas de manejo.

Os primeiros resultados da TC aplicada a estudos na ciência do solo foram obtidos com tomógrafos médicos, no entanto, o preço de tais instrumentos tornava proibitiva a pesquisa aplicada utilizando essa técnica. Cesareo e Giannini (1980) demonstraram ser possível construir tomógrafos mais simples (primeira geração) e, portanto, mais baratos e, que conseqüentemente, podiam ser usados em pesquisas em outras áreas de conhecimento além da medicina. Exemplos do uso destes tomógrafos de primeira geração em pesquisas ambientais têm sido os trabalhos desenvolvidos no CENA/USP (Piracicaba, SP), EMBRAPA/CNPDI (São Carlos, SP) e mais recentemente pelo grupo de física de solos da UFPel (Pelotas, RS).

Entre as aplicações na ciência do solo destacam-se: estudos de compactação, penetração de raízes, encrostamento, ciclos de umedecimento e secamento, deslocamento miscível e imiscível de nutrientes na presença de raízes e fluxo preferencial de poluentes em solos expansivos.

1.5 Micromorfologia em estudos ambientais

Os estudos envolvendo análises micromorfológicas têm sido realizados desde da década de quarenta do século passado (KUBIENA, 1938). Trabalhos pioneiros usando análise

de imagens para quantificar e caracterizar a porosidade de amostras de solos impregnadas foram realizados por Jongerius et al. (1972) e Murphy et al. (1977a,b). Bouma et al. (1977) introduziram o uso desta técnica no estudo da continuidade dos poros. Bullock e Thomasson (1979) fizeram comparações de medidas de macroporosidade, derivadas da análise de imagens, com àquelas oriundas da retenção de água, método comumente utilizado na determinação da distribuição do tamanho de poros. No Brasil os trabalhos pioneiros foram realizados na década de setenta do século passado em estudos: i) a respeito de cutans (revestimento de argilas) feito por Falci e Mendes (1973); ii) com relação às técnicas de impregnação de amostras de solo (MENDES et al., 1973); iii) investigando a gênese de solos do município de Piracicaba, SP (PERECIN & CAMPOS, 1976); iv) avaliando a gênese de pequenos agregados arredondados constituídos de material fino de um solo de Minas Gerais (MOURA FILHO & BUOL, 1976); e v) usando micromorfologia como técnica auxiliar para interpretações pedogênicas realizado por Dematté et al. (1977). Descrição detalhada sobre alguns conceitos básicos da análise micromorfológica pode ser encontrada na *seção anexos*.

A análise micromorfológica pode ser usada como ferramenta na verificação de inúmeros fenômenos ocorrendo em amostras de solo. Os blocos impregnados e as lâminas delgadas podem ser utilizados para avaliar e compreender inúmeros processos naturais ou artificiais como, por exemplo, àqueles induzidos pela ação do homem. Atualmente, existem estudos usando a micromorfologia na avaliação de mudanças na estrutura do solo devido ao cultivo agrícola, ao tráfego de implementos agrícolas, na identificação de incremento do selamento superficial na camada superficial do solo após aplicação de lodo de esgoto, entre outros (CASTRO et al., 2003).

Um estudo interessante do selamento superficial do solo usando-se lâminas delgadas foi realizado por Slattery e Bryan, em 1994, ao investigarem possíveis efeitos do impacto das gotas de chuva na superfície do solo. Os autores puderam identificar neste trabalho a

espessura e o tipo de estrutura da camada selada, concluindo que o selamento formava-se por deposição de partículas finas após o evento de chuva ter cessado e não pela ação direta do impacto das gotas de chuva.

Com relação ao efeito do tráfego de implementos agrícolas no solo, Marsili et al. (1998), observaram através de lâminas delgadas que a passagem da roda de trator causava compactação do solo, principalmente, nas camadas superficiais. As áreas compactadas apresentavam uma estrutura fortemente massiva ao passo que em áreas que não sofreram tráfego, a estrutura apresentava blocos angulares e subangulares. Para a camada superficial os poros finos alongados encontravam-se orientados no sentido paralelo ao topo do solo, de modo que formavam estruturas em placa, típicas de solos compactados. Os autores ainda observaram que os poros alongados não possuíam uma continuidade vertical, resultando em uma diminuição da infiltração de água pelo solo e, conseqüentemente, podendo ocasionar erosão dependendo da declividade do terreno.

Kribaa et al. (2001) encontraram diferenças quantitativas e qualitativas na macroporosidade entre os sistemas de escarificação e aração nas análises de lâminas delgadas. Os discos do implemento usado na aração produziram agregados compactos, enquanto que a escarificação gerou agregados grumosos, levando a um conjunto de solos soltos, com poros de diâmetros equivalentes, maiores do que 1 mm. Observaram ainda uma estreita relação entre a estrutura do solo, criada pelas diferentes operações de cultivo, e a condutividade hidráulica.

VanderBygaart et al. (1999) trabalhando com lâminas delgadas mostraram o impacto das práticas de manejo na qualidade de solos com textura siltosa. Neste estudo compararam as práticas de preparo convencional do solo, envolvendo duas arações e uma gradagem, e o sistema de plantio direto, sem preparo algum do solo, sendo que o segundo substituiu o primeiro. Encontraram diferenças significativas no aumento de poros de formato irregular, com diâmetros equivalentes de 300 a 1000 μm , à medida que o tempo de plantio direto era

maior. Um incremento significativo de poros arredondados de diâmetros equivalentes de 100 a 500 µm também foi observado, à medida que aumentava o tempo de repouso do solo. Os autores afirmaram que as raízes das culturas de milho e de trigo são, provavelmente, as formadoras desses tipos de poros, facilitando a emergência das plântulas e o seu desenvolvimento, principalmente após os primeiros quatro anos do plantio direto. A maior interconectividade dos poros foi considerada pelos autores como um indício evidente de uma estrutura mais favorável à aeração, à capacidade de retenção de água e à drenagem; melhorando a qualidade do solo para a germinação das sementes e o desenvolvimento das plântulas. A ausência do cultivo permitiu que os agregados do solo se estabilizassem, devido ao fato do mesmo não ter sido preparado e por não ter ocorrido a desruptura promovida pela aração e pelos processos de congelamento e descongelamento (LEHRSCHE, 1998).

Pagliai e Vignozzi (1998) estudaram o efeito da utilização de adubo animal nas propriedades físicas do solo usando como ferramenta a análise micromorfológica. Os autores chegaram à conclusão que a aplicação de adubo de origem animal melhora algumas propriedades físicas do solo, tais como: porosidade, estrutura, retenção e movimento de água. Particularmente a adição do adubo aumenta a porcentagem dos poros responsáveis pelo armazenamento e transmissão de água usada pelas plantas e microorganismos presentes no solo, permitindo uma melhora no movimento de água e crescimento das raízes. Um outro resultado positivo observado foi uma melhora na estabilidade de agregados e redução na formação de possíveis selamentos superficiais. Em um outro trabalho, Pagliai et al. (2003) mostraram o efeito do tráfego de implementos agrícolas no solo, demonstrando que após tráfego intenso ocorreu compactação no subsolo, causando redução da porosidade para valores inadequados para o movimento de água e crescimento de raízes. Através da análise micromorfológica foi observada uma redução dos poros alongados e de transmissão. Com relação às práticas de manejo, Pagliai et al. (1998) mostraram, usando lâminas delgadas, que

diferentes processos de preparo do solo podem apresentar modificações distintas das propriedades físicas do solo. A prática de manejo que apresentou os maiores impactos nas propriedades físicas do solo foi a convencional, onde foi observado a formação de camadas seladas na camada superficial, com consequente diminuição da porosidade.

Schaefer et al. (2001) verificaram, no Brasil, que nos solos onde o preparo foi feito com grade pesada + arado de disco e somente grade pesada, houve a formação de poros planares próximos à superfície do solo, concentrados nos primeiros centímetros. De acordo com os autores, a existência de poros fissurais indica adensamento do solo, fenômeno este que está associado ao encrostamento ou selamento superficial. Nos tratamentos com grade pesada percebeu-se um indício de adensamento do solo na subsuperfície. Este adensamento caracterizou-se por um empacotamento do solo em torrões, formando zonas compactadas, separadas umas das outras, com poucos poros interligados. Eles consideraram que devido à compactação e ao selamento superficial do solo, as taxas de infiltração e a retenção de água poderiam tornar-se baixas.

2 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo principal a avaliação de possíveis danos à estrutura do solo quando amostrado em anéis volumétricos e o comportamento desta estrutura, depois da amostra coletada, na retenção de água após sucessivos ciclos de umedecimento e secamento.

Os objetivos secundários são:

- 1) Investigar o potencial da técnica de tomografia computadorizada na detecção de possíveis danos à estrutura do solo oriundos de diferentes métodos de amostragem;
- 2) Determinar através do método de atenuação de raios gama os possíveis impactos que solos de diferentes texturas podem sofrer na estrutura durante a amostragem;
- 3) Utilizar a análise de imagens tomográficas bidimensionais (2-D) na avaliação de possíveis modificações na estrutura de solos de diferentes texturas quando submetidos a sucessivos ciclos de umedecimento e secamento;
- 4) Analisar a qualidade das amostras de solo usadas em medidas de densidade do solo a partir de imagens tomográficas bidimensionais.
- 5) Investigar as possíveis variações no formato, tamanho e distribuição dos poros de solos de diferentes texturas submetidos aos sucessivos ciclos de umedecimento e secamento através da técnica de análise micromorfológica.
- 6) Avaliar o impacto dos sucessivos ciclos de umedecimento e secamento na retenção de água pelo solo;

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Relações massa-área-volume do solo

Para uma melhor descrição das frações sólida, líquida e gasosa do solo é necessária a utilização de algumas relações massa-área-volume. A figura 1 mostra um volume qualquer de solo dividido em três fases. Os índices s , ag e ar se referem à parte sólida do solo e a parte preenchida pela água e ar, respectivamente.

Figura 1. Diagrama esquemático do solo como um sistema trifásico, em que V representa o volume total obtido pela soma dos volumes de ar (V_{ar}), de água (V_{ag}), de sólidos (V_s), m a massa total obtida pela soma das massas de ar (m_{ar}), de água (m_{ag}) e de sólidos do solo (m_s).

Pelo diagrama é possível observar que o volume total do solo (V) é definido como sendo igual a soma do volume dos sólidos do solo (V_s), do volume de água (V_{ag}) e do volume do ar (V_{ar}) existentes neste meio poroso (Figura 1).

$$V = V_s + V_{ag} + V_{ar} \quad (1)$$

A soma dos volumes de água e ar contidos no solo é chamada de volume de poros (V_p). Para solos de estrutura rígida, V_p é considerado constante, e quando V_{ag} aumenta (ou diminui), V_{ar} diminui (ou aumenta) na mesma proporção.

A massa total do solo (m) é definida como a soma da massa dos sólidos (m_s), da massa de água (m_{ag}) e da massa de ar (m_{ar}).

$$m = m_s + m_{ag} + m_{ar} \quad (2)$$

Porém, como as massas de sólido e água são muito maiores em um meio poroso do que a massa de ar, esta se torna desprezível em relação às outras duas, portanto:

$$m \cong m_s + m_{ag} \quad (3)$$

3.1.1 Densidade de Partículas (ρ_p)

A densidade de partículas de uma amostra de solo é definida como a razão entre a massa total e o volume total dos sólidos contidos na amostra.

$$\rho_p = \frac{m_s}{V_s} \rightarrow (\text{kg.m}^{-3}) \quad (4)$$

onde m_s representa a massa seca entre 378 K e 383 K.

Minerais como quartzo, feldspatos e silicatos coloidais constituem a maior parte das partículas minerais do solo, porém outros minerais ainda podem ser encontrados em quantidades menores como é o caso da magnetita, goetita e hematita. A densidade dos minerais do solo varia entre 1900 kg.m⁻³ (opala) e 5300 kg.m⁻³ (hematita, monazita). Um solo mineral médio possui densidade próxima de 2650 kg.m⁻³, sendo que este valor aumenta quando o solo contém alta porcentagem de minerais e diminui com o aumento no teor de matéria orgânica. A matéria orgânica é constituída de resíduos de animais e vegetais, além de organismos vivos. Para solos com uma grande quantidade de matéria orgânica, ρ_p varia de 1300 kg.m⁻³ a 1500 kg.m⁻³. Isso explica o fato de horizontes superficiais geralmente apresentarem menores valores de ρ_p em comparação aos horizontes mais profundos. Quando

esta porcentagem de matéria orgânica excede aos 20 %, diz-se que esse solo é orgânico ao invés de mineral.

3.1.2 Densidade do solo (ρ_s)

A densidade do solo é um índice que representa o grau de compactação deste meio poroso, pois considera o espaço poroso entre as partículas. É calculada pela razão entre a massa dos sólidos do solo e seu volume total.

$$\rho_s = \frac{m_s}{V} \rightarrow (\text{kg.m}^{-3}) \quad (5)$$

A densidade do solo pode ser facilmente determinada em laboratório através de amostras indeformadas utilizando os métodos do anel volumétrico ou torrão parafinado.

3.1.3 Porosidade do solo (ϕ)

A porosidade do solo representa uma medida do espaço poroso, ou seja, um índice que quantifica a fração do volume do solo ocupada pelos poros.

$$\phi = \frac{V_p}{V} = \frac{V_{ag} + V_{ar}}{V} = \frac{V - V_s}{V} \rightarrow (\text{m}^3.\text{m}^{-3}) \quad (6)$$

Com a definição de densidade de partículas e do solo, é possível se obter uma outra expressão também muito utilizada para o cálculo da porosidade do solo.

$$\phi = \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_p} \right) \quad (7)$$

Através da equação 7 verifica-se que quanto maior a densidade do solo menor é sua porosidade, ou seja, densidade e porosidade do solo estão inversamente relacionadas.

A porosidade do solo constitui uma propriedade importante do solo, uma vez que tanto a água como o ar, contidos no solo, são armazenados e transportados dentro e através de seus espaços porosos. Diferentes solos apresentam diferentes valores de porosidade e diferem bastante entre si.

Um outro fator que também influencia no armazenamento, disponibilidade e transporte da água e ar no solo é a forma, arranjo e o tamanho dos poros, que apresentam formas complexas devido ao fato das partículas que constituem o solo não serem regulares. Os poros do solo diferem em tamanho, arranjo e forma, e podem ser classificados com base em seu diâmetro como mostra a tabela 1. Essa classificação em diâmetro ocorre porque na física do solo define-se tamanho do poro como sendo o diâmetro da maior esfera inscrita no interior do espaço ocupado pelo poro.

Tabela 1 – Classificação dos poros do solo com base no diâmetro (KOOREVAAR et al., 1983).

CLASSES DE POROS	d (µm)
Macroporos	>100
Mesoporos	30-100
Microporos	<30

Os macroporos constituem os poros que possuem como função realizar a aeração da matriz do solo e a condução da água durante os processos de infiltração. Esses poros são importantes porque após a ocorrência de fortes chuvas ou inundações, são eles que devem drenar o excesso de água. Após a drenagem da água os mesoporos passam a ganhar importância porque atuam na condução da água durante o processo de redistribuição, não sendo possível, no entanto se fazer uma diferenciação nítida nessa passagem. Após a redistribuição da água no solo esta passa a se mover muito lentamente devido à ação dos microporos, também chamados de poros capilares, que irão atuar no armazenamento de água.

Esses poros são extremamente importantes devido ao fato de que parte da água armazenada em seu interior é que garantirá a sobrevivência de muitas plantas.

3.1.4 Umidade do solo

A umidade do solo é um índice que fornece a quantidade de água contida em uma dada amostra de solo, sendo expressa de duas maneiras: umidade à base de massa e à base de volume.

3.1.4.1 Umidade à base de massa (U)

É representada pela razão entre a massa de água e a massa dos sólidos da amostra de solo.

$$U = \frac{m_{ag}}{m_s} = \frac{m - m_s}{m_s} \rightarrow (\text{kg.kg}^{-1}) \quad (8)$$

A umidade gravimétrica é relativamente fácil de ser medida, uma vez que envolve somente medidas de massa e a estrutura do solo pode ser destruída. Portanto, qualquer instrumento pode ser utilizado para a coleta da amostra no campo, geralmente sendo usados amostradores que permitem coletas a várias profundidades. Depois da amostra ser coletada deve-se tomar cuidado para que esta não perca muita água por evaporação. Para evitar tais perdas comumente as amostras devem ser colocadas em latas de alumínio com tampas e vedadas com fita adesiva e para garantir um bom isolamento do ambiente, ainda pode-se colocar todo o conjunto dentro de um saco plástico.

3.1.4.2 Umidade à base de volume (θ)

É representada pela razão entre o volume de água contido na amostra de solo e seu volume total.

$$\theta = \frac{V_{ag}}{V} \rightarrow (m^3.m^{-3}) \quad (9)$$

É possível ainda se utilizar uma outra equação para se determinar a umidade a base de volume.

$$\theta = \frac{m - m_s}{\rho_{ag}.V} \rightarrow (m^3.m^{-3}) \quad (10)$$

A divisão da equação 9 pela 8 permite a obtenção do valor da umidade volumétrica do solo a partir da sua umidade gravimétrica.

$$\theta = \frac{\rho_s}{\rho_{ag}}.U \quad (11)$$

A razão entre as densidades na equação 11 é chamada de densidade relativa do solo (ρ_r). Quando a densidade da água é considerada igual a 1000 kg.m^{-3} a equação (11) se reduz a $\theta = \rho_s.U$, e para se obter a umidade volumétrica a partir da gravimétrica, basta apenas multiplicar o valor de U pelo valor de ρ_s .

O método que é mais utilizado para a medida da umidade a base de volume é o do anel volumétrico. Este método de coleta é mais trabalhoso pelo fato de necessitar de amostras indeformadas. Portanto, para a realização da amostragem é necessário usar geralmente cilindros com bordas cortantes que possam ser cuidadosamente introduzidos no solo. No caso de amostras a serem coletadas em profundidade é necessário a abertura de uma trincheira e os cilindros são inseridos perpendicularmente as paredes da trincheira.

3.2 Aspectos básicos da interação da radiação com a matéria

3.2.1 Definição

A radiação gama e os raios-X são ondas eletromagnéticas que possuem a mesma natureza da luz visível. A radiação gama tem origem quando núcleos instáveis (radioativos) sofrem decaimento através de emissões de partículas alfa ou beta. Nestes processos, como os decaimentos nem sempre são puros, os núcleos radioativos acabam decaindo, após a emissão de uma partícula radioativa, para estados metaestáveis ocasionando assim a emissão de fótons gama até que o núcleo atinja a estabilidade. Os raios-X são produzidos quando elétrons são acelerados em direção a átomos de um dado material (alvo). A interação dos elétrons com os átomos do alvo permitem a obtenção de raios-X através de dois diferentes processos de interação.

Na primeira interação os elétrons podem colidir com os elétrons próximos ao núcleo atômico dos átomos alvo com uma energia suficiente para arrancar esses elétrons. Quando esses elétrons são arrancados do átomo, produzindo ionização, os elétrons das camadas mais externas decaem ao nível ionizado emitindo nesse processo radiação X característica do átomo envolvido na interação, já que este é um processo que está relacionado à estrutura quântica das bandas de energia dos átomos alvo. A segunda interação envolve o freamento dos elétrons ao passarem próximos do núcleo atômico dos átomos. Nesse caso o campo elétrico gerado por esses átomos irá modificar a trajetória dos elétrons rápidos e de acordo com a física quântica, o decréscimo ΔE (J) de energia de movimento dos elétrons é convertida em fótons com frequência ν (Hz) dada pela relação de Planck, $\Delta E = h\nu$, em que h ($6,626 \times 10^{-34}$ J.s) é a constante de Planck.

A radiação produzida pelo efeito de freamento irá aparecer na forma de radiação de espectro contínuo, em que os fótons de máxima energia presentes no espectro são obtidos quando a energia de movimento dos elétrons é completamente convertida em energia dos fótons. A radiação produzida nesse processo também é conhecida como radiação de “Bremsstrahlung”.

Existem tubos de raios-X onde é possível se produzir essa radiação. Esses tubos consistem basicamente de um cátodo (filamento) e um ânodo (alvo) encapsulados por um invólucro no qual se faz vácuo. Quando uma corrente passa pelo filamento provoca aquecimento do mesmo possibilitando que elétrons sejam ejetados (efeito termiônico). Como existe uma diferença de potencial grande entre o cátodo e o ânodo, os elétrons ejetados pelo efeito de aquecimento do filamento, são acelerados fortemente. Esses elétrons são então direcionados até o alvo e após a interação podem produzir raios-X através das duas maneiras diferentes descritas anteriormente.

A característica dos raios-X produzidos irá depender da voltagem de aceleração e do material de que é constituído o ânodo. Quanto maior for a voltagem de aceleração maior será a energia do elétron e, conseqüentemente, maior será também a energia da radiação sendo, portanto, menores os comprimentos de onda da radiação produzida.

Em filtros de raios-X é possível colocar um átomo no estado excitado através da absorção de raios-X. Neste caso quando a energia do fóton é grande o suficiente para ejetar um elétron do átomo absorvedor o processo é chamado de ionização atômica. A energia de excitação é dada pela relação de Planck $\Delta E = h \cdot \nu$ onde o valor ΔE é dado pela diferença de energia entre o estado de energia que o elétron ocupa e a energia do nível para o qual o elétron é promovido.

3.2.2 Processos de interação da radiação gama e X com a matéria

Os processos envolvidos na interação da radiação gama e X com a matéria são bastante diferentes daqueles envolvendo partículas alfa e beta. Essas radiações tratam-se de fótons que possuem um alcance e poder de penetração muito maior do que as partículas alfa e beta. No caso dessas duas últimas, quando interagem com a matéria - devido as suas massas e cargas - perdem rapidamente a sua energia para o meio com o qual estão interagindo, produzindo excitações e ionizações. No caso das radiações gama e X o processo de absorção pode ser completo, envolvendo o desaparecimento do fóton, ou pode ser parcial, neste caso o fóton é espalhado para fora do feixe original. Esse processo ocorre com cada fóton gama sendo removido individualmente do feixe num único evento. Essa característica do processo de remoção dos fótons é responsável pela absorção sempre ocorrer seguindo uma exponencial. Assim o número de fótons que pode ser removido ao passar por uma dada espessura (Δx) do absorvedor é proporcional a Δx e ao número de fótons que alcança Δx , este tipo de dependência conduz à lei de absorção exponencial (KAPLAN, 1983).

Os processos mais importantes de absorção da radiação gama e X pela matéria são: 1) absorção fotoelétrica, 2) espalhamento Compton e 3) produção de pares elétron-pósitron como um resultado da interação entre raios gama e os campos elétricos dos núcleos atômicos.

3.2.2.1 Efeito fotoelétrico ou absorção fotoelétrica

O efeito fotoelétrico ou absorção fotoelétrica consiste no processo de se arrancar um elétron de um átomo através da colisão de um fóton gama. Neste caso esse fóton será inteiramente absorvido pelo átomo, ou seja, toda a sua energia será utilizada para arrancar o elétron (Figura 2).

Figura 2. Diagrama esquemático do efeito fotoelétrico.

A mecânica quântica desenvolveu fórmulas para explicar a absorção de um fóton gama por um átomo. Existem muitas fórmulas matemáticas para explicar esta absorção para diferentes faixas de energias, porém se a energia do fóton é relativamente pequena, de modo que os efeitos relativísticos não sejam importantes, mas suficientemente grande para que a energia de ligação dos elétrons na camada K seja desprezada, a seção de choque por átomo ${}_a\tau$ para absorção fotoelétrica pode ser escrita como:

$${}_a\tau = \varphi_0 \cdot Z^5 \cdot \left(\frac{1}{137} \right)^4 \cdot 4\sqrt{2} \cdot \left(\frac{m_0 \cdot c^2}{h \cdot \nu} \right)^{\frac{7}{2}} \quad (12)$$

onde

$$\varphi_0 = \frac{8\pi}{3} \cdot \left(\frac{e^2}{m_0 \cdot c^2} \right)^2 = 6,651 \cdot 10^{-25} \text{ cm}^2 \quad (13)$$

Na equação (12), $h \cdot \nu$ é a energia do fóton incidente, $m_0 \cdot c^2$ é a energia de repouso do elétron e Z é o número atômico do material absorvedor; φ_0 é uma unidade conveniente para medir a seção de choque e representa a seção de choque para o espalhamento de fótons de baixa energia por um elétron livre em repouso. Essa equação é válida somente para elétrons ejetados da camada K do átomo. O que é importante salientar na fórmula (12) é a forte dependência em relação ao número atômico e em relação à energia do fóton incidente. A

dependência com Z^5 mostra que para uma dada energia de fóton gama, o processo de absorção fotoelétrica é muito mais significativo em elementos mais pesados em relação aos mais leves. Já a dependência com a energia mostra que para um dado elemento o efeito é muito maior para fótons de baixas energias.

No efeito fotoelétrico ou absorção fotoelétrica o fóton gama ao colidir com um elétron ligado de um determinado átomo, transfere totalmente sua energia para esse elétron que escapa do átomo com uma dada energia cinética (K_e). Essa energia cinética é igual à diferença de energia do fóton e a energia de ligação (b_e) do elétron no átomo.

$$K_e = h\nu - b_e \quad (14)$$

A figura 3 mostra a possibilidade de ocorrência do efeito fotoelétrico para fótons de diferentes energias.

Figura 3. Ocorrência do efeito fotoelétrico para fótons de diferentes energias.

3.2.2.2 Efeito Compton

Em 1923, Compton mostrou que quando um feixe de raios-X incidia sobre átomos de carbono esses fótons sofriam espalhamento de modo a possuírem duas componentes após a interação com o alvo de carbono. Uma das componentes possuía o mesmo comprimento de

onda do fóton incidente e a outra um comprimento de onda um pouco maior. Os comprimentos de onda das duas linhas foram medidos através de um espectrômetro de raios-X de Bragg. Compton descobriu que a diferença entre os comprimentos de onda $\Delta\lambda$ entre as radiações espalhadas variava com o ângulo de espalhamento e crescia para grandes ângulos de espalhamento (Figura 4).

Figura 4. Fotopicos para diferentes ângulos de espalhamento dos fótons.

A fim de explicar essa componente espalhada Compton supôs uma colisão elástica entre o fóton e o elétron dito livre, ou seja, tanto a energia quanto o momento deveriam ser conservados. Como esses fótons são radiações eletromagnéticas e possuem energia $h \cdot \nu$, junto

com essa energia eles carregam também um momento $h \cdot \nu / c$. Como o fóton espalhado irá se deslocar em uma direção diferente do fóton primário então também possuirá um momento diferente. A condição para que o momento seja conservado é que o elétron que espalha o fóton deve absorver um momento igual à diferença vetorial entre o momento do fóton incidente e o fóton espalhado (Figura 5). A energia do elétron espalhado é tirada do fóton primário, deixando um fóton espalhado com menor energia do que o primário.

Assim a partir dos princípios de conservação da energia e do momento angular a energia do fóton gama espalhado pode ser calculada:

$$h \cdot \nu^* = \frac{h \cdot \nu}{1 + \frac{h \cdot \nu}{m_o \cdot c^2} \cdot (1 - \cos \theta)} \quad (15)$$

onde $h \cdot \nu^*$ é a energia do fóton espalhado, m_o representa a massa de repouso do elétron e c a velocidade da luz no vácuo. O produto $m_o \cdot c^2 = 0,511$ MeV é chamado de energia de repouso do elétron. A energia cinética do elétron espalhado é dada por:

$$K_c = E - E^* = \frac{E^2 \cdot (1 - \cos \theta)}{E \cdot (1 - \cos \theta) + m_o \cdot c^2} \quad (16)$$

Para as interações dos fótons gama por efeito Compton, as energias dos elétrons espalhados podem variar segundo dois casos extremos:

- i) um ângulo de espalhamento rasante do fóton ($\theta = 0^\circ$). Neste caso as equações 15 e 16 nos fornecem que $h \cdot \nu^* \cong h \cdot \nu$ e $K_c \cong 0$. Para este caso, a energia do elétron espalhado é praticamente nula e o fóton gama espalhado apresenta quase a mesma energia que possuía antes da incidência.
- ii) uma colisão frontal do fóton gama ($\theta = 180^\circ$). Neste caso, o fóton gama é espalhado para trás na mesma direção de incidência e o elétron na mesma direção só que em

sentido contrário. Este é o caso em que o máximo de energia pode ser transferido a um elétron no espalhamento Compton:

$$K_{cm} = \frac{E}{1 + \frac{m_0 \cdot c^2}{2 \cdot E}} \quad (17)$$

Figura 5. Diagrama esquemático do efeito Compton.

Na equação (17) o único traço da teoria da relatividade é o índice zero indicando a massa de repouso do elétron. Porém, para um tratamento mais refinado do efeito Compton é preciso um tratamento relativístico bastante rigoroso, desta forma mesmo os problemas mais elementares necessitam de uma formulação relativística para a sua solução.

3.2.2.3 Produção de par elétron-pósitron

Um fóton possuindo energia maior que $2m_0 \cdot c^2$ pode elevar um elétron de um estado de energia negativa para um estado de energia positiva (Figura 6). O desaparecimento de um elétron de um estado de energia negativa deixa um buraco, o que significa o aparecimento de um pósitron, já o aparecimento de um elétron num estado de energia positiva significa o aparecimento de um elétron comum. Assim, cria-se um par de partículas. Sendo que cada partícula apresenta uma massa de repouso $m_0 \cdot c^2$, o fóton deve apresentar no mínimo $2m_0 \cdot c^2$

(1,02 MeV) para que tal fenômeno possa ocorrer. Esse processo de criação geralmente ocorre na vizinhança de um núcleo atômico.

Figura 6. Energias possíveis de um elétron de acordo com a teoria de Dirac (KAPLAN, 1983).

É possível listar valores da seção de choque para a produção de pares por átomo, a_K , porém as deduções para as fórmulas de probabilidade de formação de pares são bastante complexas. A seção de choque é zero para energias menores do que $2m_0.c^2$, e para energias maiores aumenta lentamente no início e depois rapidamente. A seção de choque para a produção de pares é proporcional a Z^2 , de modo que para uma dada energia de fóton, a formação de pares aumenta rapidamente com o número atômico.

$$\phi = \frac{Z^2}{137} \cdot \left(\frac{e^2}{m_0.c^2} \right)^2 = Z^2 .5,796.10^{-28} cm^2 \quad (18)$$

O processo de produção de pares está bastante relacionado com o processo da aniquilação, ou seja, o choque de um pósitron com um elétron em repouso ($E = m_0.c^2$). Nesse processo as duas partículas desaparecem e fótons gama são produzidos se movendo em direções opostas, cada um com uma energia de 0,511 MeV – igual a energia de repouso do elétron. Dois fótons são necessários em virtude da conservação do momento. Os fótons oriundos no processo de aniquilação de um par elétron-pósitron são chamados de radiação de aniquilação (Figura 7).

As energias cinéticas do elétron negativo e a do pósitron no efeito produção de pares são iguais a:

$$K_e = K_{e^+} = \frac{E - 2m_0 \cdot c^2}{2} \quad (19)$$

Figura 7. Representação esquemática do efeito Produção de Pares.

3.2.3 Coeficiente de atenuação

Quando um feixe de fótons gama monoenergético interage com um determinado material absorvedor, esses fótons podem ser espalhados, absorvidos ou transmitidos através do mesmo. Para um mesmo absorvedor com diferentes valores de espessura, o resultado da atenuação deve ser uma exponencial simples (Figura 8).

Figura 8. Curva característica de transmissão de raios gama para uma boa colimação em que x representa a espessura, μ o coeficiente de atenuação linear e I/I_0 a atenuação devido à amostra.

A capacidade que o material absorvedor apresenta de espalhar ou absorver o fóton, possibilita caracterizá-lo com uma grandeza chamada coeficiente de atenuação. O coeficiente de atenuação linear (μ) representa a probabilidade, por unidade de comprimento, de que um fóton gama seja absorvido por um determinado material. Microscopicamente, o coeficiente de atenuação linear é simplesmente a probabilidade de que um fóton seja removido do feixe pelos efeitos fotoelétrico, Compton, produção de pares e Rayleigh:

$$\mu = \tau(\text{fotoelétrico}) + \varepsilon(\text{Compton}) + \kappa(\text{pares}) + \xi(\text{Rayleigh}) \quad (20)$$

onde τ representa a contribuição da atenuação devido ao efeito fotoelétrico, ε ao efeito Compton, κ ao efeito produção de pares e ξ ao efeito Rayleigh. A relação entre os fótons transmitidos pelo absorvedor (I) e os fótons transmitidos sem a presença do mesmo (I_0) é dada pela lei de Beer-Lambert:

$$I = I_0 \exp(-\mu.x) \quad (21)$$

onde x (m) representa a espessura do absorvedor.

No entanto, o uso do coeficiente de atenuação linear é limitado pelo fato de variar com a densidade do absorvedor, mesmo que este seja sempre o mesmo material. Por esse motivo,

define-se um novo coeficiente chamado de coeficiente de atenuação de massa (μ_m) e que é amplamente utilizado, dado por:

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (22)$$

onde ρ (kg.m^{-3}) representa a densidade física do material absorvedor. Para uma determinada energia, o coeficiente de atenuação de massa não muda com o estado físico do absorvedor, por exemplo, ele permanece o mesmo para a água tanto no estado líquido como gasoso (JENKINS et al., 1981).

Porém, diferentes energias de fótons apresentarão distintos valores de coeficientes de atenuação de massa. Por exemplo, durante a interação de fótons de 59,54 keV (^{241}Am) com a água, o efeito Compton contribui com aproximadamente 89% (81% de espalhamento Compton e 8% de absorção Compton) do coeficiente de atenuação total e o efeito fotoelétrico e Rayleigh com 7% e 4%. Para fótons de energia média, como é o caso do ^{137}Cs (661,6 keV), o efeito Compton contribui com aproximadamente 100% do coeficiente de atenuação total (62% devido ao espalhamento Compton e 38% devido à absorção Compton), outros processos para essa energia podem ser negligenciados (FERRAZ & MANSELL, 1979; KAPLAN, 1983).

Para qualquer material sendo considerado como atenuador, o coeficiente de atenuação de massa corresponde à soma dos coeficientes de todos os componentes químicos que constituem este material. Assim μ_m será dado por:

$$\left(\frac{\mu}{\rho} \right) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i \quad (23)$$

onde w_i representa as frações peso de cada um dos componentes presentes no material.

A figura 9 mostra a dependência com a energia E e o número atômico Z na absorção da radiação pela matéria.

Figura 9. Influência da energia e número atômico no processo de absorção da radiação pela matéria.

3.2.4 Atenuação da radiação pela matéria

A lei de atenuação de Beer-Lambert é capaz de relacionar a atenuação produzida por uma amostra às suas características físicas, tais como: densidade, umidade e espessura.

A figura 10 traz um desenho esquemático da interação de um feixe de raios-X ou gama com uma dada amostra material.

Figura 10. Representação esquemática do processo de atenuação de radiação por uma dada amostra material.

Sendo N_0 o número de fótons que atravessa a abertura C (de área A) por unidade de tempo em direção a D , caso somente o ar estivesse atenuando o feixe de radiação, para uma pequena distância poderia se considerar que o valor do número de fótons seria considerado

praticamente constante, claro que à medida que o feixe vai se afastando da fonte, o número de fótons que chegam a um determinado ponto cai com o quadrado da distância devido à “abertura” do feixe. No entanto, no caso do diagrama esquemático existe um material atenuador com o qual o feixe de radiação está interagindo. Nesse diagrama é possível observar que existem fótons que são absorvidos, espalhados e refletidos pelo atenuador de espessura dx . Esses efeitos decorrem dos processos de interação da radiação com a matéria. Portanto, após a interação da radiação com a amostra material haverá uma dada quantidade dN de fótons que não irá alcançar D . O número de fótons dN que não chegam a D é proporcional à quantidade inicial N_0 de fótons e também à espessura dx do absorvedor, como mostrado a seguir:

$$dN = -\mu.N_0 dx \quad (24)$$

onde a constante de proporcionalidade μ é o coeficiente de atenuação linear como já descrito anteriormente.

Freqüentemente nos textos científicos encontra-se a equação (24) escrita em termos da mudança dI na intensidade inicial I_0 do feixe de radiação que chega até o absorvedor. Assim para o caso de um feixe de fótons monoenergéticos a variação da intensidade será dada por:

$$dI = -\mu.I_0 dx \quad (25)$$

O sinal negativo indica a diminuição na intensidade do feixe transmitido com o aumento da espessura do absorvedor. A equação (25) ainda pode ser integrada ao longo da espessura da amostra considerando-se $x = 0$ a superfície em que chegam os fótons incidentes e $x = x$ a superfície de onde emergem os fótons transmitidos:

$$\int_{I_0}^I \frac{dI}{I} = -\mu \int_0^x dx \quad (26)$$

Após a integração da equação (26) é possível chegar à conhecida Lei de Beer-Lambert (equação 21).

Para sistemas em que existem dois ou mais tipos de materiais absorvedores, como é o caso do solo, por exemplo, é possível escrever a seguinte relação para o feixe transmitido:

$$I = I_0 \cdot \exp - (\mu_{ag} \cdot x_{ag} + \mu_s \cdot x_s) = I_0 \cdot \exp - (\mu_{mag} \cdot \rho_{ag} \cdot \theta + \mu_{ms} \cdot \rho_s) \cdot x \quad (27)$$

onde μ_s , μ_{ag} , μ_{ms} e μ_{mag} são os coeficientes de atenuação linear e de massa do solo e da água, respectivamente.

$$\mu = \mu_{ms} \cdot \rho_s + \mu_{mag} \cdot \theta \cdot \rho_{ag} \quad (28)$$

Pela equação (28) é possível observar que nas medidas do coeficiente de atenuação linear do solo estão embutidas informações a respeito da sua densidade e umidade, o que possibilita medir essas duas quantidades através da técnica de atenuação de raios gama.

3.2.5 Variância dos coeficientes de atenuação da água e do solo

A partir da propagação de erros da equação que mede o coeficiente de atenuação da água é possível se obter o valor de uma estimativa da variância de μ_{mag} :

$$\begin{aligned} \sigma^2 \mu_{mag} = & \left(\frac{\partial \mu_{mag}}{\partial x} \right)^2 \cdot \sigma^2 x + \left(\frac{\partial \mu_{mag}}{\partial \rho_a} \right)^2 \cdot \sigma^2 \rho_{ag} + \\ & + \left(\frac{\partial \mu_{mag}}{\partial I_0} \right)^2 \cdot \sigma^2 I_0 + \left(\frac{\partial \mu_{mag}}{\partial I} \right)^2 \cdot \sigma^2 I \end{aligned} \quad (29)$$

Sendo considerado o valor da densidade da água constante e exata, as seguintes soluções das derivadas são obtidas:

$$\frac{\partial \mu_{mag}}{\partial \rho_{ag}} = 0$$

$$\frac{\partial \mu_{mag}}{\partial x} = -\frac{1}{x^2 \cdot \rho_{ag}} \cdot \ln \left(\frac{I_0}{I} \right)$$

$$\frac{\partial \mu_{mag}}{\partial I} = -\frac{1}{x \cdot \rho_{ag} \cdot I}$$

$$\frac{\partial \mu_{mag}}{\partial I_0} = \frac{1}{x \cdot \rho_{ag} \cdot I_0}$$

A substituição dessas derivadas parciais na equação (29), fornece o valor da variância da estimativa do coeficiente de atenuação de massa da água.

$$\sigma^2 \mu_{mag} = \left[-\frac{1}{x^2 \cdot \rho_{ag}} \cdot \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \right]^2 \cdot \sigma^2 x + \left[\frac{1}{x \cdot \rho_{ag} \cdot I_0} \right]^2 \cdot \sigma^2 I_0 + \left[-\frac{1}{x \cdot \rho_{ag} \cdot I} \right]^2 \cdot \sigma^2 I \quad (30)$$

O mesmo procedimento será realizado para o coeficiente de atenuação de massa do solo, que tem sua estimativa da variância obtida a partir da propagação de erros da equação que mede o coeficiente de atenuação do solo, onde os termos mais relevantes para o seu cálculo estão relacionados com a espessura do recipiente (x), taxa de contagem inicial (I₀) e taxa de contagem final (I):

$$\sigma^2 \mu_{ms} = \left(\frac{\partial \mu_{ms}}{\partial x} \right)^2 \cdot \sigma^2 x + \left(\frac{\partial \mu_{ms}}{\partial I_0} \right)^2 \cdot \sigma^2 I_0 + \left(\frac{\partial \mu_{ms}}{\partial I} \right)^2 \cdot \sigma^2 I \quad (31)$$

Os seguintes resultados serão obtidos da resolução das derivadas da equação (31):

$$\frac{\partial \mu_{ms}}{\partial x} = -\frac{1}{x^2 \cdot \rho_s} \cdot \ln\left(\frac{I_0}{I}\right)$$

$$\frac{\partial \mu_{ms}}{\partial I} = -\frac{1}{x \cdot \rho_s \cdot I}$$

$$\frac{\partial \mu_{ms}}{\partial I_0} = \frac{1}{x \cdot \rho_s \cdot I_0}$$

A substituição dessas derivadas parciais na equação (31) irá fornecer a estimativa da variância para o coeficiente de atenuação de massa do solo:

$$\sigma^2 \mu_{ms} = \left[-\frac{1}{x^2 \cdot \rho_s} \cdot \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \right]^2 \cdot \sigma^2 x + \left[\frac{1}{x \cdot \rho_s \cdot I_0} \right]^2 \cdot \sigma^2 I_0 + \left[-\frac{1}{x \cdot \rho_s \cdot I} \right]^2 \cdot \sigma^2 I \quad (32)$$

3.3 Tomografia computadorizada

3.3.1 Tomógrafos utilizados em pesquisas aplicadas e medicina

Cada geração de tomógrafo possui diferenças na velocidade de aquisição dos dados e detalhes na resolução da imagem obtida. Um tempo menor para a aquisição de uma determinada imagem é extremamente importante em pesquisas ambientais, porque possibilita a realização de estudos quase que simultaneamente ao fenômeno que se deseja investigar. Caso o estudo necessite de um acompanhamento da dinâmica de sua ocorrência, tomógrafos de diferentes gerações podem ser empregados para tal intento.

A aquisição de dados tomográficos pode ser obtida em várias geometrias baseadas na configuração de varredura, movimentos de varredura e arranjo do detector. A evolução dessas geometrias é descrita em termos de “gerações” e reflete o desenvolvimento histórico da tomografia computadorizada. Os tomógrafos utilizados em pesquisas de ciência do solo geralmente são de primeira geração, no entanto, em medicina, que necessita de diagnósticos rápidos e diminuição da exposição do paciente às fontes de radiação, os tomógrafos mais utilizados são os de terceira, quarta e quinta geração.

Os *tomógrafos de primeira geração* (figura 11A) ou de geometria de feixe paralelo são os tomógrafos mais simples de serem construídos. Para esse tomógrafo múltiplas medidas de transmissão dos raios-X ou gama são obtidas usando um feixe altamente colimado de radiação e um detector. O feixe é transladado em movimentos lineares (passos lineares) ao longo da amostra para se obter um perfil de projeção. A fonte e o detector são ambos

rotacionados ao longo da amostra por aproximadamente 1° (passo angular) e um outro perfil de projeção é obtido. Este movimento de varredura de translação-rotação é repetido até a fonte e o detector completarem uma rotação de 180° . O feixe altamente colimado fornece uma excelente rejeição dos fótons espalhados pela amostra em estudo, porém o movimento de varredura exige um tempo relativamente grande para obtenção de uma imagem. Esta geometria foi usada pioneiramente por Hounsfield (1973) em seu experimento, mas os tomógrafos modernos utilizados em medicina, por exemplo, não utilizam mais esse tipo de sistema.

Os *tomógrafos de segunda geração* (figura 11B) ou de múltiplos detectores permitiram a redução do tempo de varredura para aproximadamente 30s por amostra através do uso de um feixe estreito em forma de leque e um arranjo linear de detectores. Um movimento de varredura de translação-rotação é ainda empregado, no entanto, um grande incremento de rotação pode ser usado, o qual resulta em tempos mais curtos de varredura. Os algoritmos de reconstrução para tomógrafos deste tipo são mais complicados do que aqueles utilizados para os tomógrafos de primeira geração, porque trabalham com dados de projeção de feixes estreitos em forma de leque.

Os *tomógrafos de terceira geração* (figura 11C) foram introduzidos em 1976. Um feixe estreito é rotacionado de 360° ao longo do isocentro. Nenhum movimento de translação é usado, no entanto, o feixe em forma de leque deve ser amplo o suficiente para conter completamente o objeto que está sendo submetido à tomografia. Um detector em formato curvado, consistindo de centenas de outros detectores independentes, está mecanicamente acoplado a fonte de raios-X ou gama, e ambos rotacionam juntos. Como resultado destes movimentos de rotação é possível se obter imagens como um tempo próximo de 1s. Os tomógrafos de terceira geração possuem a vantagem de possibilitar colocar pequenas placas

finas de tungstênio entre cada detector que constitui o arranjo com o objetivo de rejeitar radiação espalhada, as quais quando detectadas podem afetar a qualidade da imagem obtida.

Figura 11. Esquema de tomógrafos empregados em pesquisa e diagnósticos médicos. (A) Sistema de primeira geração; (B) Sistema de segunda geração; (C) Sistema de terceira geração e (D) Sistema de quarta geração.

Os *tomógrafos de quarta geração* (figura 11D) apresentam fonte de radiação e o feixe de radiação em leque rotacionando em torno do isocentro, enquanto que o arranjo de detectores permanece fixo. O arranjo de detectores nesse caso pode consistir de 600 até 4800 detectores independentes em um círculo que envolve completamente o objeto que está sendo submetido à tomografia. O tempo de varredura para tomógrafos deste tipo é similar ao dos

tomógrafos de terceira geração. Os detectores nos tomógrafos de quarta geração não permitem bloquear a radiação espalhada como no caso dos de terceira, porém os detectores são calibrados duas vezes durante cada rotação da fonte de radiação, fornecendo um sistema que possui autocalibração. Sistemas de terceira geração são calibrados durante períodos mais longos (horas). Duas geometrias de detectores são atualmente utilizadas para sistemas de quarta geração. A primeira envolve rotação da fonte de radiação dentro de um arranjo fixo de detectores e a segunda rotação da fonte de radiação fora do arranjo de detectores. Ambos os tomógrafos de terceira e quarta geração são vendidos comercialmente e ambos têm sucesso amplamente confirmado na medicina nuclear.

Os *tomógrafos de quinta geração* são os únicos que possibilitam medidas em tempos bastante pequenos. Embora a evolução da geometria dos tomógrafos tenha proporcionado uma otimização bastante satisfatória dos equipamentos de tomografia, nenhuma das versões desenvolvidas com o feixe em leque possibilitou medidas em tempos muito curtos (menos de 0,1 s), que permitisse aquisição de imagens do coração ou de órgãos com fluxo sanguíneo. O movimento realizado pelos órgãos ou então pelo sangue provoca a degradação da imagem. Visando a obtenção de um resultado satisfatório na construção de imagens, como as descritas anteriormente, foi necessário o desenvolvimento de um tomógrafo sem partes móveis. Este é o caso do tomógrafo de quinta geração, em que o canhão de elétrons gera raios-X em várias direções fazendo uma varredura sobre um alvo côncavo, isso possibilita tempos de aquisição da ordem de milisegundos.

3.3.2 Princípios básicos da tomografia computadorizada

A tomografia por atenuação de raios-X ou gama está baseada no conceito da atenuação da radiação pela matéria.

Quando n regiões com espessuras e coeficientes de atenuação linear diferentes estiverem ao longo do caminho a ser percorrido por um feixe de radiação (Figura 12) a lei de Beer-Lambert passa ser escrita como:

$$I = I_0 \cdot e^{-\sum_{j=1}^n \mu_j x_j} \quad (33)$$

Quando se possui uma coleção de simples transmissões em diferentes orientações do objeto em relação ao feixe é possível se fazer a diferenciação dos coeficientes de atenuação num plano do objeto investigado. Isto é obtido utilizando-se métodos de reconstrução de imagens.

Figura 12. Esquema da aplicação da lei de Beer-Lambert para diferentes casos. (A) Material homogêneo e (B) Material trifásico.

Os métodos utilizados para reconstrução de imagens realizam o cruzamento dos vários feixes de radiação que interagem com a amostra material e por meio de manipulações matemáticas relacionam a cada uma das posições do objeto uma unidade arbitrária chamada de unidade tomográfica (UT).

A essas unidades são atribuídos diferentes valores numéricos, por exemplo, se o feixe não interage com o material a unidade deve possuir seu valor mínimo (ponto de cor negra) e quando interage com a máxima densidade possível, deve possuir seu valor máximo (ponto de cor branca). Aos valores intermediários de unidade podem-se atribuir diferentes tonalidades

de cinza, cores ou quantidade de pontos de modo que se possa obter uma imagem do objeto em estudo.

Na obtenção de uma imagem tomográfica de um material heterogêneo, o feixe de radiação irá percorrer uma série de direções diferentes ao longo da amostra e cruzar regiões com propriedades físicas distintas, com espessuras l diferentes. Para a reconstrução de uma imagem tomográfica com diferente distribuição de densidade para um plano ou corte escolhido, é preciso utilizar um sistema de coordenadas (x, y) para localizar os pontos medidos. Quando uma análise tomográfica é realizada a intensidade dos fótons emergentes é proporcional a integral de todos os $\mu(x, y)$ ao longo de um determinado caminho L (Figura 13). Substituindo esta integral na equação (33) é possível obter:

$$\ln\left(\frac{I_0}{I}\right) = \int_{r,\phi} \mu(x, y) dl \quad (34)$$

onde o subscrito r representa medidas feitas em diferentes posições paralelas separadas por uma distância constante Δr e ϕ é o ângulo de rotação do eixo (x, y) obtido em passos angulares de $\Delta\phi$. Esta rotação do eixo (que é da amostra) pode ser obtida rotacionando-se o objeto em frente do detector de radiação em incrementos fixos de $\Delta\phi$.

Figura 13. Projeções obtidas para um objeto específico usando tomografia computadorizada. (A) Representa uma fatia de um objeto definida como $f(x, y)$ e tendo uma espessura uniforme

4z. (B) Sistema de coordenada usado para descrever o método de reconstrução de uma imagem tomográfica.

Matematicamente, é possível definir uma função $f(x, y)$, chamada função densidade M , a qual representa a distribuição ao longo de uma seção cruzada de uma determinada propriedade física M de interesse. O objetivo principal da tomografia computadorizada é reproduzir tão precisamente quanto possível a função $f(x, y)$. Para a tomografia computadorizada de raios-X ou gama $f(x, y)$ representa o coeficiente de atenuação linear μ do material, o qual possui relação com M . A integral de linha da função ao longo de (r, ϕ) é chamada de raio soma ou raio projeção $P(r, \phi)$, dada por:

$$P(r, \phi) = \int_{r, \phi} f(x, y) dl \quad (35)$$

Quando $f(x, y)$ é igual a $\mu(x, y)$ é possível obter, através das equações (34) e (35), um conjunto completo de raios soma para um dado ângulo definido ϕ , chamado projeção. Adquirindo um grande número de conjuntos de projeções para diferentes valores de ϕ e através de análise computacional é possível determinar e reconstruir a função $f(x, y)$ que irá fornecer imagens em duas dimensões do objeto sendo submetido à tomografia computadorizada (HERMAN, 1980; KAK & SLANEY, 1999).

3.3.3 Bases do método da retroprojeção filtrada

O método de retroprojeção filtrada consiste em um dos métodos utilizados para a reconstrução de imagens tomográficas. A figura 14 ilustra o método imaginando-se um objeto retangular. Das várias projeções necessárias para a reconstrução da imagem apenas duas delas são mostradas.

Figura 14. Reconstrução de um objeto retangular utilizando o método de retroprojeção. Neste esquema são mostradas apenas duas projeções das várias utilizadas pelo método.

O processo de reconstrução da imagem é descrito através da seguinte equação:

$$f'(x, y) = \sum_{j=1}^n P(x \cos \theta_i + y \sin \theta_i, \theta_i) \Delta \theta \quad (36)$$

onde θ_j representa o ângulo da j -ésima projeção e $\Delta \theta = \pi/n$ o passo angular entre as sucessivas projeções, sendo a soma feita sobre as n projeções.

O método de retroprojeção seleciona todos os raios que passam pelo ponto de coordenada (x, y) e a função densidade calculada $f'(x, y)$ vai aparecer como a soma de todas as contribuições dos raios soma que passam pelo ponto que está sendo estudado. Porém, o método de retroprojeção simples apresenta alguns artefatos que precisam ser removidos durante a reconstrução da imagem tomográfica. Isso ocorre devido ao fato de que algumas projeções fornecem contribuições positivas para pontos que estão fora da amostra. Desta forma, quando a imagem é reconstruída ela aparece com alguns defeitos que se costumam chamar em tomografia de “efeito estrela”. O método de retroprojeção filtrada tem por objetivo tratar as projeções do objeto, após terem sido colhidos, visando melhorar a qualidade da imagem e minimizar os efeitos que podem produzir uma imagem não condizente com a realidade. Isso ocorre devido ao fato de que a retroprojeção filtrada possui tanto contribuições positivas quanto negativas aos pontos fora da amostra, de modo que quando essas

contribuições são somadas, acabam se cancelando ou são bastante minimizadas como ocorre no caso do “efeito estrela”.

Como a imagem tomográfica é obtida a partir de diferentes projeções em posições distintas do objeto é possível se obter para cada projeção um arranjo de pontos que estarão localizados espacialmente dentro do objeto. Como cada ponto é resultante da interação do feixe de radiação com a amostra, e como para uma amostra heterogênea cada ponto possuirá um valor diferente para a atenuação do feixe, é possível gerar uma imagem tomográfica atribuindo diferentes tons de cinza para cada um dos pontos que constituem a imagem. No entanto, durante o processo de obtenção das imagens podem surgir alguns artefatos que irão afetar a qualidade destas. Problemas no sistema de amplificação ou detecção da radiação, ocasionados devido a ruídos na eletrônica do sistema, podem afetar a qualidade das imagens tomográficas bem como baixa taxa de contagens devido à baixa atividade da fonte radioativa. Este problema da baixa taxa de contagens torna-se ainda mais sério para sistemas de primeira geração uma vez que para estes tomógrafos o tempo gasto para obtenção de uma imagem, dependendo da resolução desejada, pode ser de várias horas até dias. Portanto, variações na temperatura ambiente ou flutuações na rede de eletricidade podem afetar a contagem dos fótons pelo detector podendo gerar valores sub ou superestimados das unidades tomográficas.

3.3.4 Calibração do sistema tomográfico

A determinação de propriedades físicas do solo como a densidade e a umidade através da tomografia computadorizada dependem da calibração deste sistema, que consiste basicamente em se encontrar a relação existente entre as unidades tomográficas e os coeficientes de atenuação linear para alguns materiais “homogêneos”.

Os materiais selecionados para a calibração devem ser bastante homogêneos para que ocorra um bom ajuste linear entre UT e μ . O coeficiente de atenuação linear de cada material geralmente é determinado várias vezes em diferentes posições para se obter um valor médio de μ . As unidades tomográficas são obtidas através das matrizes de dados que irão gerar as imagens tomográficas de cada um dos materiais que tiveram os valores de μ determinados. O procedimento para a determinação de UT , para um determinado material, consiste na seleção de uma matriz de dados que esteja contida na matriz original. O valor médio de todos os pontos da matriz selecionada é adotado como o valor de UT para o material usado na calibração. Após a obtenção de todos os coeficientes de atenuação linear e unidades tomográficas, para cada um dos materiais, um gráfico de UT versus μ é construído.

O tamanho da matriz selecionada para se obter os valores de UT para o caso de materiais líquidos, que estejam sendo usados na calibração, geralmente deve estar a uma boa distância dos dados de UT que representam as bordas do recipiente. O valor de UT do “pixel” central da matriz selecionada é tomado como referência para delimitar o perímetro dos pontos que seguramente não terão contribuição do coeficiente de atenuação da parede do recipiente utilizado no acondicionamento das amostras líquidas.

Possíveis materiais que podem ser usados na calibração de sistemas tomográficos de primeira geração são: água, álcool, nylon, acrílico, alumínio e latão.

Na realização da calibração é possível se encontrar uma relação linear entre a unidade tomográfica e o coeficiente de atenuação linear do material que está sendo submetido à tomografia:

$$UT(E_\gamma) = \alpha \cdot \mu(E_\gamma) \quad (37)$$

onde $UT(E_\gamma)$ representa a unidade tomográfica do material com coeficiente de atenuação μ e α é a correlação (coeficiente angular) entre as diferentes unidades tomográficas e coeficientes de atenuação linear dos materiais usados na calibração.

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	80	80	80	80	80	80	80	80	0
0	80	50	50	50	50	50	50	80	0
0	80	50	50	50	50	50	50	80	0
0	80	50	50	50	50	50	50	80	0
0	80	50	50	50	50	50	50	80	0
0	80	50	50	50	50	50	50	80	0
0	80	50	50	50	50	50	50	80	0
0	80	80	80	80	80	80	80	80	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 15. Esquema de uma matriz de unidades tomográficas (UT). Os números em vermelho na área central representam a matriz selecionada para a determinação do valor médio de UT dos materiais usados na calibração do tomógrafo. Os números 0 representam a atenuação pelo ar e os números 80 a atenuação pelas bordas do recipiente que contém amostras líquidas.

Quando o solo é considerado como meio absorvedor a equação (37) pode ser escrita como:

$$UT(E_{\gamma}) = \alpha.(\mu_{ms}.\rho_s + \mu_{mag}.\rho_{ag}.\theta) \quad (38)$$

A partir da equação (38) é possível obter valores de umidade ou densidade do solo usando a técnica da tomografia computadorizada.

4 CURVA DE RETENÇÃO DA ÁGUA NO SOLO DETERMINADA PELA TÉCNICA DE ATENUAÇÃO DE RAIOS GAMA

Resumo

A curva de retenção da água no solo relaciona o potencial mátrico (ψ_m) ao conteúdo de água do solo (θ). Quando não ocorrem mudanças significativas na estrutura do solo, a curva de retenção pode ser considerada uma característica física deste meio poroso. Este trabalho apresenta uma nova metodologia para a determinação da curva de retenção usando a técnica de atenuação de raios gama. A fonte radioativa usada no experimento é de ^{241}Am e o detector foi de NaI(Tl) com dimensões de 7,62 x 7,62 cm. O procedimento proposto evitou a freqüente manipulação da amostra como ocorre nos métodos tradicionais. A umidade pôde ser constantemente monitorada dentro da câmara permitindo um julgamento mais preciso da condição de equilíbrio. O tempo requerido para a determinação da curva de retenção foi significativamente reduzido quando comparado ao método que utiliza câmaras de pressão. Este novo procedimento experimental apresenta inúmeras vantagens em relação ao método de Richards e pode ser adaptado para uso rotineiro na determinação de curvas de retenção.

SOIL WATER RETENTION CURVE DETERMINED BY GAMMA-RAY BEAM ATTENUATION

Abstract

The soil water retention curve relates the soil water matric potential (ψ_m) and the soil water content (θ). When no significant changes occur in soil structure, the water retention curve can

be considered as a soil physical characteristic. This article presents a new procedure for soil water retention curve evaluation using gamma-ray beam attenuation as an auxiliary technique for θ determination. The radioactive source used in the experiment was ^{241}Am , and the detector was a 7.62 x 7.62 cm NaI(Tl) scintillation crystal coupled to a photomultiplier tube. The proposed procedure avoids the need of frequent sample manipulation as in the case of the conventional method. The water content can be continuously monitored inside the chamber allowing a more precise judgment of the equilibrium. The time required for the retention curve determination can be significantly reduced in comparison with the traditional method. Therefore, the new procedure presents many advantages in relation to the traditional method and that it can be routinely used for soil water retention curve determination.

4.1 Introdução

A curva de retenção da água no solo trata-se de uma característica física deste meio poroso expressa pela relação entre o potencial mátrico (ψ_m) e a respectiva umidade do solo (θ). Por um período superior a cinquenta anos, a metodologia que tem sido comumente usada para a obtenção da curva de retenção é o método de Richards, que utiliza câmaras de pressão (RICHARDS, 1941; RICHARDS & FIREMAN, 1943). Alguns outros métodos também podem ser mencionados, como por exemplo: àqueles que fazem uso de centrifugas (CENTURION et al., 1997), tensiômetros (PERROUX et al., 1982) e mesas de sucção (JAMISON, 1958).

O método da câmara de pressão envolve o estabelecimento de uma série de equilíbrios entre a água contida em uma amostra de solo após aplicação de diferentes valores de pressão (KLUTE, 1986). O contato hidráulico entre a água contida na amostra e a água no potencial de referência é obtido pela utilização de membranas ou placas porosas. Após cada aplicação

da pressão, quando a condição de equilíbrio é alcançada (parada de saída de água), a umidade do solo é determinada através do método gravimétrico (EMBRAPA, 1997).

Desde a idealização do método de Richards poucas inovações foram introduzidas para aprimorá-lo e alguns problemas metodológicos ainda permanecem, tais como: (1) dificuldade no julgamento da condição de equilíbrio (CENTURION et al., 1997; BACCHI et al., 1998); (2) risco de mudanças estruturais e das características de retenção de água das amostras de solo, devido a constante manipulação, durante as determinações de θ para cada potencial (MORAES et al., 1993a); e (3) o longo tempo requerido para a obtenção da curva completa, devido à necessidade de sucessivas pesagens e re-saturações das amostras após cada equilíbrio (WILLIAMS et al., 1992).

Bacchi et al. (1998) propôs teoricamente o uso da técnica de atenuação de raios gama, em conjunto com as tradicionais câmaras de pressão, como uma ferramenta auxiliar para a obtenção da curva de retenção. A técnica de atenuação de raios gama possibilita determinações simultâneas, não invasivas, da densidade e umidade do solo, e pode oferecer muitas vantagens em relação aos correspondentes métodos convencionais (VAN BAVEL, 1959; REICHARDT, 1965; DE SWART & GROENEVELT, 1971; OLESEN, 1973; FERRAZ & MANSELL, 1979; DANE et al., 1992; JALBERT & DANE, 2001).

O procedimento idealizado por Bacchi et al. (1998) envolve uma adaptação das câmaras tradicionais de pressão para permitir a passagem de um feixe de raios gama ao longo de uma amostra de solo, localizada no interior da câmara, viabilizando um contínuo monitoramento de θ , durante todo o procedimento de obtenção da curva, sem a necessidade de constante abertura da câmara de pressão. Este novo design conduz a um julgamento mais preciso da condição de equilíbrio, desde que θ é continuamente determinada pela interação do feixe de radiação com a amostra presente no interior da câmara. Outra possível vantagem é a minimização de manipulação da amostra uma vez que esta é saturada uma única vez no início

do processo, diminuindo riscos potenciais de modificações na estrutura e, como consequência, o tempo requerido para a obtenção da curva completa é reduzido.

O presente trabalho apresenta resultados práticos da curva de retenção medida através da técnica de atenuação de raios gama para solos com duas texturas distintas e traz uma análise comparativa com os dados de retenção obtidos através do método de Richards.

4.2 Teorias

4.2.1 Método de Richards

O método de Richards para a determinação da curva de retenção envolve o estabelecimento de uma série de equilíbrios entre a água na amostra de solo e a água a um dado potencial (KLUTE, 1986). O instrumento usado para a determinação da curva consiste de uma câmara de pressão feita em aço (Figura 1). Esta câmara possibilita acomodar em seu interior placas porosas, que são inicialmente saturadas em água a pressão atmosférica, usadas na obtenção do contato hidráulico entre a amostra de solo e a água contida no interior da placa. A aplicação de pressão no interior da câmara é feita utilizando um compressor de ar, um painel de controle contendo válvulas de pressão e manômetros, permitindo uma constante entrada de pressão em um intervalo de 0 até 1500 kPa.

Figura 1. Câmara de pressão usada para obtenção da curva de retenção da água no solo pelo método de Richards (Adaptado com base em Libardi, 2001).

Inicialmente, as amostras são umedecidas em água através do processo de ascensão capilar por um período de 24 horas ou mais. Após o umedecimento as amostras são colocadas em contato com as placas porosas previamente saturadas, visando à obtenção de um bom contato hidráulico, e depois do conjunto ser montado no interior da câmara, esta é fechada. Ajusta-se com o manômetro uma determinada pressão de ar a ser aplicada no interior da câmara visando forçar a saída de água das amostras de solo, pelas placas, até a condição de equilíbrio ser alcançada (Figura 1):

$$\psi(A) = \psi(B) \quad (1)$$

onde

$$\psi(A) = (g.h) + g.z_a \quad (2)$$

e

$$\psi(B) = \psi_m + \frac{P}{\rho_{H_2O}} + g.z_b \quad (3)$$

onde gh representa o potencial de pressão (ψ_p), P/ρ_{H_2O} o potencial de pressão mais o pneumático (ψ_n) e gz representa o potencial gravitacional (ψ_g).

Para a placa porosa completamente saturada o potencial de pressão é dado por:

$$\psi_P = \int_{P_0}^P v_{sol} \cdot dP = \frac{1}{\rho_{sol}} \cdot (P - P_0) \quad (4)$$

onde v_{sol} representa o volume parcial específico da solução do solo. Para o caso de uma amostra de solo não saturada e não expansiva:

$$\psi_P + \psi_n = \int_{P_0}^P v_{sol} \cdot dP + \int_{P_0}^{P_{air}} \left(\frac{1}{\rho_{sol}} - v_{sol} \right) \cdot dP_{air} = \frac{1}{\rho_{sol}} \cdot (P_{air} - P_0) \quad (5)$$

para este caso o termo correspondente ao potencial de pressão é zero.

Considerando $P_0 = P_{atm}$ e a pressão aplicada em B igual $P_{atm} + P$, é possível a partir de (2) e (3) obter:

$$\psi_m = g \cdot h - \frac{P}{\rho_{H_2O}} - g \cdot (z_b - z_a) \quad (6)$$

A figura 1 mostra que $h = z_b - z_a$, então:

$$\psi_m = -P \text{ (Energia/volume de água)} \quad (7)$$

Portanto, na condição de equilíbrio a pressão aplicada na amostra de solo é igual ao valor do potencial mátrico. Após cada equilíbrio a câmara é aberta, a amostra de solo é pesada, re-umedecida e colocada novamente na câmara para ser submetida a uma nova aplicação de pressão. A relação entre o potencial mátrico e a respectiva umidade do solo para diferentes condições de equilíbrio fornece a curva de retenção.

4.2.2 Atenuação de raios gama

Quando um feixe de raios gama passa através de uma amostra de solo de espessura x (cm), os fótons são transmitidos seguindo a lei de Beer-Lambert (WANG et al., 1975). Para amostras de solos, considerando duas fases, sólido e água, esta lei pode ser escrita como:

$$I = I_0 \cdot \exp[-x \cdot (\mu_{ms} \rho_s + \mu_{mag} \theta)] \quad (8)$$

onde I e I_0 são as taxas de fótons emergentes e incidentes, μ_{ms} e μ_{mag} ($\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) são os coeficientes de atenuação de massa do solo e da água, ρ_s ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) a densidade do solo e θ ($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$) a umidade volumétrica.

Para solos nos quais a densidade permanece constante durante mudanças de umidade e, se μ_{ms} , μ_{mag} , ρ_s e x são conhecidos, é possível se obter θ pela técnica de atenuação de raios gama, resolvendo a equação 8 para θ .

$$\theta = \frac{1}{x \cdot \mu_{mag} \cdot \rho_{ag}} \left[\ln \left(\frac{I_0}{I} \right) - x \cdot \mu_{ms} \cdot \rho_s \right] \quad (9)$$

Para o caso de solos expansivos, um sistema utilizando duas energias pode ser usado para avaliar θ e ρ_s , simultaneamente, através de um determinado conjunto de equações (STROOSNIJDER & DE SWART, 1974). Neste caso, após cada aplicação de pressão, é possível medir θ e ρ_s , levando em consideração possíveis mudanças em ρ_s devido à expansão/contração do solo.

4.2.3 Erro estatístico pelo método nuclear

A determinação de θ pelo método nuclear apresenta erros experimentais devido ao processo de decaimento radioativo que devem ser levados em consideração. Pela propagação de erros da equação 9 é possível estimar o erro associado as medidas de θ pelo método nuclear:

$$\begin{aligned} \sigma^2 \theta = & \left(\frac{\partial \theta}{\partial I_0} \right)^2 \sigma^2(I_0) + \left(\frac{\partial \theta}{\partial I} \right)^2 \sigma^2(I) + \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 \sigma^2(x) + \\ & + \left(\frac{\partial \theta}{\partial \rho_s} \right)^2 \sigma^2(\rho_s) + \left(\frac{\partial \theta}{\partial \mu_{mag}} \right)^2 \sigma^2(\mu_{mag}) + \left(\frac{\partial \theta}{\partial \mu_{ms}} \right)^2 \sigma^2(\mu_{ms}) \end{aligned} \quad (10)$$

onde $\sigma(\theta)$ representa o desvio padrão total; $\sigma(I_0)$ e $\sigma(I)$ os desvios padrão de I_0 e I , respectivamente. Em condições ideais os parâmetros x , ρ_s , μ_{mag} e μ_{ms} podem ser considerados constantes e a variação de umidade devido a estes parâmetros torna-se zero. Em condições reais de laboratório estes parâmetros podem ser minimizados tornando muito pequenos o segundo, terceiro, quarto e quinto termos no lado direito da equação 10. Nestas condições, as variações de θ podem ser consideradas diretamente relacionadas com a incerteza no processo de decaimento radioativo ($\sqrt{I}$). Resolvendo a primeira e segunda derivada parcial na equação 10 a incerteza em θ pode ser obtida usando-se:

$$\sigma\theta = \frac{1}{x \cdot \mu_{mag} \cdot \rho_{ag}} \cdot \sqrt{\frac{\sigma^2(I_0)}{I_0^2} + \frac{\sigma^2(I)}{I^2}} \quad (11)$$

Este valor do desvio para a umidade $\sigma\theta$ representa o limite detectável pelo sistema e, portanto, os intervalos de medida de θ ficam limitados a este fator que pode ser minimizado a partir da escolha do tipo de amostra, da fonte radioativa, da colimação, da distância fonte/detector, etc.

4.3 Material e Métodos

Amostras indeformadas de um latossolo vermelho-amarelo distrófico (LVAd) e um nitossolo vermelho eutrófico (NVe) foram coletadas em fazendas experimentais da ESALQ/USP, situadas em Piracicaba, estado de São Paulo.

Para a coleta foram utilizados cilindros de alumínio, com borda biselada, de 3,0 cm de altura, 5,0 e 4,8 cm de diâmetros externo e interno e volume aproximado de 55 cm³. As amostras foram coletadas na camada superficial do perfil do solo (3-8 cm). Após a coleta os excessos de solo nos cilindros, na superfície superior e inferior, foram aparados para deixar o volume de solo igual ao volume do cilindro. O procedimento de umedecimento foi ascensão

capilar como descrito em Klute (1986). Este procedimento foi conduzido por um período de 1 a 2 dias visando evitar a presença de bolhas de ar aprisionadas na amostra de solo. Após o procedimento de umedecimento as amostras de solo foram colocadas em contato com a placa porosa, dentro da câmara de pressão, e pressão foi aplicada.

As curvas de retenção foram determinadas nas mesmas amostras de solo através de: (1) método tradicional, usando uma câmara de pressão comercial para baixas pressões (CAT No. 1600 – “Soil Moisture Equipment Co.”) que suporta pressões de até 500 kPa e (2) método nuclear, usando uma câmara de pressão projetada e construída em acrílico (Figuras 2 e 3).

Figura 2. Diagrama esquemático da câmara de pressão projetada. (A) Conexão para a entrada de ar; (B) Arruelas com intervalo de 120°; (C) Haste para fixação das tampas superior e inferior; (D) Cilindro de acrílico; (E) Tampa superior da câmara; (F) Placa porosa; (G) Tampa inferior da câmara; (H) Tubo de saída da água; (I) O-ring de borracha; e (J) Reservatório de água.

A câmara de pressão projetada permite o uso de uma única amostra de cada vez. Permite acomodar cilindros com altura variando entre 3 a 5 cm e diâmetro de 5 cm. Possibilita a obtenção de pontos da curva de retenção entre 0 a -300 kPa. A placa porosa (diâmetro de 6 cm) acoplada a câmara foi desenvolvida por “Soil Moisture Equipment Co.”

(California, USA) e apresenta pressão de borbulhamento de 500 kPa. O corpo cilíndrico da câmara é feito em acrílico possuindo diâmetro interno de 7 cm, altura de 12,12 cm e paredes com espessura de 0,6 cm. As tampas superior e inferior são também feitas em acrílico e possuem alturas de 2,4 cm e diâmetros de 10 cm, respectivamente. O-rings de borracha (espessura de 0,5 cm) são colocados nas conexões entre as tampas superior e inferior para prevenir despressurização da câmara. A placa porosa encontra-se fixada na tampa inferior na qual existe um pequeno reservatório com o mesmo diâmetro da placa e volume aproximado de 30 cm³. Tubos de drenagem conectados a este pequeno reservatório servem como saída para água que passa pelo solo e placa porosa. Na tampa superior existe um tubo cilíndrico construído em metal (diâmetro de 0,85 cm) que permite a conexão de uma mangueira para aplicação de ar. Para fechar a câmara para aplicação de pressão arruelas são fixadas nas hastes (total de quatro) de metal (diâmetro de 0,5 cm) e permitem vedação completa da câmara. A saturação da placa porosa é feita colocando-se uma coluna de água com altura de 5 cm no interior da câmara por um período de dois dias.

Figura 3. Câmara de pressão construída em acrílico para as medidas da curva de retenção pelo método nuclear. Dentro da câmara é possível observar um cilindro de alumínio contendo a amostra de solo, e no topo da câmara, o sistema de entrada de pressão. Re-impreso, com permissão, de Pires et al. (2005a); copyright *Elsevier Science Publisher*.

A câmara de pressão foi posicionada entre a fonte radioativa e o detector com o feixe de fótons gama sempre cruzando o centro da câmara e da amostra de solo (Figura 4). O feixe monoenergético de fótons gama foi usado para avaliar θ , desde que os solos usados possuem estrutura rígida.

Figura 4. Esquema do sistema usando a técnica de atenuação de raios gama para obtenção das curvas de retenção. Re-impresso, com permissão, de Pires et al. (2005a); copyright *Elsevier Science Publisher*.

A fonte de raios gama é de ^{241}Am , com um período de meia vida ($T_{1/2}$) de 458 anos, possuindo uma atividade 3,7 GBq e energia de 59,54 keV. A detecção dos fótons foi feita através de um cristal de cintilação sólida de iodeto de sódio ativado com tálio NaI(Tl), da marca ORTEC, do tipo plano com dimensões de 7,62 x 7,62 cm. O detector encontra-se revestido por um castelo cilíndrico de alumínio e blocos de chumbo dispostos ao seu redor. A blindagem de chumbo é exigida para a minimização da detecção de fótons não provenientes da fonte radioativa, ou seja, radiação de fundo ("background"). Acoplado ao detector encontra-se uma válvula fotomultiplicadora (ORTEC, modelo 276) cuja alimentação é feita através de uma fonte de alta tensão (ORTEC, modelo 556). Os próximos módulos da cadeia nuclear são o amplificador (ORTEC, modelo 572) que se encontra conectado na saída do pré-amplificador, o analisador monocanal (ORTEC, modelo 550A) e um contador/temporizador

(ORTEC, modelo 994). Todos os módulos da eletrônica estão acoplados em um bastidor bin, modelo 4001A da ORTEC, e pelo uso de um microcomputador é possível fazer o controle e estabelecimento dos parâmetros de funcionamento do módulo temporizador/contador e possibilita uma fácil aquisição dos dados.

Colimadores retangulares de chumbo (1 cm de altura e 0,2 cm de largura) e circulares (0,4 cm de diâmetro) foram posicionados na saída da fonte radioativa e entrada do detector, sendo ajustados e alinhados em ordem para produzir feixes com formatos vertical e circular.

Para a determinação dos coeficientes de atenuação das amostras de solo e da água foi seguida a seqüência de contagem de Conner et al. (1970). As amostras de solo foram secas ao ar e passadas em peneira com malha de 2 mm. Depois de peneirado o solo foi transferido para uma caixa (10 x 10 x 10 cm) possuindo paredes finas de acrílico. As intensidades dos fótons transmitidos foram obtidas em diferentes posições (10 posições) da caixa de acrílico. Os valores dos coeficientes de atenuação obtidos representam médias de dez repetições. O mesmo procedimento foi seguido para a água. Os coeficientes de atenuação de massa foram determinados a partir das medidas de μ_s para um determinado valor de ρ_s e de μ_{ag} considerando $\rho_{ag} = 1 \text{ g.cm}^{-3}$.

4.4 Resultados e Discussão

A tabela 1 apresenta algumas características físicas dos solos LVAd e NVe usados no experimento.

Os valores dos coeficientes de atenuação de massa medidos foram: 0.25672 ± 0.00303 (LVAd), 0.36341 ± 0.00256 (NVe) e $0.19890 \pm 0.00271 \text{ cm}^2.\text{g}^{-1}$ (água) e estão em concordância com aqueles reportados na literatura para fótons com energia de 59,54 keV

(STROOSNIJDER & DE SWART, 1974; FERRAZ & MANSELL, 1979; CUNHA & SILVA et al., 2000).

Tabela 1 – Algumas características físicas para os dois tipos de solos usados no experimento.

Característica	LVAd	NVe
<i>Areia (%)</i>	77	36
<i>Silte (%)</i>	5	19
<i>Argila (%)</i>	18	45
<i>Densidade de partículas (g.cm⁻³)</i>	2,55	2,68
<i>Densidade do solo (g.cm⁻³)</i>	1,62	1,51
<i>Porosidade (%)</i>	36,3	43,5

A escolha da câmara de pressão de acrílico para a obtenção das curvas de retenção, usando o método nuclear, foi devido à baixa atividade da fonte radioativa usada, a atenuação pelas paredes da câmara e a diminuição na intensidade dos fótons com o inverso do quadrado da distância. Caso fosse usada a câmara de pressão comercial a distância entre a fonte e o detector seria da ordem de 40 cm. Através do uso da nova câmara de acrílico esta distância foi reduzida para 18 cm possibilitando que uma maior intensidade de fótons gama transmitidos alcançassem o detector. A câmara de pressão tradicional suporta até quarenta amostras de cada vez e a câmara projetada para este trabalho possibilita somente uma amostra. Esta limitação, no entanto, pode ser vencida com o desenvolvimento de um novo modelo de câmara de pressão e instrumentação do método.

A tabela 2 e as figuras 5 e 6 mostram resultados referentes à umidade para diferentes valores de pressão aplicados para ambos os solos e métodos.

Tabela 2 – Potencial mátrico (ψ_m), umidade (θ), desvio padrão e coeficiente de variação para cada pressão aplicada, para ambos os solos e métodos.

LVAd					NVe			
<i>Método tradicional</i>								
$-\psi_m$ (kPa)	θ_T (m ³ .m ⁻³)	$\delta\theta_T$ (m ³ .m ⁻³)	CV (%)	No. de curvas	θ_T (m ³ .m ⁻³)	$\delta\theta_T$ (m ³ .m ⁻³)	CV (%)	No. de curvas
20	0,1890	0,0054	2,9	13	0,3899	0,0113	2,9	10
40	0,1722	0,0060	3,5	13	0,3792	0,0095	2,5	10
60	0,1649	0,0058	3,5	13	0,3730	0,0114	3,1	10
80	0,1593	0,0058	3,7	13	0,3634	0,0127	3,5	10
100	0,1510	0,0046	3,0	13	0,3575	0,0101	2,8	10
<i>Método nuclear</i>								
$-\psi_m$ (kPa)	θ_N (m ³ .m ⁻³)	$\delta\theta_N$ (m ³ .m ⁻³)	CV (%)	No. de curvas	θ_N (m ³ .m ⁻³)	$\delta\theta_N$ (m ³ .m ⁻³)	CV (%)	No. de curvas
0	0,2570	0,0189	7,4	6	0,4461	0,0364	7,6	6
25	0,1855	0,0065	3,5	6	0,4025 ¹	0,0110	2,7	6
50	0,1717	0,0055	3,2	6	0,3851	0,0081	2,1	6
75	0,1625	0,0042	2,6	6	0,3708 ¹	0,0087	2,4	6
100	0,1542	0,0068	4,4	6	0,3568	0,0084	2,4	6

$\delta\theta$ = Desvio padrão; ¹ Valores calculados a partir do ajuste teórico dos dados: $y = \frac{A - B}{1 + e^{(x - x_0)/dx}} + B$
(função do tipo sigmoidal).

(A)

(B)

(C)

(D)

Figura 5. (A) Curvas de retenção obtidas pelos métodos tradicional e nuclear (colimador retangular) para o LVAd; (B) Análise do desvio entre os dois métodos para as curvas ajustadas; (C) Curvas de retenção obtidas pelos métodos tradicional e nuclear (colimador circular) para o LVAd; e (D) Análise do desvio entre os dois métodos para as curvas ajustadas. Os valores de umidade representam médias de três valores para cada curva obtida.

Figura 6. (A) Curvas de retenção obtidas pelos métodos tradicional e nuclear (colimador retangular) para o NVe; (B) Análise do desvio entre os dois métodos para as curvas ajustadas; (C) Curvas de retenção obtidas pelos métodos tradicional e nuclear (colimador circular) para o NVe; e (D) Análise do desvio entre os dois métodos para as curvas ajustadas. Os valores de umidade representam médias de três valores para cada curva obtida.

O intervalo de pressão e o número de pontos por curva, para o método nuclear, foram escolhidos em ordem para ter variações de θ compatíveis com a resolução do método. Devido ao fato de que a emissão de um fóton por uma fonte radioativa consiste em um evento aleatório, a determinação de θ está vinculada à emissão de um fóton oriundo da fonte de ^{241}Am por unidade de tempo. Portanto, existe um intervalo mínimo mensurável $\sigma\theta$ (Equação 11), para o método nuclear, o qual deve ser levado em consideração durante a definição dos

intervalos de pressão ΔP . Isto explica as diferenças de pressão aplicadas para os dois métodos (Tabela 2). Para o caso dos solos LVAd e NVe, estes intervalos mínimos de $\sigma\theta$ para o método nuclear foram 0,0080 e 0,0103 m³.m⁻³, respectivamente. A figura 7 mostra resultados de $\sigma\theta$ para as amostras de solos apresentadas nas figuras 5 e 6. Diferenças entre cada valor médio de θ no eixo das ordenadas (linhas horizontais pontilhadas) representam o mínimo valor no qual θ pode ser medido com segurança. Todos os valores de $\Delta\theta$ menores do que este intervalo (pontos médios na Figura 7 com seus respectivos $\Delta\theta$ valores) não possibilitam identificar se a variação obtida é realmente devido à variação de θ ou devido a incertezas causadas pelo processo estatístico de decaimento da fonte radioativa. A figura 7 mostra que os solos LVAd e NVe apresentam, para colimadores retangulares, um intervalo entre 50 e 75 kPa com $\Delta\theta$ menor do que $\sigma\theta$. Para o LVAd três curvas apresentaram o mesmo problema e para o NVe somente uma, mostrando que para o LVAd é preciso usar um maior número de amostras de solo para ter uma melhor determinação da curva de retenção usando o método nuclear.

A partir das figuras 5 e 6 é possível comparar os resultados obtidos pelos dois métodos. Desvios maiores entre os dois métodos para os dois tipos de solos ocorreram para valores de umidade próximos a saturação. Uma possível causa dessa diferença pode ser a variabilidade entre as amostras de solo, o procedimento de amostragem ou o próprio processo de umedecimento. A variabilidade pode explicar esse desvio, porque as amostras usadas na curva de retenção medida pelos dois métodos, embora coletadas próximas (poucos centímetros uma da outra), são diferentes. Com relação à saturação, estas amostras foram submetidas a este processo em dias distintos, e embora o mesmo procedimento tenha sido aplicado (EMBRAPA, 1997), diferenças no nível de saturação podem ocorrer durante este

¹ A umidade média neste caso foi obtida através de: $\theta_M = \left(\frac{\theta_{P_i} + \theta_{P_{i+1}}}{2} \right)$. P representa a pressão de ar. Na figura 7 foi excluída as diferenças entre as pressões 0 e 25 kPa para todas as curvas obtidas pelo método nuclear.

processo. Estas diferenças podem ser refletidas nos valores de θ próximo à saturação. Após a construção das curvas de retenção, as amostras foram destruídas, e foi observado que as amostras do NVe apresentavam algumas fraturas e pequenos buracos, os quais podem ter afetado os valores de θ obtidos pelo método nuclear. Este problema pode ser contornado fazendo-se uso de um tomógrafo computadorizado, que pode permitir a obtenção de imagens das amostras, antes da realização das curvas, visando escolher aquelas com menores perturbações de estrutura.

Figura 7. Resolução do método nuclear para: (A)-(B) o LVAd e (C)-(D) o NVe. $\sigma\theta$ representa o mínimo intervalo mensurável pelo método nuclear obtido pela equação 11 e $\Delta\theta$ indica as diferenças de θ entre valores de pressão P_i e P_{i+1} .

Os desvios entre os dois métodos podem também ter como causas pequenas modificações na estrutura do solo durante a obtenção da curva de retenção, principalmente, para o método tradicional, as quais podem afetar a densidade do solo considerada constante na equação 9. No entanto, para o intervalo de pressão escolhido para a obtenção das curvas neste trabalho (0-100 kPa), as possíveis modificações de estrutura, que poderiam afetar a densidade do solo, foram menores que os possíveis erros do método nuclear devido aos eventos estatísticos de decaimento da fonte radioativa. É necessário observar que as amostras de solo usadas para a obtenção da curva de retenção pelo método tradicional são submetidas a vários processos de umedecimento e secamento, os quais podem levar a mudanças na estrutura destas amostras (HUSSEIN & ADEY, 1998) e afetar as curvas. Para o método nuclear proposto a amostra de solo é submetida somente a um único processo de umedecimento e secamento, o que representa uma outra vantagem deste método.

Infelizmente, como foram aplicados diferentes valores de pressão para determinar as curvas pelos dois métodos (tabela 2), não foi possível analisar estatisticamente os valores de θ para cada valor de P . No entanto, os dois métodos possuem um valor em comum de P (100 kPa) para o qual o teste t foi aplicado. O teste mostra que não existem diferenças estatísticas significativas ($P < 0,05$) entre os valores de θ para os dois métodos.

Com relação ao julgamento da condição de equilíbrio, uma vez que o sistema nuclear está conectado a um computador, o novo método proposto permite, através de programa especificamente desenvolvido para a aquisição dos dados, obter o exato momento da mudança de pressão na câmara para um novo valor desejado, levando a uma redução do tempo requerido para a obtenção da curva de retenção completa. No método convencional, não é possível determinar com precisão o exato momento do equilíbrio (parada de saída de água), o qual é definido empiricamente após cessar a saída de água da câmara de pressão. Para o método nuclear, o procedimento adotado para definir o exato momento do equilíbrio foi

acompanhar as variações de θ todos os dias. Quando θ alcançou um valor aparentemente constante para o potencial aplicado, esta umidade foi mensurada e uma nova pressão foi aplicada na amostra. O tempo necessário para a obtenção da curva, com quatro pontos, para os solos LVAd e NVe, foram 12 e 32 dias, respectivamente, pelo método nuclear. No caso do método tradicional, o tempo necessário foi de 20 e 48 dias. Estes resultados permitem concluir que o método nuclear apresenta algumas vantagens em relação ao método tradicional, como uma maior exatidão da definição do tempo de equilíbrio e redução do tempo requerido para obtenção da curva, uma vez que a amostra de solo, pelo método nuclear, é submetida a um único ciclo de umedecimento e secamento.

4.5 Conclusões

Os resultados deste estudo confirmam a habilidade do método nuclear na obtenção de curvas de retenção no intervalo de pressão entre 0 e 100 kPa, sendo este o intervalo mais importante do ponto de vista agronômico, uma vez que apresenta a distribuição de poros mais importante para retenção e movimento de água, ar e gases. Também demonstra a possibilidade de determinação do tempo de equilíbrio com uma maior precisão do que em relação ao método convencional de Richards. Uma outra grande vantagem é evitar a constante retirada da amostra da câmara para pesagem, devido à dificuldade de se obter um mesmo re-umedecimento da amostra e restabelecimento do contato hidráulico entre a amostra e a placa porosa (REGINATO & VAN BAVEL, 1962). A constante manipulação da amostra durante a obtenção da curva também aumenta o risco da ocorrência de danos à estrutura do solo.

5 DANOS ÀS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO CAUSADOS POR DIFERENTES MÉTODOS DE AMOSTRAGEM DETERMINADOS POR TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS GAMA

Resumo

As propriedades físicas do solo podem ser fortemente afetadas durante procedimentos de amostragem. Amostragens mal conduzidas podem induzir modificações na estrutura do solo e, conseqüentemente, levar a medidas errôneas de suas propriedades. O objetivo deste trabalho foi avaliar os danos causados por diferentes amostradores na estrutura do solo através da análise de imagens tomográficas. Um tomógrafo de primeira geração consistindo de uma fonte de ^{241}Am e um detector de cintilação sólida de NaI(Tl) de 7,62 x 7,62 cm foi usado. Resultados confirmam o efeito dos dispositivos de amostragem na estrutura das amostras de solo e que a compactação causada durante a amostragem causa significativas alterações na densidade do solo. Pela tomografia foi possível determinar o nível de compactação e proceder análises detalhadas da distribuição da densidade do solo no interior das amostras de solo.

DAMAGE TO SOIL PHYSICAL PROPERTIES CAUSED BY DIFFERENT SAMPLER METHODS ASSESSED BY GAMMA RAY COMPUTED TOMOGRAPHY

Abstract

Soil sample physical properties can greatly be affected during soil sampling procedures. Improper procedures can impose modifications on soil sample structure and consequently lead

to wrong measurements of soil properties. The objective of this work was to evaluate the damage caused by soil samplers to soil structure through the analysis of computed tomography (CT) images. A first generation tomograph was used, having a ^{241}Am source and a 7.62 x 7.62 cm NaI(Tl) scintillation crystal detector coupled to a photomultiplier tube. Results confirm the effect of soil sampler devices on the structure of soil samples, and that the compaction caused during sampling causes significant alterations of soil bulk density. Through the use of CT it was possible to determine the level of compaction and to make a detailed analysis of the soil bulk density distribution within the soil sample.

5.1 Introdução

Muitos físicos de solo têm investigado nos últimos anos a influência do volume de amostragem na avaliação das propriedades físicas do solo, tais como: densidade, volume de ar, umidade e porosidade (ROGASIK et al., 1999). VandenBygaart e Protz (1999) tentaram definir uma área elementar mínima que pudesse representar uma amostra de solo em análises quantitativas de suas propriedades. Eles mostraram que existe uma área mínima abaixo do qual não seria possível fazer análises físicas quantitativas livres de influências. Baveye et al. (2002) mostraram a importância do volume de amostragem na determinação de parâmetros macroscópicos e que amostras muito pequenas exibem flutuações erráticas e significativas.

Instrumentos usados para a amostragem também podem influenciar as medidas de alguns parâmetros físicos do solo. Camponez do Brasil (2000) em seu trabalho de dissertação mostrou, usando quatro diferentes dispositivos de amostragem, que certas propriedades físicas do solo podem ser fortemente afetadas pelo procedimento de coleta da amostra. Os resultados obtidos em seu trabalho indicam que os equipamentos de amostragem podem causar compactação nas amostras, induzindo a modificações do sistema poroso e, conseqüentemente,

na estrutura do solo. No entanto, por não dispor de nenhuma técnica que possibilitasse uma análise não invasiva das amostras de solo coletadas, não foi possível a Camponez do Brasil (2000) realmente indicar qual foi o impacto que cada equipamento de amostragem provocou no interior de cada amostra.

A compactação do solo causa sérias alterações em suas propriedades físicas, principalmente em sua densidade. A densidade do solo é representada pela razão entre a massa e o volume de solo, dando uma idéia da porcentagem de vazios que definem a estrutura do solo. Baixos valores de porosidade representam uma região mais compacta no interior de uma determinada amostra. Estas regiões compactadas podem causar modificações na capacidade de armazenagem de água pelo solo e potencial mátrico, os quais são parâmetros usados em irrigação e drenagem e, portanto, possuem grande importância econômica para a agricultura.

A tomografia computadorizada (TC) é uma técnica de imagens não invasiva que permite imagens de boa resolução de materiais e possibilita análises quantitativas de propriedades físicas destes materiais. A TC tem sido usada para obter imagens não destrutivas de diferentes objetos em diversas áreas do conhecimento (HOUNSFIELD, 1973; BORGIA et al., 2001; STAMPANONI et al., 2003; TREIMER et al., 2003; JENNESON et al., 2003). Petrovic et al. (1982) introduziram a TC para estudos da densidade do solo seguido dos trabalhos de Hainsworth e Aylmore (1983) e Crestana et al. (1985) que realizaram medidas da umidade e do movimento de água. Quatro anos após a primeira aplicação da TC na ciência do solo, Crestana et al. (1986) desenvolveram um tomógrafo para uso somente em análises físicas do solo e mostraram algumas vantagens deste equipamento sobre os sistemas de varredura comerciais. Vaz et al. (1989) usaram um minitomógrafo para estudos de compactação causada durante operações de preparo do solo com equipamentos pesados. Perret et al. (1999) fizeram quantificações em 3-D de macroporos em amostras estruturadas

de solo. Wildenschild et al. (2002) usaram TC de raios-X para propostas hidrológicas e compararam seus resultados para três diferentes tipos de sistema de varredura e Balogun e Cruvinel (2003) investigaram a distribuição da densidade do solo utilizando tomografia de espalhamento Compton.

O objetivo deste trabalho foi usar a TC de raios gama para analisar o efeito dos equipamentos de amostragem nas medidas de densidade do solo de amostras coletadas em cilindros de aço.

5.2 Material e Métodos

5.2.1 Solos e Amostragem

As amostras de solo foram coletadas no perfil de um latossolo vermelho-amarelo distrófico (LVAd), com textura arenosa (média de 78% de areia), em um campo experimental do Departamento de Produção Vegetal, situado na Fazenda Sertãozinho, em Piracicaba, SP. Quatro diferentes métodos de amostragem com diferentes dimensões de cilindros foram usados: (1) *A* (4,2 cm de altura, 2,7 cm de diâmetro interno, 25 cm³ de volume), (2) *B* (3,0 cm de altura, 4,8 cm de diâmetro interno, 55 cm³ de volume), (3) *C* (2,65 cm de altura, 4,9 cm de diâmetro interno, 50 cm³ de volume) e (4) *D* (5,3 cm de altura, 4,9 cm de diâmetro interno, 100 cm³ de volume). Os cilindros para as amostras coletadas pelos métodos *A* e *B* (Figura 1A) foram introduzidos diretamente no solo por um castelo de madeira e martelo de ferro revestido com borracha, com uma massa de aproximadamente 1,2 kg. Para os métodos *C* e *D* (Figura 1B) os cilindros são introduzidos no solo no interior de uma caçamba com uma haste de 15 cm, onde se rosqueam dois cabos de 40 cm, permitindo coletar amostras até 1m de profundidade. Para penetrar o sistema na superfície do solo foi usada uma massa de 1,6 kg

caindo de uma altura de 40 cm, no lugar da marreta de borracha, para eliminar o efeito do operador. Para os métodos *A* e *B*, após a completa introdução do conjunto dentro do solo, o solo ao redor do cilindro foi removido com a ajuda de uma espátula. O procedimento de escavação foi conduzido cuidadosamente possibilitando a extração do cilindro contendo a amostra de solo que foi usada nas medidas de densidade. Alguns cuidados foram necessários durante este procedimento visando minimizar vibrações e possíveis compactações que poderiam modificar a estrutura da amostra de solo. Após a coleta das amostras estas foram levadas até o laboratório onde o excedente de solo foi retirado visando deixar o volume ocupado pelo solo igual ao volume dos cilindros usados durante as amostragens.

(A)

(B)

Figura 1. Equipamentos usados para a coleta das amostras de solo. (A) Métodos A e B e (B) Métodos C e D.

As análises de TC foram realizadas em vinte amostras (cinco para cada tipo de amostrador) cuidadosamente coletadas na superfície do solo usando os cilindros de aço descritos anteriormente.

5.2.2 Sistema tomográfico

O sistema tomográfico usado no experimento é de primeira geração com um arranjo de fonte e detector fixos, com movimentos de rotação e translação da amostra (Figura 2). A fonte radioativa é de ^{241}Am com uma atividade de 3,7 GBq que emite fótons monoenergéticos de 59,54 keV. O detector é de cintilação sólida de NaI(Tl) do tipo plano com dimensões de 7,62 x 7,62 cm. Colimadores de chumbo com dimensões de 1 mm foram ajustados e alinhados entre a fonte e o detector. Os passos angulares ($\Delta\phi$) das amostras foram de 2.25° até uma varredura de 180° , com passos lineares de 0,14 cm. Os tamanhos dos “pixels” obtidos foram de 1,0 x 1,0 mm para o método A; 1,14 x 1,14 mm para os métodos B e C; e 1,40 x 1,40 mm para o método D. O tamanho dos “pixels” foi calculado pela razão entre o diâmetro interno da amostra de solo e o número de “pixels” da matriz de reconstrução. Os dados adquiridos foram armazenados em um microcomputador e os programas de reconstrução chamados Microvis (2000), desenvolvido pela *EMBRAPA/CNPDI*A (São Carlos, SP), e Surfer (1997), desenvolvido pela *Golden Software* (Colorado, EUA), foram usados para obtenção das imagens tomográficas. A calibração do sistema tomográfico foi feita a partir da correlação linear entre os coeficientes de atenuação linear e unidades tomográficas de diferentes materiais (Pires et al., 2002). As imagens tomográficas das amostras de solo foram obtidas ao longo de sua profundidade com o feixe passando ao longo de sua região central (Figura 3).

Figura 2. Esquema do sistema tomográfico do Laboratório de Física dos Solos do CENA/USP. 1) Colimadores, 2) Detector de NaI(Tl), 3) Válvula fotomultiplicadora, 4) Fonte de alta-tensão, 5) Fonte de radiação, 6) Amplificador, 7) Analisador monocal, 8) Contador, 9) Temporizador, 10) PC, 11) Motor de passo e, 12) Amostra de solo. Re-impresso, com permissão, de Pires et al. (2002), copyright *Elsevier Science Publishers*.

Figura 3. A região em vermelho na parte central representa a fatia da amostra de solo varrida pelo feixe de radiação gama (setas azuis) e que irá fornecer a imagem tomográfica apresentada ao lado direito. Imagem esquemática para um cilindro com volume aproximado de 55 cm^3 .

Para análise quantitativa das imagens diferentes áreas retangulares foram selecionadas dentro de cada imagem das amostras de solo (Figura 4). As médias aritméticas de unidades tomográficas (UT) para cada área foram calculadas e convertidas em valores de densidade do

solo, tornando possível uma idéia geral da variabilidade espacial deste parâmetro físico, tanto em profundidade como lateralmente.

Figura 4. Áreas retangulares concêntricas usadas para análise das imagens de solo. Cada área representa a média aritmética dos “pixels” dentro da área. H representa a altura e D o diâmetro da amostra. Re-impreso, com permissão, de Pires et al. (2004b), copyright *CSIRO Publishing*.

Como diferenças nos valores de UT representam diferenças na densidade física do solo em cada ponto ou “pixel” é possível se obter distribuições de densidade ao longo do comprimento da amostra de solo e, no caso de amostras úmidas, esta distribuição de densidade inclui a distribuição da umidade. Por um outro lado, se a amostra de solo está seca, a distribuição de UT permite o cálculo dos valores de densidade do solo:

$$\rho_s = \frac{UT}{\alpha(\mu_{ms} + \mu_{mag} \cdot U)} \quad (1)$$

onde μ_{ms} e μ_{mag} ($\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) são os coeficientes de atenuação de massa do solo e da água, α é o coeficiente angular entre μ e UT, obtido a partir da calibração do tomógrafo, e U ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) representa a umidade gravimétrica do solo.

5.3 Resultados e Discussão

A figura 5 traz a regressão linear das unidades tomográficas e respectivos coeficientes de atenuação linear para os diferentes materiais usados na calibração do sistema tomográfico, apresentando um alto coeficiente de correlação ($r^2 = 0,999$), o qual é muito importante para a obtenção de imagens tomográficas com boa qualidade (PEDROTTI et al., 2003).

Figura 5. Calibração do sistema tomográfico para fótons de ^{241}Am . Os materiais homogêneos usados na calibração foram água, álcool, “nylon”, acrílico e alumínio. Re-impresso, com permissão, de Pires et al. (2004b), copyright *CSIRO Publishing*.

Os coeficientes de atenuação de massa para o solo e água foram de $0,24429 \pm 0,00250$ e $0,19890 \pm 0,00271 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$, respectivamente, os quais estão em concordância com os valores encontrados na literatura para a fonte radioativa de ^{241}Am (FERRAZ & MANSELL, 1979).

A figura 6 mostra quatro imagens tomográficas das amostras de solo obtidas para cada método de amostragem.

Figura 6. Imagens tomográficas das amostras de solo coletadas por diferentes métodos de amostragem. O sentido e a direção das setas mostram a existência de um gradiente de densidade e indicam o caminho do maior para o menor valor de ρ_s . Re-impresso, com permissão, de Pires et al. (2004b), copyright *CSIRO Publishing*.

Os planos de aquisição das imagens na figura 6 foram verticais e os dados obtidos permitiram uma análise contínua em 2-D da distribuição de densidade ao longo das amostras. Estas imagens indicam uma clara heterogeneidade nos valores de densidade do solo e a ocorrência de valores mais altos próximos às paredes dos cilindros. É possível ainda observar a existência de um gradiente de densidade para as amostras coletadas por todas as metodologias e este gradiente é evidenciado na figura 6 através de setas. Cada seta está direcionada no sentido da maior para a menor densidade e, portanto, o sentido das setas indica um aumento na densidade do solo próximo as paredes do cilindro para todas as amostras. O

menor valor de ρ_s foi encontrado na região central das amostras de solo. Para o método de amostragem A é possível observar uma compactação nas superfícies inferior e superior da amostra, provavelmente devido ao pequeno diâmetro interno do cilindro. Pires et al. (2004a) mostram, através da análise de transeptos de imagens tomográficas, que pequenos volumes amostrados podem induzir a compactação nas superfícies inferior e superior de amostras de solo.

Para a determinação do efeito de cada método de amostragem na densidade do solo, gráficos de densidade versus área foram usados (Figura 7). Esta área representa as diferentes áreas mostradas na figura 4 e para cada imagem de solo existem distintos valores de ρ_s . A tabela 1 traz os valores destas áreas para cada imagem de solo e seus respectivos valores de ρ_s .

Tabela 1 – Densidade média do solo ρ_s (g.cm^{-3}) obtida para diferentes áreas A (cm^2) das imagens de solo para os quatro métodos de amostragem (A-D).

Área	Método A		Método B		Método C		Método D	
	A	ρ_s	A	ρ_s	A	ρ_s	A	ρ_s
1	0,38	1,23±0,07	0,65	1,02±0,05	0,65	1,04±0,07	0,78	0,98±0,02
2	1,03	1,33±0,08	1,42	1,06±0,04	1,42	1,09±0,09	2,82	1,02±0,02
3	1,89	1,42±0,09	3,76	1,13±0,04	3,76	1,16±0,07	6,35	1,07±0,02
4	3,22	1,53±0,09	6,26	1,20±0,05	6,26	1,25±0,05	11,76	1,15±0,02
5	4,56	1,62±0,07	9,28	1,31±0,06	9,28	1,35±0,05	17,01	1,25±0,02
6	6,73	1,77±0,08	12,65	1,57±0,07	12,65	1,61±0,07	24,69	1,51±0,03

(A)

(B)

(C)

(D)

Figura 7. Análise da variação da densidade do solo com um aumento das áreas retangulares para as amostras de solo coletadas pelos (A) Método A; (B) Método B; (C) Método C; e (D) Método D. Re-impresso, com permissão, de Pires et al. (2004b), copyright *CSIRO Publishing*.

Os dados da tabela 1 confirmam a existência de um gradiente de densidade a partir do centro para as bordas das amostras de solo. Estes resultados indicam que existe uma compactação próxima às bordas das amostras e, conseqüentemente, um decréscimo na porosidade do solo naquelas regiões. Decréscimos na porosidade constituem uma indicação de variação na estrutura do solo, a qual pode afetar suas propriedades físicas. Modificações nas propriedades hidráulicas do solo podem conduzir a importantes problemas práticos de manejo da água em campos irrigados. A figura 7 exhibe uma boa correlação linear entre a densidade do solo e as áreas, sendo que os coeficientes angulares obtidos representam o gradiente de densidade para cada amostra de solo. As amostras de solo coletadas através do

método A apresentam o maior valor de inclinação e as amostras coletadas pelo método D o menor. As amostras coletadas pelos métodos B e C apresentaram praticamente os mesmos resultados. O maior valor da inclinação da reta para o método A indica um grande impacto causado pelo equipamento de amostragem na estrutura deste tipo de solo e o menor valor observado para o método D indica o menor dano causado durante a amostragem. Resultados similares para os métodos B e C indicam que estas metodologias têm praticamente o mesmo impacto na estrutura das amostras de solo. A figura 8 traz uma comparação de todos os métodos de amostragem e o impacto causado por eles na estrutura das amostras.

Figura 8. Comparação de todos os métodos de amostragem e seus respectivos impactos na estrutura das amostras de solo: □, Método A; ■, Método B; ○, Método C; ● e Método D. Re-impresso, com permissão, de Pires et al. (2004b), copyright *CSIRO Publishing*.

A tabela 2 e a figura 9 trazem incrementos de densidade ($\Delta\rho_s$) para diferentes incrementos de área (ΔA). Cada incremento de área é obtido através da diferença entre as áreas posterior e anterior apresentadas na figura 4. A partir da análise destes incrementos de densidade é possível notar que as maiores variações de ρ_s ocorreram para o método A. O método A apresenta uma variação praticamente homogênea de densidade para pequenos

incrementos de área e, como consequência, modificações mais significativas na estrutura do solo.

Tabela 2 – Incrementos de densidade obtidos para diferentes incrementos de área.

D*	Método A		Método B		Método C		Método D	
	ΔA^A	$\Delta \rho_s^A$	ΔA	$\Delta \rho_s$	ΔA	$\Delta \rho_s$	ΔA	$\Delta \rho_s$
1	0,65	0,11±0,04	0,78	0,04±0,02	0,78	0,05±0,02	2,04	0,04±0,01
2	0,86	0,09±0,02	2,33	0,07±0,01	2,33	0,07±0,03	3,53	0,06±0,01
3	1,33	0,10±0,02	2,50	0,07±0,02	2,50	0,09±0,03	5,41	0,08±0,01
4	1,34	0,09±0,04	3,02	0,11±0,02	3,02	0,10±0,01	5,25	0,11±0,02
5	2,17	0,15±0,03	3,37	0,26±0,02	3,37	0,26±0,04	7,68	0,24±0,04

* D = diferença entre áreas; ^A $\Delta A = A_{n+1} - A_n$ (cm²) e $\Delta \rho_s = \rho_{n+1} - \rho_n$ (g.cm⁻³)

Analisando a tabela 2 (colunas 2 e 3) é possível observar que para pequenos incrementos de área o incremento de densidade para o método A é muito similar aos resultados obtidos para os outros métodos. Os métodos B e C apresentam variações similares de ρ_s e o maior valor do incremento de densidade encontrado para o último valor de $\Delta \rho_s$ (última linha na Tabela 2) representa um resultado direto da compactação próximo as bordas dos cilindros. O método D tem resultados similares para os incrementos de ρ_s em comparação aos métodos B e C, porém apresenta maiores incrementos de área. Portanto, este método é o que causa o menor impacto na estrutura da amostra de solo durante o procedimento de amostragem. O menor valor de desvio padrão observado na tabela 2 (coluna 9) confirma que o método D causa o menor impacto nas amostras de solo, uma vez que o menor desvio padrão está relacionado com uma maior homogeneidade da amostra, desde que os valores de $\Delta \rho_s$ são resultantes de uma média de cinco amostras. O maior valor de ρ_s encontrado para o último incremento $\Delta \rho_s$ para o método D é devido à compactação próximo às paredes dos cilindros e ao maior valor de ΔA . É possível concluir pelos resultados obtidos neste trabalho que o

comprimento e diâmetro das amostras de solo são muito importantes em medidas de propriedades físicas do solo (ROGASIK et al., 1999; VANDERBYGAARD & PROTZ, 1999), e que pequenos volumes, como àqueles obtidos através do método A, certamente têm grande probabilidade de fornecerem resultados incorretos e não representativos.

Figura 9. Incrementos de densidade para diferentes incrementos de área para os diferentes métodos de amostragem de solo: (A) Método A; (B) Método B; (C) Método C; e (D) Método D. Cada incremento de área ΔA é obtido através da diferença entre a área posterior e anterior das áreas retangulares usadas na análise de imagens. Re-impresso, com permissão, de Pires et al. (2004b), copyright *CSIRO Publishing*.

Com a finalidade de se evitar os efeitos de possíveis artefatos ou flutuações nas imagens de acordo com o observado por outros autores (HERMAN, 1980; PAULUS et al., 1999); na avaliação da densidade do solo, as análises quantitativas foram realizadas selecionando-se sempre áreas menores do que o tamanho real da amostra no interior do cilindro. Com este procedimento tentou-se excluir ou minimizar qualquer possível artefato

causado pela transição abrupta entre a amostra de solo e as bordas do cilindro, que podem causar conhecidas distorções nas imagens tomográficas.

As maiores áreas escolhidas foram $6,73 \text{ cm}^2$ (Método A), $12,65 \text{ cm}^2$ (Métodos B e C) e $24,69 \text{ cm}^2$ (Método D) para os quais os tamanhos reais das amostras eram $7,94 \text{ cm}^2$, $13,70 \text{ cm}^2$ e $25,32 \text{ cm}^2$, respectivamente.

5.4 Conclusões

Os resultados obtidos neste estudo confirmam o efeito dos diferentes métodos de amostragem na estrutura das amostras de solo e que a compactação causada durante a amostragem provoca modificações significativas no valor de densidade do solo. Através da técnica de TC foi possível confirmar a compactação e realizar uma detalhada análise da distribuição de ρ_s ao longo das amostras de solo.

6 ATENUAÇÃO DE RAIOS GAMA NA DETERMINAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA TEXTURA NA DEFORMAÇÃO DA ESTRUTURA DO SOLO

Resumo

A atenuação de raios gama trata-se de uma técnica não invasiva de análise que permite determinações da porosidade do solo sem causar distúrbios na região de interesse analisada. A técnica apresenta ainda uma vantagem adicional de permitir medidas ponto a ponto em uma escala milimétrica em contraste as técnicas convencionais que são invasivas e somente permitem medidas em escala global. A porosidade pode ser usada como um importante parâmetro para quantificar danos a estrutura do solo, os quais afetam a aeração, movimento e retenção da água pelo solo. Neste estudo, a porosidade de três solos diferentes em textura foi medida em várias posições da amostra com o objetivo de analisar o impacto de um mesmo procedimento de amostragem na estrutura de cada tipo de solo. O sistema de atenuação de raios gama consiste de uma fonte radioativa de ^{241}Am com uma atividade de 3,7 GBq e o detector foi de NaI(Tl) com dimensões de 7,62 x 7,62 cm acoplado a uma válvula fotomultiplicadora. Colimadores de chumbo de 2 mm foram usados para a produção de feixes colimados. Os resultados obtidos mostram a presença de regiões densas próximas às paredes das amostras e que solos possuindo diferentes texturas podem sofrer deformações distintas durante a amostragem.

GAMMA-RAY BEAM ATTENUATION TO ASSESS THE INFLUENCE OF SOIL TEXTURE ON STRUCTURE DEFORMATION

Abstract

Gamma-ray beam attenuation is a non-invasive technique that permits analysis of soil porosity without disturbing the region of interest of the core sample. The technique has as additional advantage to allow measurements point by point on a millimetric scale in contrast to other methodologies that are invasive and only analyze the properties of a soil in a global scale. Soil porosity can be used as an important parameter to quantify soil structural damages, which affect soil aeration, water movement and retention. In this study, porosities of three soils different in texture were measured at various positions in order to analyze the impact of the sampling procedure on the structure of each particular soil texture. The gamma-ray attenuation system consisted of an ^{241}Am radioactive source having an activity of 3.7 GBq, collimated with cylindrical lead collimators of 2 mm diameter. The results obtained show the presence of dense regions near the edges of samples and that different soil textures can suffer distinct deformations at sampling.

6.1 Introdução

A qualidade das amostras de solo está diretamente relacionada com a sua estrutura, a qual é extremamente importante devido à influência que exerce no desenvolvimento das raízes, fauna do solo, movimento e retenção de água e gases, etc (PAGLIAI et al., 1998). Deformações na estrutura do solo podem ser induzidas por forças naturais (impacto de gotas de chuva, comportamento de expansão e contração do solo, etc) ou pela ação humana (danos

às camadas superficiais do solo devido ao tráfego de veículos e implementos agrícolas, procedimentos de amostragem do solo, etc) (PIRES et al., 2004b; PAGLIAI et al., 2003; MARSILI et al., 1998).

Uma importante propriedade física que tem sido amplamente usada para quantificar mudanças estruturais do solo é a porosidade, a qual afeta muitos processos de relevante importância que ocorrem no solo (KUTÍLEK & NIELSEN, 1994). A determinação da porosidade do solo (ϕ) fornece um “insight” a respeito de outras propriedades físicas do solo, tais como: densidade (ρ_s), condutividade hidráulica e infiltração de água no solo. A mensuração de ϕ também é importante porque esta propriedade está diretamente relacionada com o armazenamento da água no solo tanto quanto para estimativas do volume de solo existente para a movimentação da água e gases no perfil deste meio poroso.

Pires et al. (2004b) investigaram as mudanças na qualidade de amostras de um solo arenoso causadas por quatro métodos diferentes de amostragem. Os resultados obtidos revelaram que os volumes das amostras são de suma importância durante a avaliação de propriedades físicas do solo e que amostras de volume reduzido, certamente apresentam grande probabilidade de fornecer valores incorretos ou resultados não representativos durante mensurações destas propriedades (VANDENBYGAARD & PROTZ, 1999). No entanto, ainda existe uma falta informação a respeito do efeito destes dispositivos de amostragem na estrutura de solos que apresentem texturas diferenciadas. Informações a respeito do efeito dos dispositivos e equipamentos de amostragem não são somente importantes para seleção da melhor metodologia a ser utilizada, mas também para chamar a atenção dos físicos de solos a respeito da importância da qualidade estrutural das amostras de solo usadas em determinações de suas propriedades físicas.

Uma técnica precisa, rápida e não destrutiva de inspeção, tal como a atenuação de raios gama, pode ser uma alternativa interessante para determinar de forma efetiva

deformações na estrutura do solo após procedimentos de amostragem. Esta técnica permite medidas da porosidade do solo ponto a ponto em escala milimétrica sem interferir na integridade física da amostra (POTTKER & APPOLONI, 2001). Vomocil (1954), realizou trabalho pioneiro usando a técnica de atenuação de raios gama na medição de variações na densidade do solo. Posteriormente, De Swart e Groenevelt (1971) realizaram medidas da umidade do solo (θ) usando fonte radioativa de ^{241}Am e Olesen (1973) estudou variações de θ em solos expansivos. A utilização da técnica de atenuação de raios gama tem sido reportada na literatura por vários autores, particularmente por Reichardt (1965), Coppola e Reiniger (1974), Ferraz e Mansell (1979), Oliveira et al. (1998) e Vaz et al. (1999).

Os objetivos deste estudo foram investigar a sensibilidade da técnica de atenuação de raios gama como método para a avaliação de deformações na estrutura de solos de diferentes texturas e indicar qual tipo de textura de solo sofre o menor impacto durante a amostragem.

6.2 Material e Métodos

6.2.1 Amostragem do solo

As amostras de três solos, diferentes em textura, caracterizados como: latossolo vermelho-amarelo distrófico (LVAd), nitossolo vermelho eutrófico (NVe) e latossolo vermelho distrófico (LVd), segundo a classificação da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, foram amostradas nas Fazendas Sertãozinho e Areão (USP/ESALQ) e na Fazenda do IAC, ambas situadas em Piracicaba (22°40' S; 47°38' W; 580 m acima do nível do mar). Para a coleta foram utilizados cilindros de alumínio de Kopecky, com borda biselada, de 3,0 cm de altura, 5,0 e 4,8 cm de diâmetros externo e interno e volume aproximado de 55 cm³. Um total de nove amostras, três para cada solo, foram coletadas na região superficial. O período escolhido para a coleta das amostras foi três dias após uma chuva com intensidade média de

50 mm. O procedimento de amostragem consistiu inicialmente em se realizar a limpeza das áreas onde os cilindros seriam introduzidos visando evitar, na coleta, possíveis raízes mortas ou pedaços de outros objetos que estivessem presentes na camada superficial. Com o objetivo de diminuir o efeito da variabilidade espacial do solo a coleta das amostras foi feita com cada uma distando poucos centímetros da outra. Após este procedimento, os cilindros de alumínio foram posicionados verticalmente a camada superficial do solo tomando-se o devido cuidado para se evitar inclinações nos mesmos, o que poderia acarretar em sérios problemas de amostragem, tais como compactação ou rachaduras das amostras. O cilindro de alumínio, após o posicionamento inicial, foi introduzido alguns poucos milímetros no solo através da ajuda de um martelo de borracha. Para se evitar inclinações do cilindro durante sua introdução utilizou-se uma pequena tábua plana sobre a parte superior do cilindro, onde foram desferidos golpes com um martelo de borracha. Após o cilindro penetrar estes poucos milímetros na superfície um outro cilindro de aço semelhante ao primeiro, porém com as bordas um pouco mais largas, foi posicionado acima do primeiro (Figura 1A). Estando os dois cilindros alinhados (Figura 1B), o conjunto foi lentamente introduzido no solo através de golpes com o martelo de borracha sobre a tábua plana (Figura 1C), até que o primeiro cilindro, no qual a amostra de solo foi coletada, estivesse a aproximadamente 3 cm da superfície. Depois da introdução do primeiro cilindro uma pequena espátula foi utilizada para a sua retirada através de escavações cuidadosas ao redor do cilindro cravado. Este foi então retirado tomando-se o devido cuidado para que a amostra de solo apresentasse sobras nas duas extremidades do cilindro. Este excesso de solo foi posteriormente cuidadosamente removido em laboratório para que o volume ocupado pela amostra fosse o mesmo do cilindro.

Figura 1. Diagrama esquemático do procedimento de amostragem. (A) Cilindros de alumínio e de aço; (B) Acoplamento dos cilindros de alumínio e de aço e (C) Coleta da amostra de solo.

6.2.2 Instrumentação e arranjo experimental

A porosidade do solo foi monitorada usando uma fonte radioativa de ^{241}Am tendo uma atividade de 3,7 GBq emitindo fótons monoenergéticos de 59,54 keV. O detector foi de cintilação sólida de NaI(Tl) com dimensões de 7,62 x 7,62 cm acoplado a uma válvula fotomultiplicadora. Colimadores circulares de chumbo foram ajustados e alinhados entre a fonte ($D = 2 \text{ mm}$) e o detector ($D = 4,5 \text{ mm}$). Como a fonte e o detector encontram-se fixos, a amostra de solo foi movimentada perpendicularmente ao feixe de radiação e varrida em sete diferentes posições (P) (0,41; 1,04; 1,76; 2,55; 3,32; 4,04 e 4,66 cm) usando um motor de passo controlado por computador. Um diagrama esquemático do conjunto experimental é apresentado na figura 2. A fonte radioativa e o detector foram mantidos a uma distância de 22 cm um do outro e os coeficientes de atenuação foram obtidos nas diferentes posições

indicadas anteriormente, através da equação de Beer-Lambert. Um tempo de contagem de 30 s foi usado para cada posição com a realização de três repetições para cada posição.

Figura 2. Diagrama esquemático do conjunto experimental. (1) Castelo de Pb; (2) Fonte radioativa de ^{241}Am ; (3) Amostra de solo; (4) Parede de Pb; (5) Colimador de Pb; (6) Detector de cintilação sólida de NaI(Tl); (7) Válvula fotomultiplicadora; (8) Fonte de alta-voltagem; (9) Amplificador; (10) Analisador monocanal e (11) Contador e temporizador.

6.2.3 Análise dos dados

As medidas da porosidade das amostras de solo pela técnica de atenuação de raios gama foram feitas usando a seguinte equação (PHOGAT & AYLMORE, 1989):

$$\phi = \left(1 - \frac{\mu_s}{\mu_p} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

onde ϕ representa a porosidade do solo, μ_p e μ_s são os coeficientes de atenuação linear para a densidade de partículas e para a posição cruzada pelo feixe de radiação ao longo da amostra de solo.

O valor do coeficiente de atenuação linear para cada um dos solos na densidade de partículas depende da relação linear entre μ_s e ρ_s (CESAREO et al., 1994) obtida a partir de amostras de solo compactadas artificialmente (OLIVEIRA et al., 1998). O procedimento de compactação foi obtido preenchendo-se camadas de alguns centímetros de solo em uma caixa de acrílico (10 x 10 x 10 cm) e compactando essas camadas com um martelo de ferro pequeno. Foram obtidos cinco valores diferentes de densidade para cada um dos solos. O valor de μ_p foi determinado a partir da extrapolação da equação de ajuste linear de μ_s e ρ_s para o valor de densidade de partículas de cada um dos solos. Detalhes a respeito do método usado para a determinação da densidade de partículas podem ser encontrados em Flint e Flint (2002). O procedimento usado para computar o desvio padrão da estimativa, o intervalo de confiança da inclinação da reta de regressão linear e o erro padrão de μ_p obtido a partir da regressão linear encontra-se descrito em Helsel e Hirsch (1992).

6.3 Resultados e Discussão

Os coeficientes de atenuação de massa obtidos foram: $0,24191 \pm 0,00301$ (LVAd), $0,31405 \pm 0,00288$ (NVe) e $0,29535 \pm 0,00340 \text{ cm}^2.\text{g}^{-1}$ (LVd). Estes valores estão em acordo com aqueles encontrados na literatura para solos brasileiros (FERRAZ, 1974).

A linearidade entre o coeficiente de atenuação linear e a densidade dos diferentes solos em textura é mostrada na figura 3.

Figura 3. Relação entre o coeficiente de atenuação linear e a densidade para o latossolo vermelho-amarelo distrófico (LVAd), nitossolo vermelho eutrófico (NVe) e latossolo vermelho distrófico (LVd). Sy.x é o desvio padrão da estimativa.

Como pode ser visto a partir da figura 3, todos os solos demonstraram um comportamento de linearidade no coeficiente de atenuação com o aumento da densidade. O

alto valor dos coeficientes de correlação (r^2) foi essencial para a obtenção de valores de μ_p com boa exatidão e representa a boa resposta do sistema de raios gama para fornecer bons valores de porosidade do solo. Um maior valor de r^2 , entre solos, pode estar relacionado com diferenças no procedimento de compactação, o qual provavelmente pode ter causado heterogeneidades entre as camadas compactadas na caixa de acrílico preenchida com os solos NVe e LVd. A inclinação da reta entre μ_s e ρ_s , para os diferentes solos, não apresentou grandes variações e, provavelmente, ocorreu como resultado de diferenças na composição atômica de cada um dos solos (APPOLONI & RIOS, 1994). Para valores fixos de densidade física e energia dos fótons o coeficiente de atenuação linear torna-se uma função somente do número atômico (CESAREO et al., 1994). O solo NVe apresentou o maior valor de coeficiente angular enquanto o LVAd o menor. O maior valor da inclinação para o NVe indica que para um mesmo incremento de densidade ($\Delta\rho$) este solo irá apresentar as maiores variações de $\Delta\mu$. Como consequência, pequenas mudanças em ϕ , para o NVe, podem ser detectadas com uma maior segurança do que para os outros dois solos devido ao erro ($\sigma\phi$) associado a incerteza do processo de decaimento radioativo.

Os resultados de ρ_p e μ_p , estimado a partir da extrapolação da reta de regressão linear para o valor de densidade de partícula, são apresentados na tabela 1. Os valores de densidade de partículas estão em concordância com aqueles encontrados na literatura para solos arenosos e argilosos (GROHMANN, 1960).

Tabela 1 – Densidade de partículas e coeficientes de atenuação linear estimado a partir da extrapolação das retas de regressão linear para o valor da densidade de partículas dos solos estudados.

Tipo de solo	ρ_p (g.cm⁻³)*	μ_p (cm⁻¹)**
<i>LVAd</i>	2,55 ± 0,02	0,59930 ± 0,06945
<i>NVe</i>	2,68 ± 0,01	0,79897 ± 0,11431
<i>LVd</i>	2,54 ± 0,03	0,70602 ± 0,11537

* O desvio padrão da ρ_p representa um valor médio de cinco repetições; O erro padrão de μ_p foi calculado a partir do modelo de regressão (HELSEL & HIRSCH, 1992).

A figura 4 apresenta os resultados do impacto do procedimento de amostragem na porosidade de cada um dos solos, diferentes em textura, usados neste estudo.

(A)

(B)

(C)

Figura 4. Porosidade medida pela técnica de atenuação de raios gama em diferentes posições (P) das amostras de solo.

Como pode ser visto a partir da figura 4, os valores de ϕ variam significativamente, refletindo variações na estrutura do solo para as três diferentes texturas de solo resultantes do procedimento de amostragem. Os dados seguidos das mesmas letras na figura 4 mostram valores médios que são estatisticamente iguais de acordo com o teste estatístico de Scheffe ($P < 0,05$). As porosidades foram calculadas a partir da equação 1 usando os valores extrapolados de μ_s na densidade de partícula e o valor de μ_s ao longo das diferentes posições das amostras cruzadas pelo feixe de radiação. A figura 4 mostra uma clara heterogeneidade dos valores de ϕ e a ocorrência de valores maiores na posição central (P4) das amostras de solos. Existe, portanto, um gradiente de densidade para todas as texturas de solo como aquele registrado por Pires et al. (2004b) usando imagens obtidas por tomografia computadorizada. Análises de ϕ para o solo de textura médio-arenosa (Figura 4A) confirmam a existência de regiões compactadas próximas às paredes do cilindro e as reduções nos valores médios de ϕ entre P4 e P1-P7 (posições próximo às bordas do cilindro) foram de 20,7 % e 23,0 %, respectivamente. Para os solos com textura mais argilosa (Figuras 4B e 4C) as diminuições nos valores médios de ϕ entre P4 e P1-P7 foram de 36,1 % e 27,1 % (NVe) e 17,2 % e 17,5 % (LVd). As diferenças nos valores médios de ϕ entre P4 e P1, por um lado, e entre P4 e P7, por outro, foram estatisticamente insignificantes para o LVd; os outros dois solos apresentaram gradientes de ϕ estatisticamente significativos. Embora, as diferenças estatísticas entre P4 e P1-P7 tenham sido insignificantes estatisticamente para o LVd, uma variação de aproximadamente 17,0 % é bastante importante do ponto de vista dos fenômenos físicos do solo. Reduções na porosidade total do solo ocasionam reduções de sua macroporosidade, em tamanho e continuidade, causando pequenos efeitos em sua microporosidade (HILLEL, 1982). Estes danos nas amostras de solo podem afetar a determinação de outras medidas físicas, tais como: resistência à penetração, potencial mátrico, condutividade hidráulica, etc.

A menor variabilidade do solo entre amostras para o LVAd (ver Figura 4) pode ser atribuído devido a maior facilidade de coletar solos com esta textura em relação aos outros dois solos que são de textura argilosa. A maior variabilidade para os solos argilosos pode ter sido induzida pela dificuldade na coleta destes tipos de solos bem como a presença de raízes, uma vez que estes solos foram coletados na camada superficial próximo a uma região cultivada com plantas de café (NVe) e sobre floresta (LVd). Pires et al. (2005c) registraram um grande número de regiões de baixo valor de densidade (macroporos), através da análise em duas dimensões de imagens tomográficas, em um trabalho conduzido para os solos argilosos utilizados neste trabalho. A presença destes macroporos podem explicar também a maior variabilidade para os solos NVe e LVd.

6.4 Conclusões

Pelos resultados aqui apresentados fica claro que a técnica de atenuação de raios gama é uma ferramenta valiosa para a identificação de possíveis variações na estrutura do solo devido a procedimentos de amostragem e na indicação de que diferentes solos em textura podem exibir distinções na qualidade das amostras coletadas. A maior redução do valor médio da porosidade do solo entre o centro e as bordas das amostras ocorreu para o NVe, seguido pelos solos LVAd e LVd. Embora, solos com textura média sejam mais susceptíveis a compactação (MOOLMAN, 1981), a maior redução de ϕ para o NVe pode ter sido devido ao número de impactos (aproximadamente dez) usados para introduzir o cilindro na superfície deste tipo de solo. No entanto, é muito importante prestar a atenção que possíveis danos à estrutura do solo estão principalmente relacionados à umidade do solo durante o procedimento de amostragem, e devido a este fato, a porcentagem de redução na porosidade, para os diferentes solos usados neste experimento, podem variar a cada coleta.

7 APLICAÇÃO DA TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS GAMA NA ANÁLISE DA ESTRUTURA DE AMOSTRAS USADAS NA DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DO SOLO

Resumo

Vários estudos têm mostrado que as propriedades físicas de um solo podem variar significativamente ao longo de distâncias relativamente pequenas. Esta variabilidade ocorre devido à natureza do solo, práticas de manejo agrícola e procedimentos de amostragem. Neste estudo, a tomografia computadorizada de raios gama foi usada como uma ferramenta para avaliar a qualidade de amostras de solo usadas em determinações de suas propriedades físicas. Um tomógrafo de primeira geração com uma fonte de ^{241}Am e um detector de cintilação sólida de NaI(Tl) foi usado. Os resultados obtidos neste trabalho mostram que a tomografia computadorizada pode fornecer informações importantes sobre a estrutura do solo, as quais podem auxiliar na escolha das amostras mais representativas a serem usadas em determinações de propriedades físicas do solo.

APPLICATION OF γ -RAY COMPUTED TOMOGRAPHY TO ANALYSIS OF SOIL STRUCTURE BEFORE DENSITY EVALUATIONS

Abstract

Several studies have shown that physical properties of a soil may vary significantly over relatively short distances. This variability is due to the nature of the soil, agricultural management practices and sampling procedures; this study is focused on the former factor. γ -

Ray tomography was used as a tool to evaluate the quality of soil samples collected for estimating physical characteristics of the soil and to detect possible damage to the soil in the process of sampling. A first-generation tomograph with an ^{241}Am source and a $3'' \times 3''$ NaI(Tl) scintillation crystal detector coupled to a photomultiplier tube was employed. The results show that computed tomography can provide an insight into the soil sample structure, which helps to select samples that are best suited for evaluation of physical characteristics.

7.1 Introdução

As propriedades físicas do solo podem variar significativamente em distâncias relativamente pequenas, *e.g.*, poucos metros dentro de uma determinada área experimental (BECKETT & WEBSTER, 1971). Os parâmetros físicos de um solo variam, em parte, devido à natureza heterogênea do solo; esta heterogeneidade conduz, em particular, a diferenças no desenvolvimento de raízes e crescimento das plantas. A heterogeneidade do solo ocorre como um resultado do efeito da interação de vários processos naturais, agindo no perfil do solo, ou por modificações na sua estrutura induzidas pela ação humana durante o uso da terra. A variabilidade dos parâmetros físicos do solo tem sido intensamente discutida na literatura, particularmente por Warrick *e* Nielsen (1980), Reichardt et al. (1987), Brooker (2001), Gobin et al. (2001) e Herbst *e* Diekkrüger (2002).

Para determinações de alguns parâmetros físicos do solo, em laboratório, é preciso que as amostras sejam coletadas em cilindros. Neste caso, além da variabilidade espacial intrínseca do solo, um outro problema que pode ocorrer advém de possíveis deformações na estrutura do solo durante amostragem (RAMSEY, 1997; RAMSEY et al., 1999). Essas deformações ocorrem na forma de compactações no interior das amostras coletadas em cilindros. A compactação envolve o re-arranjo das partículas que constituem a estrutura do

solo, causando diminuição em sua porosidade e, conseqüentemente, aumento em sua densidade (REICHARDT & TIMM, 2004). Portanto, durante um evento de compactação o sistema poroso do solo é afetado, influenciando o movimento de nutrientes, distribuição de raízes, transferência de calor, etc.

Incertezas a respeito da representatividade das amostras de solo podem afetar a interpretação de alguns parâmetros físicos do solo, principalmente, àqueles relacionados ao movimento e retenção de água. Por exemplo, as determinações da condutividade hidráulica e da curva de retenção (MORAES et al., 1993b) podem conduzir a resultados estranhos, devido a mudanças na distribuição do tamanho, formato e arranjo dos poros que constituem o solo. Portanto, para boas determinações dos parâmetros físicos e hidrológicos do solo são necessárias amostras que sejam representativas e técnicas não destrutivas de inspeção, *e.g.*, a tomografia computadorizada (TC), podem ser usadas com sucesso na avaliação da qualidade destas amostras.

A tomografia computadorizada trata-se de uma técnica não invasiva que permite a obtenção de imagens de materiais com boa qualidade. Na ciência do solo a TC tem sido utilizada para: (i) estudar o movimento de água no solo (CRESTANA et al., 1985); (ii) quantificar a distribuição espacial de raízes (PERRET et al., 1999); (iii) medir a macroporosidade dos solos influenciada por práticas de manejo (GANTZER & ANDERSON, 2002); (iv) avaliar a reabilitação de solos devido à ação de minhocas (LANGMAACK et al., 2002; JÉGOU et al., 2002); e (v) analisar a compactação de solos tratados com lodo de esgoto induzida pela ação de implementos agrícolas (PIRES et al., 2003).

O objetivo deste estudo foi aplicar a técnica de tomografia computadorizada de raios gama na avaliação da qualidade de amostras a serem usadas em determinações de propriedades físicas do solo e na seleção das amostras mais representativas.

7.2 Material e métodos

7.2.1 Amostragem do solo

Amostras de um solo caracterizado como latossolo vermelho-amarelo distrófico (LVAd), segundo a classificação da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, foram coletadas na Fazenda Sertãozinho situada no campus da Universidade de São Paulo em Piracicaba (22°4' S; 47°38' W; 580 m acima do nível do mar). Seis amostras (3,0 cm de altura, 4,8 cm de diâmetro interno e volume aproximado de 55 cm³) foram coletadas na superfície do solo (3-8 cm) usando-se cilindros de alumínio. O procedimento de amostragem do solo encontra-se descrito em detalhes no capítulo 6 (*seção material e métodos*).

7.2.2 Tomografia computadorizada

Durante a tomografia de uma dada amostra de solo um número chamado unidade tomográfica (UT) é gerado para cada ponto da amostra cruzada pelo feixe; esse número está relacionado com o coeficiente de atenuação linear μ (cm⁻¹). A UT está linearmente relacionada com a unidade Hounsfield (UH). A água é usada como meio de referência para a UH (para a água, UH=0); para a UT o meio de referência é o ar que apresenta o mínimo valor de μ . Para o solo, a UT diz respeito às contribuições das partículas minerais, matéria orgânica, água e ar, tornando os valores de μ diferentes para cada caminho cruzado pelo feixe de radiação. Usualmente, a atenuação causada pelo ar contido no solo é insignificante quando comparada com àquela oriunda das partículas e água do solo e pode ser desprezada.

Diferenças nos valores de UT associadas a cada ponto da matriz do solo são devido a diferenças na atenuação da radiação pelo solo e água. Na imagem tomográfica, regiões

escuras representam pontos com alto valor de μ e regiões claras a baixos valores. Variações entre essas duas regiões estão associadas com diferenças na densidade física da amostra.

Em solos não-saturados, a água encontra-se retida nos poros menores, enquanto que o ar difunde-se nos poros maiores, e a quantidade de ar está inversamente relacionada à quantidade de água. A densidade do solo é definida pela razão entre a massa de solo e o seu volume, estando inversamente relacionada à porcentagem de vazios que constituem a estrutura do solo. Quando a estrutura apresenta grandes poros (macroporos), *e.g.*, causados pela ação de minhocas, raízes mortas ou procedimentos de amostragem mal conduzidos, determinações da densidade podem levar a obtenção de valores sub-estimados de ρ_s .

As tomografias foram feitas nas amostras de solo possuindo valores bastante baixos de umidade. A densidade do solo foi obtida usando a seguinte equação: $\rho_s = [(UT/997,72) - (0,199\theta)]/0,249$; onde θ ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) representa a umidade volumétrica do solo. O procedimento usado na obtenção dos valores baixos de umidade foi manter as amostras em contato com o ar até atingirem um valor residual de θ . Após isto, as amostras foram envolvidas em filme plástico e submetidas à tomografia. As amostras foram secas ao ar visando evitar a influência da umidade nas medidas de ρ_s .

O sistema de varredura consiste de um tomógrafo de primeira geração de raios gama possuindo uma fonte radioativa é de ^{241}Am que emite fótons gama com uma energia de 59,54 keV e possui uma atividade de aproximadamente 3,7 GBq. A detecção dos fótons gama é feita através de um detector de NaI(Tl) do tipo plano com dimensões de 7,62 x 7,62 cm. Na saída da fonte e na entrada do detector foram fixados colimadores de chumbo de 1 mm e 4,5 mm de diâmetro para evitar que fótons espalhados de menor energia (secundários) fossem detectados (fator "build up"). Os passos angulares para as amostras de solo utilizadas neste experimento foram de $2,25^\circ$ até uma completa rotação de 180° . Os passos lineares foram de 0,14 cm. O tamanho dos "pixels" foi de 1,14 x 1,14 mm, calculado pela razão entre o diâmetro interno da

amostra de solo e o número de “pixels” da matriz de reconstrução. Para a reconstrução das imagens tomográficas foram utilizados os programas Microvis (2000), desenvolvido pela *EMBRAPA-CNPDIA* (São Carlos, Brasil), e Surfer (1997), desenvolvido pela *Golden Software* (Colorado, Estados Unidos). A calibração do sistema tomográfico foi obtida através da correlação linear entre os coeficientes de atenuação linear e as unidades tomográficas de diferentes materiais (PIRES et al., 2002). As imagens tomográficas das amostras de solo foram obtidas ao longo de sua profundidade com o feixe passando ao longo de sua região central (ver Figura 3 – *Seção Material e Métodos do Capítulo 5*).

Para a análise das imagens cada seção tomográfica foi dividida em quinze áreas quadradas compondo cinco blocos com cada um tendo três áreas (Figura 1). Os valores médios de UT para cada área quadrada fornecem uma idéia da variabilidade da estrutura do solo, tanto em profundidade quanto lateralmente (ao longo dos blocos).

Figura 1. Imagem da amostra de solo dividida em blocos e áreas quadradas. Os dados obtidos permitiram uma análise contínua da distribuição de densidade dentro de cada amostra. Re-impresso, com permissão, de Pires et al. (2005b); copyright *Elsevier Science Publisher*.

Visando evitar o efeito de possíveis artefatos nas imagens tomográficas, como observado por outros autores (CRUVINEL et al., 1990; PAULUS et al., 1999), as análises quantitativas dos dados foram feitas selecionando áreas menores do que o tamanho real das amostras no interior dos cilindros.

7.3 Resultados e Discussão

A tabela 1 traz os valores médios de UT para as áreas quadradas e blocos para o LVAd.

Tabela 1 – Distribuição dos valores de unidade tomográfica (UT) para as áreas quadradas (Q) e blocos (B) para as seis amostras do LVAd.

Região	Amostra					
	1	2	3	4	5	6
<i>Q1</i>	453 (5,4)	440 (4,8)	427 (7,9)	418 (8,9)	421 (5,3)	408 (4,0)
<i>Q2</i>	445 (4,2)	427 (8,6)	435 (6,7)	425 (11,4)	433 (4,4)	426 (5,5)
<i>Q3</i>	424 (7,9)	449 (4,2)	422 (7,4)	427 (6,7)	437 (4,9)	435 (6,3)
B1	435 ^a (2,5)	439 ^a (2,5)	428 ^a (1,6)	423 ^{a,b} (1,2)	430 ^a (1,9)	423 ^a (1,4)
<i>Q4</i>	419 (7,3)	441 (5,1)	420 (5,3)	350 (22,5)	418 (6,2)	424 (5,5)
<i>Q5</i>	410 (5,1)	394 (11,5)	397 (5,4)	358 (20,1)	406 (5,4)	404 (4,5)
<i>Q6</i>	406 (7,1)	436 (8,9)	418 (5,3)	394 (6,2)	395 (6,2)	410 (5,1)
B2	412 ^{a,b} (1,5)	424 ^a (5,9)	412 ^{b,c} (3,2)	367 ^c (6,3)	406 ^a (2,9)	413 ^a (2,4)
<i>Q7</i>	399 (9,1)	444 (8,3)	409 (7,7)	383 (9,0)	331 (26,5)	390 (10,7)
<i>Q8</i>	389 (7,1)	409 (4,7)	395 (4,7)	401 (4,6)	346 (18,2)	389 (5,3)
<i>Q9</i>	415 (7,9)	416 (10,4)	403 (6,5)	408 (6,2)	391 (10,9)	417 (5,3)
B3	401 ^b (3,2)	423 ^a (4,5)	402 ^c (1,7)	397 ^b (3,3)	356 ^b (8,7)	399 ^a (4,0)
<i>Q10</i>	426 (5,9)	443 (6,1)	410 (7,2)	413 (7,9)	401 (10,9)	410 (5,4)
<i>Q11</i>	417 (5,6)	433 (6,6)	405 (5,2)	408 (5,6)	406 (6,9)	397 (6,5)
<i>Q12</i>	417 (8,1)	442 (7,2)	413 (6,8)	382 (9,3)	394 (7,2)	419 (5,4)
B4	420 ^{a,b} (1,2)	439 ^a (1,4)	409 ^c (9,8)	401 ^b (4,2)	400 ^a (1,5)	409 ^a (2,7)
<i>Q13</i>	385 (13,5)	427 (5,5)	417 (6,6)	421 (6,4)	410 (9,5)	404 (6,6)
<i>Q14</i>	435 (4,7)	441 (8,1)	426 (12,0)	447 (4,4)	442 (5,1)	419 (5,7)
<i>Q15</i>	435 (6,8)	466 (5,8)	431 (7,8)	446 (4,4)	434 (5,7)	426 (5,4)
B5	418 ^{a,b} (6,9)	445 ^a (4,5)	425 ^{a,b} (1,6)	438 ^a (3,4)	429 ^a (3,9)	416 ^a (2,6)
Média	417 ^{α,β} (4,1)	434 ^β (3,9)	415 ^{α,β} (2,9)	405 ^α (6,9)	404 ^α (7,9)	412 ^{α,β} (3,4)

Os números em frente dos parênteses representam valores médios; os números entre parênteses são coeficientes de variação (%). Para um dado quadrado, o coeficiente de variação diz respeito aos valores de UT de diferentes pixels individuais. Para o bloco, o coeficiente de variação diz respeito aos valores de UT das três áreas quadradas. Os coeficientes de variação na última linha dizem respeito aos valores de UT médios obtidos a partir dos cinco blocos. Os conjuntos de valores médios seguidos pela mesma letra são estatisticamente idênticos pelo teste de Duncan ($P < 0,05$).

Como pode ser visto a partir da tabela 1, os valores de UT variam significativamente, refletindo mudanças na estrutura do solo resultantes de forças naturais ou artificiais. O valor médio de UT foi 415 com um coeficiente de variação (CV) de 2,6 %. A densidade do solo foi calculada a partir da equação apresentada na seção material e métodos usando θ e os correspondentes valores de UT para cada amostra (ver a última linha da Tabela 1). A densidade média do solo foi obtida com base nos valores de ρ_s de todas as amostras. Os valores dos coeficientes de atenuação usados foram: $0,24191 \pm 0,00301 \text{ cm}^2.\text{g}^{-1}$ para o LVAd e $0,19890 \pm 0,00271 \text{ cm}^2.\text{g}^{-1}$ para a água. A inclinação da reta de calibração do tomógrafo entre μ e UT foi 0,953 cm; o coeficiente de correlação (r^2) encontrado foi 0,999. Este alto coeficiente de correlação mostra uma boa concordância entre μ e UT sendo um resultado importante para a obtenção de imagens tomográficas de boa qualidade.

A densidade média do solo determinada a partir dos dados tomográficos foi $1,72 \text{ g.cm}^{-3}$ com um CV de 2,6 %. Este coeficiente de variação é menor do que àqueles reportados por Grossman e Reinsch (2002) e Warrick e Nielsen (1980), que observaram variações de 7 % em três diferentes áreas experimentais. Grossman e Reinsch (2002) sugeriram que um tamanho apropriado de amostra para medidas de ρ_s deve possuir pelo menos 7,5 cm de diâmetro (preferencialmente 10 cm) e sua altura não deve exceder seu diâmetro.

A distribuição espacial de UT pode ser usada para caracterizar a estrutura do solo de forma não invasiva (Figura 2), algo que não pode ser feito pelas técnicas tradicionais usadas em ciência do solo. Nas figuras 2D e 2E, podem ser observadas pequenas regiões com baixos valores de UT no interior das amostras 4 e 5, as quais, provavelmente, podem ser resultantes do procedimento de amostragem, presença de raízes ou minhocas; uma vez que todas as amostras de solo foram coletadas na região superficial (0-10 cm). Como estes buracos possuem uma estrutura tipicamente tubular, pode-se dizer que são oriundos da atividade de

minhocas no interior deste solo. As áreas destes buracos nas amostras 4 e 5 são 13,09 e 15,38 mm², respectivamente.

Figura 2. As regiões escuras nas imagens tomográficas correspondem a pontos com maiores valores de densidade do solo (ρ_s) e as claras aos menores. A escala de tons de cinza traz a distribuição de valores de ρ_s . Re-impresso, com permissão, de Pires et al. (2005b); copyright *Elsevier Science Publisher*.

A técnica de TC é particularmente valiosa porque torna possível selecionar as melhores amostras para a avaliação de propriedades físicas do solo e selecionar as regiões mais representativas dentro de uma dada amostra. Por exemplo, as regiões brancas com baixo valor de ρ_s nas figuras 2D e 2E têm afetado os valores médios de UT para o bloco 2 da amostra 4 e bloco 3 da amostra 5. Caso esses blocos fossem eliminados, os valores de UT seriam 411, para a amostra 4, e 412, para a amostra 5. Conseqüentemente, o valor médio de ρ_s para este solo seria $1,73 \text{ g.cm}^{-3}$. Em outras palavras, devido a estas regiões com baixos valores de ρ_s , a densidade média do solo foi sub-estimada em $0,01 \text{ g.cm}^{-3}$. Como pode ser visto a partir da tabela 1, somente estas duas amostras demonstraram diferenças significativas em relação a amostra 2 de acordo com o teste de Duncan. Esta diferença estatística desaparece com os novos valores de UT.

Os dados para as amostras 4 e 5 estão em concordância com as imagens mostradas nas figuras 2D e 2E; os menores valores de UT foram encontrados para os blocos com regiões brancas. Para todas as amostras, os valores de UT diminuem a partir das paredes do cilindro até a parte central da amostra, resultado que sugere uma compactação do solo durante amostragem. Pires et al. (2004b) encontraram modificações na estrutura de amostras de solo coletadas em anéis volumétricos; e Grossman e Reinsch (2002) registraram resultados similares. As diferenças entre os valores de UT para o bloco 3, por um lado, e para os blocos 1 e 5, por outro, foram estatisticamente insignificantes, $P < 0,05$, somente para as amostras 2 e 6 (ver Tabela 1); todas as outras amostras apresentaram gradientes de UT. Este resultado confirma que os procedimentos de amostragem causam compactação próxima as paredes do cilindro afetando a representatividade das amostras de solo. Esta compactação atua diretamente na relação entre micro e macroporos do solo (STONE et al., 2002).

7.4 Conclusões

O critério utilizado para eliminar algumas regiões das amostras, para determinação da densidade do solo, foi o uso de imagens tomográficas. As grandes áreas brancas nas imagens provavelmente representam partes das amostras afetadas pela ação de minhocas. As amostras a serem usadas na caracterização física do solo devem apresentar o mínimo possível de modificações induzidas pelas atividades biológica e humana. A diminuição nos coeficientes de variação dos valores de UT e ρ_s , resultantes da eliminação de algumas áreas nas imagens, refletem um aumento da homogeneidade entre as amostras. Essas análises preliminares tornam possível a realização de medidas de características físicas do solo com uma menor incerteza. Portanto, para as amostras em questão, a eliminação de algumas áreas, baseada nos dados de TC, diminuiu o coeficiente de variação de ρ_s de 0,5 %.

Visando analisar o impacto das regiões compactadas próximas as paredes dos cilindros nos valores de ρ_s , foram calculados valores médios de ρ_s em uma pequena região (17,14 mm²) selecionada no centro de cada amostra. Estes cálculos resultaram em um valor médio de ρ_s de 1,64 g.cm⁻³, o qual é 0,08 g.cm⁻³ menor do que o valor médio de ρ_s determinado anteriormente. Estes cálculos adicionais, a partir destas áreas menores, foram realizados pelo fato de que algumas amostras exibiram valores de UT maiores do que 10 % entre os blocos próximos as bordas e área central das amostras. Estas diferenças marcantes na medida da densidade do solo podem ser de grande importância em projetos que envolvam manejo e conservação do solo.

8 MUDANÇAS NA ESTRUTURA DO SOLO DEVIDO A CICLOS DE UMEDECIMENTO E SECAMENTO AVALIADAS PELA TÉCNICA DE TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS GAMA

Resumo

Ciclos de umedecimento e secamento (U-S) podem causar fortes modificações na estrutura do solo, especialmente na distribuição de poros, a qual afeta a distribuição espacial e temporal da água no solo. Estas alterações apresentam importantes consequências práticas em determinações do potencial mátrico e da armazenamento de água pelo solo, amplamente usadas em irrigação. O presente trabalho teve como objetivo usar a tomografia computadorizada de raios gama (TC) na investigação de possíveis modificações na estrutura do solo induzidas por ciclos de U-S e analisar como estas alterações podem afetar as curvas de retenção da água no solo. Um tomógrafo de primeira geração com fonte radioativa de ^{241}Am foi empregado nas medidas. Amostras de três diferentes solos foram coletadas na camada superficial e submetidas a nenhum (T_0), três (T_1) e nove (T_2) ciclos de U-S. Baseado na análise de imagens foi possível detectar modificações na estrutura dos solos para todas as amostras. Perfis de unidade tomográfica permitiram identificar um aumento na porosidade do solo com o aumento do número de ciclos de U-S e possibilitaram uma quantificação dos valores médios destas porosidades. O teste estatístico (teste de Duncan) indicou que existem diferenças significativas entre tratamentos na porosidade do solo para todas as amostras após serem submetidas a contínuos ciclos de U-S.

SOIL STRUCTURE CHANGES DUE TO WETTING AND DRYING CYCLES ASSESSED BY GAMMA RAY COMPUTED TOMOGRAPHY

Abstract

Wetting and drying (W-D) cycles can cause strong modifications on soil structure, especially in pore distribution, which reflects the temporal and spatial distribution of soil water. These alterations have important practical consequences when calculating soil water storages and matric potentials, widely used in irrigation management. The present paper has as objective to use gamma ray computed tomography (GCT) as a tool to investigate possible modifications on soil structure induced by W-D cycles and to analyze how these alterations can affect soil water retention. The GCT scanner used was a first generation system with a fixed source-detector arrangement, with a radioactive gamma ray source of ^{241}Am . Soil samples were taken from profiles of three different soils and were submitted to none (T_0), three (T_1), and nine (T_2) wetting/drying cycles. Based on image analysis it was possible to detect modifications on soil structure in all samples after wetting/drying cycles for all treatments. Tomographic unit profiles of the samples permitted to identify an increase in soil porosity with the increase in the number of wetting/drying cycles and it was also possible to quantify the average porosity values. The statistical test (Duncan test) indicates that there are significant differences between treatments for all samples at $P < 0,05$.

8.1 Introdução

A estrutura do solo é influenciada por vários fenômenos, tais como: dinâmica da matéria orgânica, gênese do solo, ação humana, ciclos de umedecimento e secamento (U-S), entre outros (KUTÍLEK & NIELSEN, 1994). Um importante aspecto da estrutura do solo é a sua porosidade (ϕ), a qual consiste de um contínuo arranjo de tamanhos de poros classificados em diferentes categorias, tais como: macro, meso e microporos (OLIVEIRA et al., 1998). Valores adequados de ϕ são importantes para garantir uma boa aeração do solo, infiltração de água e distribuição de raízes, permitindo um melhor desenvolvimento das plantas.

Ciclos de umedecimento e secamento causam fortes modificações na estrutura do solo, especialmente na distribuição do tamanho de poros, a qual reflete a distribuição espacial e temporal da umidade do solo (θ). Conseqüentemente, estes processos podem afetar a retenção e o movimento de água e nutrientes no solo. Estas alterações podem ter importantes conseqüências práticas em determinações de armazenamento e potencial mátrico da água no solo, amplamente usados em irrigação.

Muitos físicos de solos têm investigado as alterações induzidas na estrutura do solo pelos mais diversos fenômenos (REGÜÉS et al., 1995; PARDINI et al., 1996; MARSILI et al., 1998; LUNDQUIST et al., 1999; DENEFF et al., 2001a). Estes pesquisadores apontam como as principais modificações àquelas causadas por fenômenos que envolvem expansão e contração de volume em solos argilosos, por ciclos de umedecimento e secamento, por compactação causada por implementos agrícolas e por ciclos de congelamento e descongelamento (em regiões com clima temperado). O comportamento de expansão e contração induz a formação de fraturas em solos argilosos afetando o movimento de água e causando fluxos preferenciais (CHERTKOV & RAVINA, 2000). A compactação devido ao tráfego de implementos agrícolas tem como conseqüência, sérias alterações na densidade do

solo afetando, principalmente, a capacidade de armazenamento de água pelo solo e o potencial mátrico. Ciclos de congelamento e descongelamento, embora pouco comuns no Brasil, causam modificações estruturais afetando também a densidade e a superfície do solo, dependendo da sua composição mineralógica.

A técnica não invasiva de tomografia computadorizada de raios gama (TC) tem sido considerada nos últimos anos como uma importante ferramenta para a investigação de possíveis modificações na estrutura do solo. Vaz et al. (1989) usou um minitomógrafo para o estudo da compactação causada por operações de preparo do solo por equipamentos pesados. Phogat et al. (1991) mostrou o potencial de tomógrafos de dupla energia em estudos não destrutivos da estrutura e estabilidade do solo. Rasiah e Aylmore (1998) usaram TC para analisar a influência de umedecimentos na estabilidade estrutural e continuidade espacial de parâmetros do solo. Perret et al. (1999) determinaram a geometria e topologia de uma rede de macroporos. Macedo et al. (1998) e Appoloni et al. (2000) aplicaram a técnica de microtomografia de raios-X para investigar finas camadas de materiais porosos e microestruturas de solos. Rogasik et al. (2003) realizaram análise da distribuição de macroporos do solo em 3-D e Pires et al. (2004a) investigaram a compactação do solo induzida pelo tráfego de implementos agrícolas e modificações na sua estrutura causadas por equipamentos de amostragem.

O presente trabalho teve como objetivo o uso da tomografia computadorizada como uma ferramenta na investigação de possíveis alterações na estrutura do solo induzidas pelos ciclos de umedecimento e secamento e analisar como estas alterações podem afetar a retenção de água pelo solo.

8.2 Material e Métodos

8.2.1 Sistema tomográfico

O sistema de varredura consiste de um tomógrafo de primeira geração de raios gama possuindo uma fonte radioativa é de ^{241}Am que emite fótons gama com uma energia de 59,54 keV e possui uma atividade de aproximadamente 3,7 GBq. A detecção dos fótons gama é feita através de um detector de NaI(Tl) do tipo plano com dimensões de 7,62 x 7,62 cm. Na saída da fonte e na entrada do detector foram fixados colimadores de chumbo de 1 mm e 4,5 mm de diâmetro para evitar que fótons espalhados de menor energia (secundários) fossem detectados (fator "build up"). Os passos angulares para as amostras de solo utilizadas neste experimento foram de 2,25° até uma completa rotação de 180°. Os passos lineares foram de 0,14 cm. O tamanho dos "pixels" foi de 1,14 x 1,14 mm, calculado pela razão entre o diâmetro interno da amostra de solo e o número de "pixels" da matriz de reconstrução. Para a reconstrução das imagens tomográficas foram utilizados os programas Microvis (2000), desenvolvido pela EMBRAPA-CNPDIA (São Carlos, Brasil), e Surfer (1997), desenvolvido pela Golden Software (Colorado, Estados Unidos). A calibração do sistema tomográfico foi obtida através da correlação linear entre os coeficientes de atenuação linear e as unidades tomográficas de diferentes materiais (PIRES et al., 2002). As imagens tomográficas das amostras de solo foram obtidas ao longo de sua profundidade com o feixe passando ao longo de sua região central (ver Figura 3 – *Seção Material e Métodos do Capítulo 5*).

Uma vez que as tomografias foram feitas nas amostras de solo com valores bastante baixos de umidade, a porosidade foi obtida combinando as equações usadas para se obter a densidade do solo via TC (PIRES et al., 2002) e àquela utilizada para o cálculo da densidade do solo pelos métodos tradicionais (KUTÍLEK & NIELSEN, 1994):

$$\phi = \left[1 - \frac{UT}{\alpha \cdot (\mu_{ms} + \mu_{mag} \cdot U) \cdot \rho_p} \right] \quad (1)$$

onde α representa o coeficiente de correlação entre μ e UT; μ_{ms} e μ_{mag} ($\text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$) os coeficientes de atenuação de massa do solo e da água, respectivamente; ρ_p ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) a densidade de partícula; U ($\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$) a umidade gravimétrica; e UT a unidade tomográfica.

Visando evitar o efeito de possíveis artefatos ou flutuações nas imagens (KAK & SLANEY, 1999) as análises quantitativas para determinar a porosidade do solo foram feitas selecionando áreas dentro do cilindro menores do que o tamanho real das amostras de solo.

8.2.2 Preparação do solo

Amostras de três solos, diferentes em textura, caracterizados como: latossolo vermelho-amarelo distrófico (LVAd), nitossolo vermelho eutrófico (NVe) e latossolo vermelho distrófico (LVd), segundo a classificação da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, foram coletadas nas Fazendas Sertãozinho e Areão (USP/ESALQ) e na Fazenda do IAC, ambas situadas em Piracicaba (22°4' S; 47°38' W; 580 m acima do nível do mar). Dezoito amostras (3,0 cm de altura, 4,8 cm de diâmetro interno e volume aproximado de 55 cm^3), seis para cada solo, foram coletadas na superfície do solo (3-8 cm) usando-se cilindros de alumínio. O procedimento de amostragem do solo encontra-se descrito em detalhes no capítulo 6 (*seção material e métodos*). O processo de umedecimento escolhido foi ascensão capilar, o qual é usado durante a obtenção de curvas de retenção da água no solo. O procedimento de umedecimento consistiu em inicialmente se manter um nível de 0,3 cm de água, a partir da base dos cilindros contendo solo, durante um período de duas horas, e após este tempo, igual quantidade de água foi acrescentada a cada duas horas até que um nível poucos milímetros abaixo do topo do cilindro fosse alcançado. Um período de vinte e quatro

horas foi necessário para se obter o umedecimento das amostras por ascensão capilar visando evitar a formação e aprisionamento de bolhas de ar, as quais poderiam causar a diminuição dos agregados do solo, mudando a sua estrutura. O procedimento usado para o secamento das amostras foi a aplicação de uma pressão (P) de 400 kPa. As amostras de solo foram submetidas a três (T_1) e nove (T_2) ciclos de umedecimento e secamento, respectivamente. As amostras testemunha (T_0) e/ou controle (C) não foram submetidas a nenhum ciclo de U-S.

As imagens tomográficas foram tomadas para valores praticamente constantes de θ visando evitar variações nas imagens devido a diferenças na umidade residual do solo após cada tratamento. O procedimento usado para se obter esses valores, quase fixos de θ , após os ciclos, foi manter as amostras em contato com o ar até um valor residual de θ ter sido alcançado. Quando as amostras alcançaram este valor residual elas foram envolvidas em filme plástico, para minimizar a possível perda ou ganho de água, e submetidas às tomografias.

8.3 Resultados e Discussão

A tabela 1 apresenta algumas características físicas dos três solos usados neste estudo.

Tabela 1 – Características físicas referentes à camada de 0-10 cm de cada um dos solos.

Característica	LVAd	NVe	LVd
<i>Areia (%)</i>	66	24	15
<i>Silte (%)</i>	6	33	44
<i>Argila (%)</i>	28	43	41
<i>Densidade do solo ($g.cm^{-3}$)</i>	1,62	1,51	1,33
<i>Porosidade (%)</i>	36,3	43,5	47,8
<i>Matéria orgânica ($g.dm^{-3}$)</i>	16,0	20,2	27,0

Os coeficientes de atenuação de massa foram obtidos usando o método descrito em Ferraz e Mansell (1979): $0,24191 \pm 0,00301$ (LVAd), $0,31405 \pm 0,00288$ (NVe), $0,29535 \pm 0,00340$ (LVd) e $0,19890 \pm 0,00271 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ (água). A calibração do tomógrafo apresentou um valor de coeficiente de correlação de 0,999.

A figura 1 traz imagens tomográficas do LVAd submetido aos diferentes ciclos de umedecimento e secamento. Estas imagens revelam uma clara tendência de modificações na estrutura do solo após os ciclos de U-S. Entre os tratamentos T_0 e T_1 a variação na estrutura não apresenta grandes modificações, mas comparando T_0 e T_2 , estas alterações tornam-se mais evidentes. Uma provável explicação é que estas modificações são resultantes de variações na distribuição de poros para este solo à medida que o mesmo foi sendo submetido a sucessivos umedecimentos e secamentos. A figura 2 traz uma análise quantitativa da variação da porosidade do solo, na fatia analisada, após os ciclos de U-S. Analisando os gráficos da figura 2 torna-se evidente um aumento na porosidade do solo com a aplicação dos sucessivos ciclos de U-S. Todas as amostras, com exceção da A4, apresentaram aumentos em ϕ com o aumento no número de ciclos. Para a amostra 4 o mesmo valor de ϕ foi encontrado para todos os tratamentos. Este aumento na porosidade do solo provavelmente ocorreu devido a modificações no volume do solo durante os sucessivos umedecimentos e secamentos. Durante o umedecimento foi observado um aumento na altura da coluna de solo e, após secamento, uma diminuição para algumas amostras. Portanto, durante os ciclos de U-S um processo de fricção, entre a coluna de solo e as paredes do cilindro, provavelmente tenha ocorrido influenciando o adequado assentamento da amostra de solo após o processo de secamento. Para o LVAd foi observado um aumento na altura da coluna de solo, próxima a parede do cilindro, para as amostras 1, 2, 5 e 6. Este aumento foi de aproximadamente 1 mm e ocorreu somente após T_1 . Para amostra 1, após T_2 , é possível observar (Figuras 1 e 2) um buraco (macroporo) com uma área de $6,44 \text{ mm}^2$. Para a amostra 2, a área do buraco observado

é de $3,41 \text{ mm}^2$ para o T_1 e aumentou para $4,31 \text{ mm}^2$ para o T_2 . Para a amostra 5, o tamanho do buraco aumentou de $15,38$ para $23,70 \text{ mm}^2$ após nove ciclos de U-S. Estes aumentos nas áreas dos buracos podem ser devido a influência da fricção entre a coluna de solo e as paredes do cilindro. Este comportamento pode explicar o aumento na porosidade do solo após os sucessivos ciclos de umedecimento e secamento.

Figura 1. Mudanças na estrutura do solo induzidas pelos ciclos de umedecimento e secamento para o LVAd. T_0 diz respeito a zero, T_1 três e T_2 nove ciclos de U-S. A escala em cores representa a distribuição de ρ_s . Re-impresso, com permissão, de Pires et al. (2005c); copyright Elsevier Science Publisher.

(A)

(B)

(C)

(D)

(E)

(F)

Figura 2. Distribuição da porosidade do solo após os ciclos de umedecimento e secamento para os três diferentes tratamentos para o LVAd. Re-impresso, com permissão, de Pires et al. (2005c); copyright *Elsevier Science Publisher*.

Hussein e Adey (1998) trabalhando com solos argilosos encontraram um progressivo aumento na porosidade do solo com sucessivos ciclos de U-S. Estes autores observaram uma modificação na estrutura de massiva, quando o solo estava sob ação de implementos agrícolas, para complexamente fracionada e lisa, após sucessivos ciclos de umedecimento e secamento. Hussein e Adey (1998) ainda determinaram que a proporção de vazios encontrados para a amostra sob a ação de implementos foi menor do que 11,3% e, após um procedimento de umedecimento por capilaridade, a porosidade observável aumentou para 23,9%, somente para um único ciclo. Estes autores chamam de porosidade observável aquela na qual os grandes poros externos e rachaduras são excluídos e, portanto, para este caso esta porosidade torna-se menor do que a porosidade real do solo. Pardini et al. (1996) também indicaram possíveis variações na rugosidade da superfície do solo, em sua porosidade e distribuição do tamanho dos poros, após ciclos de U-S. Estes autores encontraram após três ciclos um aumento na porosidade do solo induzida pela formação de rachaduras e fissuras. A presença de rachaduras não foi observada em nossas amostras de solo, embora possam ter ocorrido microfissuras. Um outro processo influenciado pelos ciclos de U-S é a agregação do solo, uma vez que a ação de hidratação e desidratação produz ciclos de retração e expansão das partículas de argila e agregados do solo. Li et al. (2004) notaram que os ciclos de U-S podem mudar o tamanho dos agregados afetando a distribuição do tamanho dos poros presentes no solo. Estes últimos autores observaram a formação de rachaduras pequenas e pouco profundas na superfície do solo após os ciclos de U-S. O LVAd usado neste estudo possui textura médio-arenosa e, portanto, eventos de expansão e contração do solo, após umedecimentos e secamentos, não ocorrem. Geralmente este tipo de comportamento pode ser identificado em alguns solos argilosos para os quais é comum encontrar-se rachaduras e/ou fissuras (CHERTKOV & RAVINA, 2000).

As figuras 3 até 6 mostram imagens tomográficas para os solos NVe e LVd e as respectivas análises da distribuição de porosidade do solo após os ciclos de U-S. Alguns solos argilosos sofrem aumento em seu volume quando umedecidos e redução quando secados. Este tipo de fenômeno pode causar modificações na estrutura do solo tal como fissuras. Estas fissuras exercem um papel importante nos processos hidrológicos que ocorrem no solo uma vez que afetam o movimento de água e as taxas de evaporação. Para os solos NVe e LVd, embora possuindo conteúdos relativamente altos de argila, não foram observadas fissuras ou rachaduras. Porém, a formação de microfissuras não pode ser descartada. As figuras 3 e 4 exibem um comportamento similar aquele observado para o LVAd, com exceção das amostras 3, 5 e 6. Estas praticamente não apresentam diferenças na porosidade do solo entre T_1 e T_2 . Para estas três amostras as alterações induzidas após três ciclos de U-S tornam-se constantes com o tempo até a aplicação de nove ciclos. O processo de umedecimento e secamento dispersa e re-organiza as partículas de argila causando modificações na estrutura do solo. Este processo pode ter ocorrido com o NVe (Figura 3) afetando a distribuição dos poros e aumentando a sua porosidade (Figura 4). O mesmo comportamento de aumento na altura da coluna de solo, próxima a parede do cilindro, foi observado para o NVe, com a evolução dos ciclos de U-S. Para as amostras 1, 4 e 6 este aumento foi de 1 mm e ocorreu somente para T_2 em comparação com T_0 e T_1 . As amostras 2 e 3 exibem diferenças de 1 mm na altura da coluna de solo a partir de T_1 . A amostra 5 não apresenta diferenças na altura da amostra volumétrica entre os tratamentos. Na figura 4 é possível observar variações na área dos buracos (macroporos) para as amostras 2, 4 e 6. Para a amostra 2 a variação da área foi de: 8,57 (T_0), 9,91 (T_1) e 15,23 mm² (T_2). A amostra 4 exibiu o mesmo comportamento da amostra 2 com um aumento de 6,47 (T_0), 8,68 (T_1) e 10,96 mm² (T_2). Para a amostra 6 somente após sucessivos ciclos de umedecimento e secamento é que ocorreu o aparecimento

de um buraco com sua área diminuindo de 9,26 para 4,83 mm². Para o NVe, o aumento na altura da coluna de solo provavelmente causou o aumento da porosidade.

Figura 3. Mudanças na estrutura do solo induzidas pelos ciclos de umedecimento e secamento para o NVe. T_0 diz respeito a zero, T_1 três e T_2 nove ciclos de U-S. A escala em cores representa a distribuição de ρ_s . Re-impresso, com permissão, de Pires et al. (2005c); copyright *Elsevier Science Publisher*.

(A)

(B)

(C)

(D)

(E)

(F)

Figura 4. Distribuição da porosidade do solo após os ciclos de umedecimento e secamento para os três diferentes tratamentos para o NVe. Re-impresso, com permissão, de Pires et al. (2005c); copyright *Elsevier Science Publisher*.

As figuras 5 e 6 apresentam os resultados para as amostras do LVd. Analisando a figura 5 é possível observar, através da análise de imagens, que os ciclos de U-S induziram alterações na estrutura do solo, mas estas modificações entre as amostras deste tipo de solo foram menores quando comparadas àquelas entre as amostras do LVAd e do NVe. Na figura 6, as amostras 2 e 3 praticamente não apresentam diferenças na porosidade do solo entre os tratamentos e as amostras 1, 5 e 6 possuem quase o mesmo valor de ϕ entre T_0 e T_1 . Para o LVd as amostras 1, 4, 5 e 6 apresentam aumentos na altura da coluna de solo, entre os tratamentos, de 1,5 mm (A1) e 1 mm (A4, A5 e A6) e este aumento ocorreu somente para T_2 em comparação aos outros tratamentos. Todas as amostras de solo, com exceção da 2 e 4, apresentam buracos (macroporos) na estrutura. As amostras 1, 5 e 6 exibem uma evolução no tamanho da área dos buracos com o aumento do número de ciclos de U-S. Para a amostra 1, é possível observar um buraco para T_0 e T_1 com áreas de 18,54 e 23,66 mm², respectivamente, e dois buracos com áreas de 6,47 e 34,67 mm² para T_2 . Para a amostra 3, o tamanho do buraco permaneceu constante entre T_0 e T_1 (aproximadamente 10,21 mm²) e apresentou um pequeno aumento para T_2 (12,89 mm²). Para a amostra 5, o tamanho do buraco diminuiu entre T_0 (9,69 mm²) e T_1 (4,31 mm²) e para T_2 a área aumentou para 6,81 mm². É possível observar ainda o aparecimento de um novo buraco com área de 7,61 mm² para a amostra 5, após nove ciclos de U-S. A amostra 6 apresenta dois buracos para cada tratamento com áreas de 23,60 e 10,51 mm² (T_0), 35,45 e 17,29 mm² (T_1) e 38,81 e 30,57 mm² (T_2). A evolução no tamanho dos buracos, com o aumento do número de ciclos de U-S, pode explicar o aumento de ϕ para o LVd.

Figura 5. Mudanças na estrutura do solo induzidas pelos ciclos de umedecimento e secamento para o LVd. T₀ diz respeito a zero, T₁ três e T₃ nove ciclos de U-S. A escala em cores representa a distribuição de ρ_s . Re-impresso, com permissão, de Pires et al. (2005c); copyright *Elsevier Science Publisher*.

(A)

(B)

(C)

(D)

(E)

(F)

Figura 6. Distribuição da porosidade do solo após os ciclos de umedecimento e secamento para os três diferentes tratamentos para o LVd. Re-impresso, com permissão, de Pires et al. (2005c); copyright Elsevier Science Publisher.

A tabela 2 mostra os valores da porosidade do solo obtidos para os três solos.

Tabela 2 – Variação na porosidade de três diferentes solos em textura submetidos a sucessivos ciclos de umedecimento e secamento.

Amostra de solo		Porosidade ϕ (%)		
<i>LVAd</i>		T_0	T_1	T_2
<i>1</i>		$33 \pm 4 (12)^a$	$34 \pm 3 (9)^a$	$36 \pm 4 (11)^b$
<i>2</i>		$30 \pm 2 (7)^a$	$30 \pm 3 (10)^a$	$33 \pm 3 (9)^b$
<i>3</i>		$33 \pm 2 (6)^a$	$33 \pm 3 (9)^a$	$35 \pm 2 (6)^b$
<i>4</i>		$35 \pm 4 (11)^a$	$35 \pm 4 (11)^a$	$36 \pm 5 (14)^a$
<i>5</i>		$35 \pm 4 (11)^a$	$36 \pm 5 (14)^{a,b}$	$37 \pm 6 (16)^b$
<i>6</i>		$34 \pm 2 (6)^a$	$34 \pm 3 (9)^a$	$36 \pm 4 (11)^b$
<i>Valor médio</i>		$33 \pm 2 (6)$	$34 \pm 2 (6)$	$35 \pm 2 (6)$
<i>NVe</i>				
<i>1</i>		$38 \pm 5 (13)^a$	$37 \pm 4 (11)^a$	$40 \pm 3 (8)^b$
<i>2</i>		$39 \pm 4 (10)^a$	$39 \pm 4 (10)^a$	$43 \pm 4 (9)^b$
<i>3</i>		$38 \pm 3 (8)^a$	$41 \pm 2 (5)^b$	$42 \pm 2 (5)^b$
<i>4</i>		$39 \pm 3 (8)^a$	$39 \pm 2 (5)^a$	$41 \pm 2 (5)^b$
<i>5</i>		$40 \pm 3 (8)^a$	$41 \pm 3 (7)^{a,b}$	$42 \pm 3 (7)^b$
<i>6</i>		$40 \pm 3 (8)^a$	$43 \pm 5 (12)^b$	$43 \pm 5 (12)^b$
<i>Valor médio</i>		$39 \pm 1 (3)$	$40 \pm 2 (5)$	$42 \pm 1 (2)$
<i>LVd</i>				
<i>1</i>		$51 \pm 5 (10)^a$	$51 \pm 5 (10)^a$	$55 \pm 6 (11)^b$
<i>2</i>		$45 \pm 4 (9)^a$	$44 \pm 3 (7)^a$	$45 \pm 4 (9)^a$
<i>3</i>		$48 \pm 4 (8)^a$	$48 \pm 5 (10)^a$	$49 \pm 4 (8)^a$
<i>4</i>		$47 \pm 4 (9)^a$	$49 \pm 4 (8)^b$	$50 \pm 4 (8)^b$
<i>5</i>		$50 \pm 5 (10)^a$	$49 \pm 4 (8)^a$	$53 \pm 4 (8)^b$
<i>6</i>		$46 \pm 4 (9)^a$	$47 \pm 4 (9)^a$	$51 \pm 4 (8)^b$
<i>Valor médio</i>		$48 \pm 2 (4)$	$48 \pm 3 (6)$	$50 \pm 3 (6)$

Os números entre os parênteses representam coeficientes de variação (%). Os superescritos seguidos das mesmas letras mostram valores médios que são estatisticamente iguais de acordo com o teste estatístico de Duncan ($P < 0,05$).

A tabela 2 revela uma tendência de um aumento na porosidade para o LVAd com exceção da amostra 4 que não apresenta diferenças estatísticas entre os tratamentos. Todas as demais amostras deste solo exibem diferenças estatísticas ($P < 0,05$) pelo teste de Duncan. Estes resultados confirmam e quantificam as alterações na estrutura do solo induzidas pelos ciclos de U-S. O aumento de ϕ entre T_0 e T_2 , para o LVAd, foi de aproximadamente 6%. No caso do NVe este aumento foi de aproximadamente 7%. Para o LVd as amostras 2 e 3 não apresentaram diferenças estatísticas entre os tratamentos, e as amostras 2 e 5 mostraram uma diminuição de ϕ após três ciclos de U-S indicando um comportamento randômico nas modificações da estrutura deste solo. O aumento de ϕ para o LVd foi de aproximadamente 4%, e entre T_0 e T_1 , a porosidade permaneceu a mesma. Os resultados apresentados na tabela 2 ratificam que ciclos de U-S, dominados pela fricção do solo com as paredes do cilindro, influenciam a estrutura interna do solo e podem afetar a retenção ou distribuição de água pelo solo (Figura 7).

É muito importante ter em mente que os procedimentos de amostragem do solo podem afetar sua estrutura causando compactação próximo às paredes do cilindro. Pires et al. (2004b) investigou a influência de cilindros com diferentes dimensões na estrutura do solo, identificando um gradiente de densidade do centro para as bordas das amostras e indicando uma clara tendência de compactação próxima às bordas. Os autores mostraram ainda que cilindros com volumes de 100 cm^3 causaram o menor impacto na estrutura do solo em comparação com os outros de dimensões de 25, 50 e 55 cm^3 . Tendo esta influência da amostragem em mente, para o cálculo de ϕ foram usadas áreas menores do que o tamanho real da amostra dentro do cilindro, tentando eliminar a compactação nas bordas. Estas áreas foram selecionadas pelos menos 7 mm longe das bordas e 5 mm distante das superfícies superior e inferior das amostras contidas nos cilindros. Rogasik et al. (1999) e Baveye et al. (2002) apresentam dois importantes registros sobre o efeito do volume amostrado em determinações

de algumas propriedades físicas do solo. Estes autores tentam definir a existência de um possível volume ótimo, que apresente as menores variâncias, a partir do qual as medidas das propriedades físicas do solo não sofrem mais variações.

Figura 7. Curvas de retenção obtidas para T_1 (três ciclos) e T_2 (nove ciclos de umedecimento/secamento) para os três diferentes tipos de solos. Re-impresso, com permissão, de Pires et al. (2005c); copyright *Elsevier Science Publisher*.

A figura 7 traz uma indicação do possível efeito que as modificações estruturais sofridas nas amostras de solo, devido aos sucessivos ciclos de umedecimento e secamento, podem apresentar na retenção de água. Este resultado tem importantes consequências em aplicações agrícolas porque estas modificações na estrutura podem afetar o desenvolvimento de raízes e plantas e a determinação da curva de retenção da água no solo (PIRES et al., 2005a). Para o LVAd é observado que a aplicação de ciclos de U-S faz com que uma maior quantidade de água permaneça retida nas amostras de solo. Este resultado é importante porque esta água pode ser usada pela planta ou raiz, por exemplo. A figura 7A mostra que para potenciais mátricos mais altos não existem praticamente diferenças entre T_1 e T_2 para o LVAd. No entanto, essas diferenças tornam-se relativamente grandes a partir do potencial mátrico de -12 kPa e passam a se estabilizar em torno de -700 kPa (Figura 8A). Para o NVe (Figura 7B), as diferenças de umidade são bastante pequenas entre os tratamentos ao longo de toda a curva de retenção, somente ocorrendo uma aproximação maior entre os valores de umidade para os potenciais mátricos entre -10 e -100 kPa (Figura 8B). Para o LVd (Figuras 7C), as diferenças nos valores de umidade diminuem a medida que o potencial mátrico torna-se menor (maiores valores de pressão) e passam a obter um valor praticamente constante abaixo de -300 kPa (Figura 8C). A partir deste valor de P as curvas para os dois diferentes tratamentos revelam que estas amostras de solo passam a apresentar capacidades similares de retenção da água.

Figura 8. Variação da umidade gravimétrica (ΔU) entre as curvas de retenção obtidas para os tratamentos T_1 (três ciclos) e T_2 (nove ciclos de umedecimento e secamento) para os três diferentes tipos de solos. $\Delta U = U_{T_2} - U_{T_1}$.

Sarmah et al. (1996) encontraram uma diminuição na taxa de infiltração de água após ciclos de U-S, provavelmente devido à dispersão e colapso dos microagregados do solo. Este colapso altera a estrutura interna do solo afetando sua porosidade. Modificações na forma dos

poros e na razão entre micro e macroporos são provavelmente induzidas após os ciclos de U-S tendo um importante impacto nas características de retenção de água pelo solo. Phogat e Aylmore (1989) mostraram mudanças na distribuição de macroporos do solo em umedecimentos e, subseqüentes secamentos, com a macroporosidade diminuindo após estes processos. Este resultado indica uma instabilidade do sistema quando submetido a umedecimentos. Sartori et al. (1985) e Pagliai et al. (1987) discutiram a influência dos ciclos de U-S na porosidade, formato e distribuição do tamanho dos poros do solo. Os resultados destes autores demonstram um aumento em ϕ no alcance de 30 μm até 1 mm e fortes modificações no formato e distribuição do tamanho dos poros após os ciclos de U-S. Bresson e Moran (1995) avaliaram mudanças estruturais induzidas por sucessivos umedecimentos e secamentos ao longo de colunas de solos. Mostraram que para solos com textura mais grossa, após o secamento, ocorre uma degradação no fundo da coluna devido, principalmente, à junção e formação de muitos poros na região de 20-50 μm ocasionada pela dispersão dos agregados menores e maiores que constituem esses solos. Para solos com textura mais fina o principal processo envolvido na degradação estrutural relatado por estes autores foi à aglomeração de partículas e/ou microfragmentos da fração mais fina (poeira) mudando a porosidade do solo.

8.4 Conclusões

Os resultados apresentados neste trabalho demonstram o potencial da tomografia computadorizada na identificação de possíveis modificações na estrutura do solo devido a sucessivos ciclos de umedecimento e secamento. Sendo a técnica de TC não destrutiva foi possível um acompanhamento nas mesmas amostras do efeito dos ciclos de U-S, o que não poderia ser possível através de outras técnicas tradicionais que fazem uso da análise de

imagens. Essa vantagem da TC permite que os valores de porosidade obtidos, ao longo dos ciclos de U-S, realmente reflitam variações na porosidade devido a estes ciclos e não a variabilidade espacial das amostras coletadas no solo. Porém, infelizmente o sistema tomográfico usado neste experimento não possui resolução suficiente para investigar escalas micrométricas e para mostrar possíveis alterações no formato e número de micro e mesoporos. No entanto, a verificação das variações no formato e tamanho dos poros pode ser obtida usando outras técnicas de análise de imagens como àquelas que fazem uso de microscópios ópticos e amostras impregnadas em resina. Para concluir, os resultados obtidos para as curvas de retenção mostram que os ciclos de U-S, ao modificarem a estrutura do solo, também afetam a retenção de água por este meio poroso.

9 EFEITO DA AMOSTRAGEM E CICLOS DE UMEDECIMENTO E SECAMENTO NA ESTRUTURA DE AMOSTRAS DE SOLO INDEFORMADAS AVALIADAS PELA TÉCNICA DE ANÁLISE MICROMORFOLÓGICA

Resumo

A estrutura do solo é um dos principais atributos da qualidade do solo. Ela influencia o sistema poroso do solo e, conseqüentemente, os processos de transporte que ocorrem no solo (Kutílek, 2004). Mudanças na estrutura deste meio poroso podem ser causadas por forças naturais ou artificiais. Entre os processos naturais que podem afetar a estrutura do solo um de extrema importância é a alternância de ciclos de umedecimento e secamento. O objetivo principal deste trabalho foi usar a análise de imagens na avaliação de possíveis modificações na distribuição do tamanho, número e formato dos poros de amostras de solos depois de submetidas a seqüências de ciclos de umedecimento e secamento. Os resultados desta investigação permitiram caracterizar, em escala micrométrica, as mudanças ocorridas na estrutura do solo induzidas por seqüências de ciclos de U-S e pelos procedimentos de amostragem. O uso da análise de imagens auxiliou na explicação da compactação próximo às bordas das amostras coletadas em cilindros e forneceu informações detalhadas acerca das variações no formato, número e distribuição do tamanho dos poros. Este tipo de informação pode ser de extrema importância em medidas da retenção e condução da água pelo solo, uma vez que, em medidas de curvas de retenção, por exemplo, as amostras são submetidas a vários ciclos de umedecimento e secamento.

EFFECT OF SOIL SAMPLING PROCEDURES AND WETTING AND DRY CYCLES ON THE STRUCTURE OF UNDISTURBED SOIL SAMPLES EVALUATED BY MICROMORPHOLOGICAL ANALYSIS

Abstract

Soil structure is one of the main attributes of soil quality. It influences the soil pore system and, consequently, the transport process in soil (Kutílek, 2004). Soil structure changes might be caused by natural or artificial forces. An important natural process that can affect soil structure is the alternation of wetting and drying (W-D) cycles. The objective of this study was to use image analysis to evaluate possible modifications on pore size distribution, number, and shape after sequences of wetting and drying cycles. The results from this investigation allowed characterizing in a micrometric scale the changes on soil structure induced by sequences of W-D cycles and by soil sampling procedures. The use of image analysis helped to explain the compaction close to the border of the samples collected using cylinders (volumetric ring method) and provided detailed information about the pore shape, number and size distribution variations along the compacted soil samples. This type of information may be of great importance in calculations of soil water retention curves, because during this type of analysis the soil samples are frequently submitted to several wetting and drying cycles.

9.1 Introdução

A estrutura do solo deve ser considerada como uma propriedade dinâmica sujeita a modificações devido a processos naturais ou ações de natureza humana. Um importante

aspecto da estrutura do solo é sua influência na porosidade. Valores adequados de porosidade são importantes para garantir uma boa aeração do solo, infiltração de água e distribuição de raízes. Medidas de distribuição do tamanho, formato e arranjo de poros podem ser cruciais para a caracterização de possíveis modificações na estrutura do solo. Informações acerca da distribuição do tamanho de poros, especialmente aqueles de formato alongado, que diretamente afetam o crescimento das plantas, podem ser úteis na caracterização da macroporosidade do solo e, conseqüentemente, de seu estado estrutural (PAGLIAI, 2001).

Entre os processos naturais que podem afetar a estrutura do solo um de extrema importância é a alternância de ciclos de umedecimento e secamento (SARTORI et al., 1985; PAGLIAI et al., 1987; HUSSEIN & ADEY, 1998; BRESSON & MORAN, 2003). Com relação às ações antropomórficas, a compactação é um dos mais importantes parâmetros de danificação da estrutura do solo. A compactação é principalmente induzida pelo tráfego de implementos agrícolas (MARSILI et al., 1998), afetando o movimento e armazenamento da água pelo solo, transferência de calor, difusão de gases, etc. Uma outra importante modificação na estrutura do solo resulta dos procedimentos de amostragem (PIRES et al., 2004b). Este último problema é bastante significativo porque envolve incertezas acerca da representatividade de uma amostra de solo, o que pode afetar a interpretação de alguns parâmetros físicos do solo, tais como aqueles relacionados à retenção e movimento de água.

Seqüências de umedecimento e secamento (U-S) conduzem a rearranjos nas partículas do solo, uma vez que durante umedecimento os poros são preenchidos pela água e no secamento as partículas do solo podem mudar sua orientação individual. Esta modificação na orientação influencia o sistema poroso alterando formato, arranjo e tamanho dos poros. Pagliai (1987) estudou o efeito da alternância de ciclos de U-S em amostras de solos argilosos compactadas pelo tráfego de implementos agrícolas. Seus resultados mostram que após a compactação a porosidade do solo foi reduzida envolvendo todos os tipos morfológicos de

poros, especialmente, os de formato alongado. Após um período de doze meses, a porosidade aumentou devido ao efeito dos ciclos de U-S e da atividade biológica, permitindo uma regeneração da estrutura do solo. Telfair et al. (1957) e Newman e Thomasson (1979) registraram resultados similares observando que a alternância de ciclos de U-S resultou na formação de agregados em solos não-agregados causando a regeneração de alguns tipos de solos danificados. Investigações conduzidas em solos argilosos revelam que ciclos de U-S causam mudanças no sistema poroso e produzem agregados; sendo que a capacidade de formação de agregados está fortemente relacionada ao conteúdo de argila presente no solo (SARTORI et al., 1985; PAGLIAI et al., 1987).

Vogel e Roth (2003) têm chamado a atenção para a necessidade do estabelecimento de procedimentos para mensurar a estrutura do solo com maior precisão. Dois importantes trabalhos neste sentido foram apresentados por Rogasik et al. (1999) e Baveye et al. (2002), nos quais investigam o efeito do volume de amostragem em algumas propriedades físicas do solo. Estes autores tentaram determinar o menor volume amostral a partir do qual obtêm-se medidas de propriedades físicas com confiança. Tendo em mente a importância do volume amostrado e da qualidade da amostra antes da medida de alguma propriedade física do solo, Pires et al. (2004b) tentaram avaliar a influência de diferentes procedimentos de amostragem na estrutura do solo. Os resultados têm mostrado que para determinar parâmetros hídricos e físicos do solo com confiança são necessárias amostras que sofram o mínimo impacto durante amostragem. No entanto, o método de investigação usado pelos últimos autores permitiu somente medidas em escala milimétrica e não foi possível analisar possíveis mudanças na distribuição do tamanho, arranjo e formato dos poros.

Técnicas de análise de imagens, tais como, métodos morfométricos, podem ser úteis na avaliação da estrutura do solo em escala micrométrica, permitindo uma investigação visual do tipo e tamanho dos poros. O método morfométrico basicamente está baseado na

impregnação de amostras de solo indeformadas com uma resina especial e pigmentos fluorescentes. Após o endurecimento da amostra de solo corta-se a mesma em fatias verticais ou horizontais para analisá-las em microscópio óptico. Os blocos impregnados com os pigmentos fluorescentes permitem aos vazios fluorescerem sob luz ultravioleta (MURPHY et al., 1977a). Os blocos são então fotografados e as fotografias analisadas usando programas de análise de imagens. Imagens bidimensionais fornecem informações sobre o número, área, perímetro, diâmetro, arranjo, distribuição do tamanho de poros, etc. Por exemplo, com relação ao formato, o sistema poroso pode ser dividido em poros arredondados (regulares), complexos e alongados (BOUMA et al., 1977).

Trabalhos pioneiros usando análise de imagens para quantificar e caracterizar a porosidade de amostras de solos impregnadas foram realizados por Jongerius et al. (1972) e Murphy et al. (1977a,b). Bouma et al. (1977) introduziram o uso desta técnica no estudo da continuidade dos poros. Bullock e Thomasson (1979) fizeram comparações de medidas de macroporosidade, derivadas da análise de imagens, com àquelas oriundas da retenção de água, método comumente utilizado na determinação da distribuição do tamanho de poros. Dados micromorfométricos foram usados para calcular a condutividade hidráulica saturada de alguns solos argilosos por Bouma et al. (1979). Pagliai et al. (1983) investigaram o efeito de diferentes práticas de manejo na estrutura do solo e, especialmente, na porosidade do solo. Os princípios e vantagens de um sistema de análise de imagens unidimensionais usadas na caracterização da estrutura do solo foram apresentados e discutidos por Ringrose-Voase (1990) e Ringrose-Voase e Nys (1990). Thompson et al. (1992) enfatizaram a importância de se levar em consideração a existência de possíveis artefatos durante a realização da análise de imagens de solos pelo método micromorfométrico.

O objetivo deste trabalho foi usar a análise de imagens na avaliação de possíveis modificações na distribuição do tamanho, número e formato dos poros de amostras de solo

submetidas a seqüências de ciclos de umedecimento e secamento, investigar mudanças indesejadas na estrutura do solo em escala micrométrica, após amostragem, e estudar o comportamento da porosidade de amostras volumétricas de solo, compactadas devido aos procedimentos de amostragem, submetidas a ciclos de U-S.

9.2 Material e Métodos

9.2.1 Amostragem do solo e ciclos de umedecimento e secamento (U-S)

Amostras de três solos, diferentes em textura, caracterizados como: latossolo vermelho-amarelo distrófico (LVAd), nitossolo vermelho eutrófico (NVe) e latossolo vermelho distrófico (LVd), segundo a classificação da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, foram coletadas nas Fazendas Sertãozinho e Areão (USP/ESALQ) e na Fazenda do IAC, ambas situadas em Piracicaba (22°4' S; 47°38' W; 580 m acima do nível do mar). Um total de vinte e sete amostras volumétricas ($h = 3,0$ cm, $D = 4,8$ cm, $V = 55$ cm³), nove para cada solo, foram coletadas usando-se cilindros de alumínio. O procedimento de amostragem do solo encontra-se descrito em detalhes no capítulo 6 (*seção material e métodos*). O método de ascensão capilar foi escolhido para o umedecimento das amostras de solo (KLUTE, 1986). O procedimento de umedecimento e secamento do solo encontra-se descrito em detalhes no capítulo 8 (*seção material e métodos*). As amostras de solo foram submetidas a três (T₁) e nove (T₂) ciclos de umedecimento e secamento, respectivamente. As amostras testemunha (T₀) e/ou controle (C) não foram submetidas a nenhum ciclo de U-S.

9.2.2 Preparação das amostras para análise de imagens

Um total de nove amostras indeformadas de cada solo foi usada para análise de imagens. Para cada tratamento (controle, T_1 e T_2) três amostras de cada solo foram selecionadas. Seis fatias impregnadas foram obtidas para análise de imagens para cada tratamento, sendo que cada amostra volumétrica foi cortada em duas fatias verticais ao longo de sua região central (Figura 1).

Figura 1. Diagrama esquemático dos blocos selecionados no interior das amostras usados para a análise de imagens pelo método de análise micromorfológica. (A) Diagrama esquemático da amostra volumétrica de solo dividida em dois blocos; (B) Diagrama esquemático dos dois blocos situados na parte central da amostra de solo; (C) Número de áreas usadas na determinação da porosidade total (tap); e (D) Áreas usadas na análise da variação da porosidade total devido ao procedimento de amostragem do solo. Os termos LE e LD significam as áreas situadas nos lados esquerdo e direito, próximas às bordas das amostras, e C a área central. Figura esquemática e fora de escala.

Após as amostras de solo terem sido submetidas aos ciclos de U-S o seguinte procedimento foi conduzido para preparação das mesmas para a análise de imagens. Antes da impregnação as amostras são usualmente secadas. O processo usado para o secamento foi a aplicação de 400 kPa de pressão. Este método de secamento evitou a necessidade de substituição da água contida nos poros por acetona. Visando evitar danos na estrutura das

amostras tomou-se muito cuidado durante a extração das mesmas dos cilindros de alumínio. A impregnação foi feita sob vácuo usando uma resina poliéster não saturada (Crystic SR 17449) e monômero, o qual foi adicionado para tornar a mistura menos viscosa e facilitar a impregnação por ascensão capilar evitando o aprisionamento de bolhas de ar e solvente. Pigmentos fluorescentes (Uvitex OB) foram adicionados a solução para permitir a distinção dos poros quando iluminados com luz ultravioleta. Aproximadamente seis semanas foram necessárias para o endurecimento das amostras de solo. Após este período, as amostras impregnadas foram cortadas usando máquinas apropriadas visando produzir blocos retangulares (MURPHY, 1986). Blocos verticalmente orientados, com dimensões de aproximadamente 4,6 x 3,0 cm, e possuindo uma das faces polidas foram então usados na análise de imagens (Figura 1).

Imagens digitais foram adquiridas a partir dos blocos impregnados usando uma câmera CCD colorida com uma resolução de 1024 x 768 pixels e com uma área por pixel de $100 \mu\text{m}^2$. As imagens do espaço poroso foram obtidas iluminando os blocos impregnados com luz ultravioleta, a qual possibilita a resina fluorescer (RINGROSE-VOASE, 1984). As imagens adquiridas foram armazenadas em um computador e processadas usando o programa de análise de imagens chamado Noesis-Visilog® 5.4. A porosidade total (tap) foi calculada como a soma das áreas de todos os poros dividido pela área total do campo, expressada em porcentagem. A porosidade total e a distribuição de poros são medidas de acordo como o formato e tamanho. Os poros foram divididos em três grupos de acordo com sua forma: arredondados (canais e cavidades isoladas), alongados (fissuras) e complexos (empacotamento). Dois índices foram usados para determinar o formato dos poros (COOPER et al., 2005).

O primeiro índice usado para caracterizar o espaço poroso foi:

$$I_1 = \frac{P^2}{4\pi A} \quad (1)$$

onde P representa o perímetro do poro e A a área ocupada.

O segundo índice fornece informações sobre o formato do poro e foi proposto por Cooper (1999):

$$I_2 = \frac{\frac{1}{m} \sum_i (N_i)}{\frac{1}{n} \sum_j (D_F)_j} \quad (2)$$

onde N_i é o número de interceptos de um objeto na direção i ($i = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ e 135°), D_F o diâmetro de Feret de um objeto na direção j ($j = 0^\circ$ e 90°), m número de direções i e n número de direções j .

A tabela 1 a seguir apresenta a classificação dos poros de acordo com o formato e tamanho. Os poros arredondados foram classificados usando-se o índice I_1 . Ambos os índices foram utilizados na classificação dos poros alongados. Para valores de $I_1 > 25$, os poros foram classificados como complexos, independente dos seus valores de I_2 .

Tabela 1 – Classificação dos poros de acordo com o formato e tamanho (COOPER et al., 2005).

Poros	Índice de forma			
	I_1	I_2		
<i>Arredondados (Arr)</i>	$I_1 \leq 5$	-		
<i>Alongados (Alon)</i>	$5 < I_1 \leq 25$	$\leq 2,2$		
<i>Complexos (Comp)</i>	$5 < I_1 \leq 25$ or > 25	$> 2,2$		
Limites das classes de tamanhos (mm ²)	Classes de tamanhos e formas			
	<i>Arredondados</i>	<i>Alongados</i>	<i>Complexos</i>	
	$\leq 0,001$	Arr _{pequenos}	Alon _{pequenos}	Comp _{pequenos}
	$> 0,001$ and $\leq 0,01$	Arr _{médios}	Alon _{médios}	Comp _{médios}
	$> 0,01$	Arr _{grandes}	Alon _{grandes}	Comp _{grandes}

Poros de cada grupo foram subdivididos em diferentes classes de tamanhos (20-50; 50-100; 100-200; 200-300; 300-400; 400-500; 500-1000; >1000 μm) de acordo com o diâmetro equivalente dos poros.

9.3 Resultados e Discussão

9.3.1 Influência dos ciclos de umedecimento e secamento na estrutura do solo

Os valores médios da porosidade total do solo para os diferentes tratamentos e solos na faixa de 20 μm até > 1 mm do diâmetro equivalente dos poros são apresentados na figura 2.

Figure 2. Variações na porosidade total (tap) devido à influência dos ciclos de umedecimento e secamento para os diferentes tratamentos. A porosidade total foi medida no diâmetro de poros entre 20 μm até > 1 mm.

Como pode ser visto a partir da figura 2, *tap* varia significativamente entre as amostras controle e T₁ (3 ciclos) e T₂ (9 ciclos de U-S) para o LVAd e NVe, refletindo variações importantes na estrutura do solo em virtude dos ciclos de umedecimento e secamento. O fator

de aumento da *tap* entre as amostras controle e T_2 foi de aproximadamente 1,5 e 1,9 para os últimos dois solos. Para o LVd, houve variações importantes principalmente entre as amostras controle e T_2 , porém modesta entre T_1 e T_2 . O fator de aumento da *tap* entre as amostras controle e T_2 para este solo foi de aproximadamente 1,3. Sartori et al. (1985) encontraram um aumento significativo na porosidade intra-agregados, para solos argilosos, após seqüências de ciclos de U-S. Resultados similares foram registrados por Pagliai et al. (1987) para três diferentes texturas de solos. Observações micro e macroscópicas realizadas pelos últimos autores revelaram que a forte variação na *tap* foi causada por mudanças nos poros intra-agregados, os quais envolvem ou separam os novos agregados do solo formados, mostrando a capacidade dos ciclos de U-S na produção de agregados. Além da formação de agregados, Pires et al. (2005c) demonstraram, usando análise de imagens tomográficas em 2-D, que uma outra possível explicação para o aumento na porosidade total foi um possível aumento na altura da amostra volumétrica de solo após os ciclos de U-S. Durante seqüências de ciclos de U-S um processo de fricção, entre a coluna de solo e as bordas do cilindro, pode ocorrer influenciando o adequado assentamento da amostra, após secamento, possivelmente mudando o sistema poroso do solo.

Usando análise de imagens, Pagliai (1988) mostrou que um solo pode ser considerado denso (compacto) quando sua porosidade é menor que 10%, moderadamente poroso e poroso quando a sua porosidade varia de 10 a 25% e 25 a 40%, respectivamente. Os solos LVAd e LVd podem ser considerados moderadamente porosos (*tap* = 19 e 13%) para as amostras controle. Para o LVAd o solo torna-se poroso para T_2 com a *tap* aumentando para 28,9%. Para o NVe, as amostras controle podem ser consideradas densas uma vez que a *tap* é menor que 10%, no entanto, seqüências de ciclos de U-S tornam esse solo moderadamente poroso (*tap* = 11,7% para T_2). Estes resultados mostram que os ciclos de umedecimento e secamento podem atuar na melhora da estrutura do solo.

Para uma melhor e mais completa caracterização do sistema poroso, estudos da distribuição do tamanho, número e formado dos poros foram realizados. Muitos dos fenômenos físicos que ocorrem no solo (retenção e movimento de água e gases, penetração e distribuição de raízes, etc) dependem da configuração do espaço poroso. De acordo com Greenland (1977), poros variando de 0,5 até 50 μm de diâmetro equivalente do poro são classificados como poros de armazenamento, os quais são responsáveis pela retenção de água para as plantas e microorganismos. O movimento da água no solo ocorre nos poros possuindo diâmetros entre 50 até 500 μm , estes poros são chamados de transmissão. Estes poros são importantes para a penetração e crescimento das raízes. Os poros maiores do que 500 μm , também de transmissão, podem agir na penetração das raízes e movimento da água, especialmente em solos que apresentam texturas mais finas (PAGLIAI, 2001). A figura 3 traz as variações no formato dos poros, para os diferentes solos e tratamentos, ocasionadas pelos ciclos de U-S.

Figura 3. Efeito dos ciclos de umedecimento e secamento no formato dos poros para os três solos estudados. Arr = arredondados; Alon = alongados; Comp = complexos; e *tap* = porosidade total.

Como pode ser observado a partir da figura 3, para LVAd (Figuras 3A até 3C) existe uma redução modesta dos poros arredondados médios e pequenos entre os tratamentos. A variação da *tap* para todas as classes de poros arredondados entre os tratamentos controle e T₂ foi de 9,79 para 7,54%, sendo a maior mudança para os poros arredondados pequenos (de 3,78 para 2,97%). Praticamente, não existem variações significativas para os poros alongados. As maiores variações na porosidade para o LVAd ocorreram para os poros de formato complexo. O aumento na *tap* para este tipo de poro foi de 7,05 para 19,37%, entre os tratamentos controle e T₂, e, praticamente, a contribuição total desta variação foi devido aos poros complexos grandes (6,74% - controle e 19,06% - T₂). Contrário ao ocorrido para o

LVAd, para o NVe (Figuras 3D até 3F) existe um aumento significativo de todas as classes de poros arredondados e alongados grandes. A variação da *tap* para todas as classes de poros arredondados entre controle e T₂ foi de 3,48 para 5,44% e para poros de formato alongado de 0,72 para 2,28% (variação para os poros alongados grandes de 0,52 para 1,90%). O aumento da *tap* para os poros arredondados pequenos, médios e grandes foi de 1,26 para 1,68%, 1,75 para 2,52% e 0,47 para 1,24%. Com relação aos poros complexos houve aumento entre os tratamentos controle e T₁ (de 1,67 para 4,27%) e um decréscimo pequeno entre T₁ e T₂ (de 4,27 para 4,02%). Para o LVd (Figuras 3G até 3I) os resultados são bastante similares àqueles descritos para o LVAd. Os poros arredondados mostraram um comportamento aleatório durante as seqüências de ciclos de U-S, com a *tap* aumentando de 4,58 para 6,18% entre os tratamentos controle e T₁ e decrescendo para 4,18% para T₂. Praticamente, não existem variações significativas para os poros de formato alongado. O aumento na *tap* para os poros de formato complexo entre os tratamentos controle e T₂ foi de 6,23 para 10,98%, sendo a maior parte desta contribuição devido aos poros complexos grandes (6,20% - controle e 10,95% - T₂).

As variações no formato e área ocupada pelos poros são extremamente importantes, uma vez que a definição de uma boa estrutura do solo para o crescimento das plantas depende da presença em grande quantidade de poros que atuem na retenção e transmissão de água e gases, os quais irão influenciar diretamente nas condições para o desenvolvimento das raízes. Um outro aspecto relevante é o impacto que alterações na estrutura do solo podem acarretar durante medidas de algumas propriedades físicas do solo, tais como: a retenção de água ou condutividade hidráulica, por exemplo. A figura 4 a seguir apresenta variações na distribuição do tamanho de poros para os diferentes solos e tratamentos com os ciclos de U-S.

Figura 4. Efeito dos ciclos de umedecimento e secamento na distribuição do tamanho dos poros para os três solos estudados. *Arr* = arredondados; *Alon* = alongados; *Comp* = complexos; e *tap* = porosidade total.

A distribuição do tamanho dos poros para o LVAd (Figuras 4A até 4C) mostra um aumento principalmente na porosidade dos poros irregulares maiores que 1 mm. Poros situados entre 20 até 50 µm (microporos) foram responsáveis somente por uma pequena porcentagem da porosidade total (Tabela 2). A importância dos poros entre 50 até 500 µm foi diminuindo com as seqüências de ciclos de U-S, sendo que a contribuição dos poros de formato alongado representou somente 11 (controle), 8 (T₁) e 7% (T₂) da *tap*. A contribuição dos poros complexos foi de 3 (controle), 2 (T₁) e 2% (T₂). Por um outro lado, a contribuição na *tap* para os poros maiores que 500 µm aumentou com os ciclos de U-S. A contribuição dos poros complexos para esta faixa específica foi 34% da *tap* correspondendo a 6,5% da área

ocupada por estes poros para as amostras controle, 55% e 12,7% para T₁ e 65% e 19,1% para T₂. Para o NVe (Figuras 4D até 4F), os poros entre 20 até 50 µm foram responsáveis somente por uma pequena porcentagem da *tap* (Tabela 2). Os poros entre 50 até 500 µm e maiores que 500 µm mostraram um comportamento aleatório em relação a *tap*. A contribuição dos poros alongados aumentou de 12 para 19% para os poros de transmissão (entre 50 até 500 µm) e para os poros arredondados diminuiu de 51 para 36% entre as amostras controle e T₂. Para os poros maiores que 500 µm ocorreu um aumento de 6 para 9% e 28 para 34% para os poros arredondados e complexos entre os tratamentos controle e T₂, respectivamente. A contribuição dos poros entre 20 até 50 µm foi responsável somente por uma pequena porcentagem da *tap* para o NVe (Tabela 2). Os resultados para o LVd (Figuras 4G até 4I) são similares àqueles encontrados para o LVAd. A porcentagem da *tap* devido aos poros de transmissão (entre 50 até 500 µm) diminuiu com os ciclos de U-S, no entanto, somente uma pequena variação entre os tratamentos controle e T₁ foi observada. Os poros arredondados e alongados, entre 50 até 500 µm, diminuíram de 29 para 20% e de 17 para 12%, respectivamente. No caso dos poros maiores que 500 µm a *tap* aumentou com os ciclos de U-S. A contribuição dos poros arredondados foi praticamente constante entre os tratamentos controle e T₂ (aproximadamente 5%); por um outro lado, a contribuição dos poros complexos aumentou de 47 para 63%. Uma alta porcentagem de poros maiores que 500 µm (aproximadamente 70-80% da *tap*) usualmente representa um índice de um solo estruturalmente empobrecido para o crescimento das plantas (PAGLIAI, 2001). Os solos LVAd e LVd apresentaram aumentos dos poros maiores que 500 µm até um valor de 70% da *tap* e uma diminuição dos poros de transmissão (entre 50 até 500 µm) entre os tratamentos controle e T₂. Resultados similares foram observados para o NVe, porém com variações mais moderadas para estas classes de poros (Tabela 2).

Tabela 2 – Porcentagem da porosidade total e porcentagem das áreas dos blocos ocupada por poros com diâmetros entre 20 até 50 μm (microporos), 50 até 500 μm e >500 μm (poros de transmissão).

Diâmetro dos poros	20 até 50 μm	50 até 500 μm	>500 μm
<i>LVAd</i>			
<i>Controle (C)</i>	2% (0,4%)	62% (11,7%)	36% (6,9%)
<i>T₁</i>	1% (0,3%)	42% (9,5%)	57% (13,0%)
<i>T₂</i>	1% (0,3%)	33% (9,5%)	66% (19,1%)
<i>NVe</i>			
<i>Controle (C)</i>	2% (0,1%)	63% (3,7%)	35% (2,0%)
<i>T₁</i>	2% (0,2%)	49% (4,7%)	49% (4,6%)
<i>T₂</i>	2% (0,2%)	56% (6,5%)	43% (5,0%)
<i>LVd</i>			
<i>Controle (C)</i>	1% (0,2%)	46% (6,0%)	53% (6,8%)
<i>T₁</i>	1% (0,3%)	44% (7,5%)	55% (9,3%)
<i>T₂</i>	1% (0,1%)	32% (5,6%)	67% (11,6%)

Os valores entre parênteses representam a porcentagem das áreas dos blocos ocupadas pelos poros.

A figura 5 a seguir apresenta variações no número total de poros (NTP) para os diferentes solos e tratamentos com as seqüências de ciclos de U-S.

Figura 5. Efeito dos ciclos de umedecimento e secamento no número total de poros (NTP) para os três solos estudados. Distribuição de tamanho dos poros em micrometro. *Arr* = arredondados; *Alon* = alongados; *Comp* = complexos; e *tap* = porosidade total.

O número total de poros mostra uma tendência similar para todos os solos e tratamentos com alguns poros grandes contribuindo para a maior parte da macroporosidade (Figura 5 e Tabela 3). Para o LVAd (Figuras 5A até 5C) quatorze poros maiores que 0,5 mm constituem aproximadamente 36% da macroporosidade para as amostras controle. O número destes poros grandes permanece praticamente constante para T₁ e T₂, no entanto, a contribuição para a *tap* aumentou de 57 para 66%, respectivamente. No caso dos poros de transmissão, situados entre 50 até 500 µm, foi observada uma diminuição destes poros com as seqüências de ciclos de U-S, explicando o decréscimo da contribuição deste tipo de poros na porosidade total (Tabela 2). Poros arredondados representaram a maior quantidade de poros de transmissão e o número de poros complexos maiores que 0,5 mm foi praticamente o

mesmo. Com relação ao número de microporos houve pouca diferença entre tratamentos para todos os solos e, embora bastante numerosos, contribuíram relativamente pouco para a *tap*. A maior parte da microporosidade foi devido aos poros de formato arredondado. Para o NVe (Figuras 5D até 5F), a maior parte da porosidade total consistiu de poros arredondados de transmissão situados entre 50 até 500 μm (Tabela 3), os quais contribuíram com 63 (controle), 49 (T_1) e 56% (T_2) da porosidade. Para o LVd (Figuras 5G até 5I) o número total de poros apresentou um comportamento aleatório com os tratamentos (Tabela 3). Embora tenha ocorrido um aumento significativo no número de poros de transmissão (entre 50 até 500 μm) entre os tratamentos controle e T_1 , a contribuição para a *tap* foi praticamente a mesma. Com relação aos tratamentos controle e T_2 foi observada uma diminuição no número dos poros de transmissão e da contribuição destes na porosidade total (Tabela 2). Como registrado para os outros dois solos, a maior parte dos poros de transmissão consistiu de poros arredondados. O número praticamente constante de poros maiores que 0,5 mm para os solos LVAd e LVd (Tabela 3) e a contribuição destes para o aumento da *tap*, com as seqüências de ciclos de U-S, pode ser associada com o aumento da área destes tipos de poros. Este resultado confirma aqueles obtidos por Pires et al. (2005c) que demonstraram uma elevação na altura das amostras volumétricas de solos com os ciclos de umedecimento e secamento causando o aumento da área dos macroporos presente nestas amostras. Para o NVe, o aumento na *tap*, entre os tratamentos controle e T_2 , pode ser melhor associado ao aumento no número de poros grandes do que ao aumento na área destes. A grande quantidade de poros arredondados presente em todos os solos pode ser separada em dois tipos de acordo com sua origem: poros esféricos formados pelo aprisionamento de bolhas de ar durante o secamento do solo e canais e câmaras formadas por atividade biológica. Os poros complexos representam os vazios com paredes irregulares comumente encontrados nos solos ou simples grãos de areia. Estes poros podem existir isolados ou interconectados. Os poros alongados podem ser distinguidos em

dois tipos: fraturas ou fissuras finas (PAGLIAI, 2001). As fissuras finas são importantes do ponto de vista agronômico, porque dizem respeito aos típicos poros de transmissão.

Tabela 3 – Número total de poros (NTP) com diâmetros entre 20 até 50 μm (microporos), 50 até 500 μm e >500 μm (poros de transmissão).

Diâmetro	20 até 50 μm			50 até 500 μm			>500 μm		
Formato	Arr ¹	Alon ¹	Comp ¹	Arr	Alon	Comp	Arr	Alon	Comp
<i>LVAd</i>									
<i>Controle (C)</i>	308	1	0	887	25	7	3	0	11
<i>T₁</i>	244	2	0	711	21	7	2	0	11
<i>T₂</i>	250	1	0	699	22	6	2	0	12
<i>NVe</i>									
<i>Controle (C)</i>	111	1	0	294	6	2	2	0	2
<i>T₁</i>	143	1	0	355	8	1	2	0	4
<i>T₂</i>	149	1	0	402	13	3	4	0	4
<i>LVd</i>									
<i>Controle (C)</i>	111	1	0	339	12	2	3	0	5
<i>T₁</i>	184	1	0	506	16	4	3	0	8
<i>T₂</i>	90	1	0	284	12	2	3	0	6

¹ Arr = arredondado, Alon = alongado e Comp = formato complexo.

A figura 6 traz imagens mostrando a área total ocupada pelos poros para todos os solos e tratamentos. Um exame das imagens indica diferenças importantes na área ocupada pelos poros para todos os solos para os tratamentos controle e T₂. Estas imagens fornecem um “insight” acerca dos resultados mostrados nas figuras 3 a 5.

Para as amostras controle do LVAd (Figuras 6A até 6C), após as seqüências de ciclos de U-S, pode ser observado um aumento da *tap*, a qual ocorreu devido um aumento da interconexão entre poros. Uma estrutura massiva pode ser observada no caso das amostras controle do NVe (Figuras 6D até 6F). Após seqüências de ciclos de U-S, o aparecimento de alguns macroporos grandes e conectados torna-se evidente, no entanto, a estrutura deste solo

ainda permanece relativamente densa. As amostras controle para o LVd (Figuras 6G até 6I) mostram uma estrutura parcialmente massiva e a presença de alguns poros grandes e conectados. Após seqüências de ciclos de U-S, a estrutura deste tipo de solo apresentou um aumento na conexão de poros grandes.

Figura 6. Imagens binárias (poros aparecem em branco e a matriz do solo em preto) representando as variações na estrutura dos solos devido aos ciclos de umedecimento e secamento (U-S).

9.3.2 Influência da amostragem e ciclos de umedecimento e secamento na estrutura do solo

Visando analisar a influência da amostragem em escala micrométrica foram obtidos dados e gráficos de variação de formato dos poros (Figura 7) em diferentes áreas selecionadas no interior das amostras (Figura 1D).

Figura 7. Efeitos da amostragem no formato dos poros para os três solos estudados. Arr = arredondados; Alon = alongados; Comp = complexos; tap = porosidade total; LE = lado esquerdo (área selecionada próxima à borda esquerda); C = área central; e LD = lado direito (área selecionada próxima à borda direita).

Existe uma diferença importante no formato dos poros entre as áreas selecionadas nos lados direito e esquerdo (próximas à borda do cilindro) e a área central das amostras para os

três solos. Para o LVAd (Figuras 7A até 7C), o decréscimo na porosidade do solo entre as áreas central e próximas as bordas da amostra volumétrica ocorreram especialmente para os poros complexos. Resultados similares foram observados para o LVd (Figuras 7G até 7I). O fator de decréscimo da *tap* para os poros complexos entre o centro e os lados direito e esquerdo selecionados nas imagens foi de 1,4 e 1,3 (LVAd) e 1,4 e 1,9 (LVd), respectivamente. Os poros arredondados e alongados mostraram somente variações modestas. Para o NVe (Figuras 7D até 7F), pôde ser observado resultados contrários aos encontrados para os outros dois solos. Existe um decréscimo significativo da *tap* para os poros arredondados entre o centro e as bordas das amostras volumétricas. O fator de decréscimo da *tap* para os poros arredondados foi de aproximadamente 1,5 (C para LE) e 1,3 (C para LD). Para o caso dos poros complexos existe um comportamento aleatório na variação da *tap*. Uma possível explicação para o aumento da *tap* para os poros complexos situados na área selecionada no lado direito do NVe pode ser a presença de macroporos grandes nesta região das amostras volumétricas, os quais podem ter sido causados por imperfeições no preenchimento dos cilindros durante amostragem (Figura 7F). Pires et al. (2005c) trabalhando com solos similares registraram a existência de vários buracos em amostras coletadas em cilindros. Os resultados obtidos para o LVAd e LVd confirmam àqueles notificados por Grossman e Reinsch (2002) e Pires et al. (2004a) que observaram problemas de compactação de amostras de solo quando coletadas por meio do método do anel volumétrico. O problema mais importante está relacionado com a redução da porosidade total durante a amostragem, a qual diminui a macroporosidade do solo, em tamanho e continuidade, causando pequenos efeitos na microporosidade (HILLEL 1982; STONE et al. 2002). Os efeitos dos procedimentos de amostragem na estrutura do solo também necessitam ser levados em consideração, pelo fato de que afetam a representatividade das amostras, que devem estar isentas o máximo possível de problemas de deformação de sua estrutura durante a coleta,

visando garantir ao máximo determinações de propriedades físicas do solo mais condizentes com a realidade.

Com relação ao número total de poros (ver dados na Figura 7) para o LVAd, existem somente pequenas diferenças entre as bordas e a área central das amostras para todos os tipos de poros. Este resultado significa que a diminuição da *tap* entre as bordas e a área central das amostras ocorreu principalmente devido à redução do tamanho de área dos macroporos, uma vez que um pequeno número de poros complexos grandes contribuiu substancialmente para a variação da porosidade total. Para o caso do NVe, foi observada uma redução no número total de poros entre as bordas e a área central das amostras. A diminuição ocorreu principalmente para os poros arredondados que contribuíram de forma mais significativa (mais do que 60%) para a *tap* do que os outros tipos de poros. A maior parte destes poros arredondados foi encontrada na faixa dos 20 a 300 μm . Uma exceção foi à área situada no lado direito na qual os poros arredondados contribuíram somente com 37% e os poros complexos com 36% da *tap*. Esta importante contribuição dos poros complexos grandes para a área do LD em relação às áreas do LE e C pode ser explicada pelo pequeno aumento destes tipos de poros para o NVe. Para o LVd foi observado um pequeno decréscimo no número total de poros entre as bordas e a área central das amostras. Esta redução ocorreu principalmente para os poros arredondados situados na faixa entre 20 a 200 μm podendo explicar a contribuição destes poros na redução da *tap*. O decréscimo na *tap* entre as bordas e a área central para o LVd foi devido a variações nos macroporos complexos grandes. Este tipo de poro apresentou as alterações mais importantes na porosidade total. No entanto, não foram encontradas variações no número de poros complexos grandes entre as bordas e a área central das amostras. Portanto, a redução na *tap* provavelmente tenha resultado de um decréscimo no tamanho da área dos macroporos grandes.

A distribuição do tamanho de poros (Figura 8) do LVAd mostrou diferenças importantes somente para os macroporos complexos grandes (> 1 mm de diâmetro) entre as áreas selecionadas próximo as bordas (Figuras 8A e 8C) e central (Figura 8B). A proporção destes poros complexos representou 17 (LE), 27 (C) e 19% (LD) da porosidade total. As outras classes de poros não apresentaram grandes variações entre as áreas. Esta redução nos macroporos complexos, próxima às bordas do cilindro, é uma clara evidência de compactação devido ao procedimento de amostragem. A diminuição neste tipo de poros afeta principalmente o processo de transmissão de água e provavelmente pode influenciar em medidas de propriedades físicas do solo. Para as amostras do NVe (Figuras 8D até 8F), a proporção de poros arredondados entre 50 até 500 μm foi de 65 (LE), 73 (C) e 37% (LD) da porosidade total demonstrando comportamento diferenciado em relação ao LVAd. A redução destes tipos de poros confirma a compactação na estrutura do solo próxima as bordas. Este resultado é muito importante devido ao fato de que estes poros são responsáveis pelo movimento de água e desenvolvimento de raízes. Por um outro lado, a contribuição dos poros complexos entre 0,5 até 1 mm da *tap* foi de 17 (LE), 6 (C) e 36% (LD). Este resultado que é o oposto daquele observado para o LVAd pode ser explicado pela existência de raízes mortas nas amostras de solo ou problemas durante a impregnação. Algumas amostras do NVe sofreram danos na estrutura após o secamento da resina usada na impregnação. Os resultados para as amostras do LVd (Figuras 8G até 8I) foram similares àqueles observados para o LVAd. A proporção de poros complexos maiores que 1 mm foi de 33 (LE), 47 (C) e 27% (LD) da *tap*. As outras classes de poros não apresentaram grandes variações entre as áreas próximas às bordas e central das amostras de solo.

Figura 8. Efeitos da amostragem na distribuição de tamanho dos poros para os três solos estudados. Arr = arredondados; Alon = alongados; Comp = complexos; *tap* = porosidade total; LE = lado esquerdo (área selecionada próxima à borda esquerda); C = área central; e LD = lado direito (área selecionada próxima à borda direita).

Visando avaliar o efeito dos ciclos de umedecimento e secamento na estrutura de amostras de solo danificadas pelo procedimento de amostragem foram realizadas análises do formato, distribuição de tamanho e número total de poros (Figuras 9 e 10). Para esta análise foi selecionada somente a área do lado esquerdo da imagem bidimensional das amostras de solo (ver Figura 1D).

Figura 9. Efeito dos ciclos de umedecimento e secamento no formato dos poros de amostras danificadas pelo processo de amostragem para os três solos estudados. Arr = arredondados; Alon = alongados; Comp = complexos; tap = porosidade total; e LE = lado esquerdo (área selecionada próxima à borda esquerda).

O formato dos poros variou de forma significativa com as seqüências de ciclos de umedecimento e secamento para todos os solos, refletindo alterações na estrutura das amostras deformadas de solo (Figuras 9A, 9D e 9G), devido ao procedimento de amostragem, resultantes dos ciclos. Para o LVAd (Figuras 9A até 9C) houve um decréscimo da contribuição dos poros arredondados para a tap, um aumento pequeno dos poros alongados e um forte aumento dos poros complexos. O aumento marcante dos poros complexos foi a principal causa da variação na tap, após os ciclos de U-S. Para as amostras controle os poros arredondados ocuparam a maior parte da porosidade total (59%) seguidos dos poros

complexos (31%) e dos alongados (9%). Praticamente, não existem diferenças no formato dos poros entre os tratamentos T_1 e T_2 , no entanto, ambos exibiram diferenças importantes em relação às amostras controle. Por exemplo, para T_2 , os poros complexos foram responsáveis pela maior parte da *tap* (62%) seguidos dos poros arredondados (30%) e dos alongados (8%). Para o caso do NVe (Figuras 9D até 9F), as modificações mais importantes ocorreram principalmente para os poros arredondados com exceção dos poros complexos para T_1 . Este resultado pode ser explicado pelo pequeno número de repetições para T_1 (somente duas repetições) em relação aos demais tratamentos (seis repetições para cada). Este pequeno número de repetições para T_1 ocorreu devido a problemas durante a impregnação das amostras. Comparando as amostras controle com àquelas submetidas a nove ciclos de U-S o fator de aumento dos poros arredondados, alongados e complexos foi de 2,2; 3,2 e 3,6. Embora os poros alongados tenham contribuído somente com 15% da *tap* para T_2 , o fator de aumento deste tipo de poro é muito importante do ponto de vista agrônômico. O solo LVd exibiu resultados similares àqueles encontrados para o LVAd, com um marcante aumento dos poros complexos (Figuras 9G até 9I). Um pequeno decréscimo dos poros arredondados pode ser observado entre os tratamentos controle e T_2 . Este tipo de poro foi responsável por 42% da *tap* para as amostras controle e 24% para T_2 . Com relação aos poros alongados praticamente não existem diferenças entre tratamentos. Os poros complexos respondem pela maior parte da porosidade total (66%) para T_2 enquanto para as amostras controle estes poros foram responsáveis por 42% da *tap*. Para as amostras controle do LVd ambos os poros, arredondados e complexos, constituem os principais poros presentes nas amostras volumétricas, no entanto, com as seqüências de ciclos de U-S os poros complexos passam a adquirir grande importância. Os resultados para os solos LVAd e LVd permitem concluir que poucas seqüências de ciclos de umedecimento e secamento podem causar modificações importantes em amostras de solo coletadas em cilindros e danificadas pela amostragem. Por

um outro lado, o solo NVe apresentou um aumento constante na porosidade total com as seqüências de ciclos de U-S. Durante o umedecimento e subsequente secamento algumas propriedades físicas do solo podem sofrer modificações devido a fatores mecânicos, estresse e estado energético do solo (BAUMGARTL & KÖCK, 2004). O processo de umedecimento e secamento em geral resulta em pequenas alterações no volume total da amostra causadas por estresses devido às interfaces água/ar originadas a partir de forças capilares, as quais aumentam com a drenagem do solo. Como consequência, após cada processo de re-umedecimento a estrutura do solo irá sofrer novas modificações atingindo um novo estado de energia, o qual é provavelmente diferente do estado anterior (antes do primeiro umedecimento e secamento). Esta “nova” estrutura do solo não consegue retornar para o estado de energia original refletindo mudanças no sistema poroso do solo.

Com relação ao número total de poros (Figura 9) para o LVAd existem pequenas diferenças entre tratamentos para os poros alongados e complexos. Este resultado significa que o aumento na porosidade do solo ocorreu devido a um aumento no tamanho da área dos macroporos, principalmente para T_1 , uma vez que poucos poros complexos grandes contribuíram substancialmente para a variação da porosidade total. Provavelmente, este aumento no tamanho da área dos macroporos grandes foi induzido pelos ciclos de U-S. A redução da contribuição dos poros arredondados para a *tap* pode ser explicada pela diminuição no número deste tipo de poros entre tratamentos. No caso do NVe, foi observado um aumento constante no número total de poros com os ciclos de U-S. Esta variação no número de poros, entre tratamentos, pode explicar o aumento da contribuição dos poros arredondados e alongados para a *tap* (ver Figura 9). Para o LVd, foi observada uma diminuição no número total dos poros arredondados entre os tratamentos controle e T_2 . O número de poros alongados e complexos praticamente permaneceu constante. A redução no número de poros arredondados, com os ciclos de U-S, pode explicar o decréscimo na

contribuição deste tipo de poro para a *tap*. No entanto, o forte aumento da contribuição dos poros complexos para a *tap* seja uma consequência direta do aumento no tamanho da área dos macroporos grandes como demonstrado para este tipo de solo por Pires et al. (2005c).

A distribuição de tamanho dos poros (Figuras 10A até 10C) para as amostras do LVAd mostraram diferenças importantes entre tratamentos com uma variação grande dos macroporos complexos grandes (> 1 mm de diâmetro). A proporção destes poros complexos grandes entre tratamentos foi de 17 (controle), 54 (T_1) e 50% (T_2) da porosidade total. A redução dos poros arredondados, com as seqüências de ciclos de U-S, ocorreu para os poros entre 20 a 1000 μm . O aumento dos macroporos complexos pode ser identificado como uma evidência clara da diminuição das áreas compactadas, localizadas próximas às bordas do cilindro, como resultado direto dos ciclos de U-S. Para as amostras do NVe (Figuras 10D até 10F), a proporção dos poros arredondados situados na faixa de 20 a 500 μm foi de 68 (controle), 36 (T_1) e 44% (T_2) da porosidade total, mostrando um comportamento diferenciado em relação ao LVAd. A menor contribuição para a *tap*, relativa aos poros arredondados para T_1 , foi devido a uma contribuição significativa dos poros complexos grandes (51%) para este tratamento. Para T_2 , existe uma contribuição significativa de 17% dos poros arredondados maiores que 500 μm . Um outro resultado importante para este solo foi um fator de aumento de 3,2 na contribuição dos poros de transmissão alongados (50-300 μm) para a *tap* entre os tratamentos controle e T_2 . O aumento de todas as classes e tipos de poros entre tratamentos confirma a redução nas áreas compactadas próximas as bordas das amostras volumétricas com as seqüências de ciclos de U-S. Os resultados para as amostras do LVd (Figuras 10G até 10I) foram similares àqueles observados para o LVAd. A proporção dos poros complexos maiores que 0,5 mm foi de 41 (controle), 57 (T_1) e 65% (T_2) da porosidade total. Foi observado para este solo um leve decréscimo de 16 para 10% na contribuição dos

poros alongados (50-400 μm) para a *tap* e forte decréscimo dos poros arredondados (de 42 para 24%) entre os tratamentos controle e T₂.

Figura 10. Efeito dos ciclos de umedecimento e secamento na distribuição de tamanho dos poros de amostras danificadas pelo processo de amostragem para os três solos estudados. Arr = arredondados; Alon = alongados; Comp = complexos; *tap* = porosidade total; e LE = lado esquerdo (área selecionada próxima à borda esquerda).

As figuras 11 e 12 mostram imagens da área total ocupada pelos poros para as amostras dos diferentes solos depois de submetidas ao procedimento de amostragem e ciclos de umedecimento e secamento. O objetivo de mostrar essas imagens é fornecer um “insight” acerca do efeito dos ciclos de umedecimento e secamento na estrutura de amostras de solo deformadas durante a coleta.

Figura 11. Imagens binárias (poros aparecem em branco e a matriz do solo em preto) representando as variações na estrutura do solo nas áreas selecionadas próximo às bordas do cilindro e área central das amostras (ver Figura 1D). LE = lado esquerdo (área selecionada próxima à borda esquerda); C = área central; e LD = lado direito (área selecionada próxima à borda direita).

Existe uma diferença marcante nas áreas próximas as bordas do cilindro (LE e LD) e central (C) nas imagens para os solos LVAd e LVd. Na área central do LVAd (Figura 11B) pode ser observado a presença de alguns poros grandes e um grande número de poros pequenos. Próximo às bordas, ocorre um decréscimo destes poros grandes e um aumento de regiões mais adensadas. Este resultado representa uma possível compactação da estrutura do solo próximo as paredes do cilindro. Resultado similar pode ser observado para o LVd (Figuras 11G até 11I) com uma forte diminuição dos poros maiores. As amostras do NVe

(Figuras 11D até 11F) não exibiram grandes diferenças devido a estrutura massiva das amostras coletadas no campo para este solo.

Figura 12. Imagens binárias (poros aparecem em branco e a matriz do solo em preto) representando as variações na estrutura danificada dos três solos, pelo processo de amostragem, devido aos ciclos de umedecimento e secamento.

Existe uma diferença marcante na estrutura das amostras deformadas pelo procedimento de amostragem para o tratamento controle e àquelas submetidas às seqüências de ciclos de umedecimento e secamento para os três solos. Para todas as amostras, pode ser observada uma evolução de uma estrutura parcialmente massiva (Figuras 12A, 12D e 12G) para estruturas com um grande número de poros grandes conectados após os sucessivos ciclos de umedecimento e secamento.

9.4 Conclusões

Este trabalho teve por objetivo avaliar as possíveis modificações na estrutura de amostras volumétricas indeformadas de solo, usadas na determinação de propriedades físicas do solo, utilizando técnicas de análise de imagens. Técnicas de análise de imagens têm sido usadas com sucesso na caracterização da estrutura de meios porosos. Os resultados desta investigação permitiram caracterizar, em escala micrométrica, as mudanças ocorridas na estrutura do solo induzidas por seqüências de ciclos de umedecimento e secamento e pelo procedimento de amostragem. O uso da análise de imagens auxiliou na explicação da compactação próximo às bordas das amostras coletadas em cilindros (método do anel volumétrico) e forneceu informações detalhadas acerca das variações no formato, número e distribuição de tamanho dos poros ao longo de amostras de solo deformadas pelo processo de amostragem. O método possibilitou ainda acompanhar as modificações na estrutura das amostras deformadas de solo durante seqüências de ciclos de umedecimento e secamento. Este tipo de informação pode ser de extrema importância em medidas de retenção e condução de água pelo solo, uma vez que, em medidas de curvas de retenção, por exemplo, as amostras são submetidas a vários ciclos de umedecimento e secamento.

10 VARIAÇÕES NA RETENÇÃO DE ÁGUA DEVIDO AOS CICLOS DE UMEDECIMENTO E SECAMENTO

Resumo

Informações a respeito de possíveis modificações na estrutura do solo devido a ciclos de umedecimento e secamento (U-S) e, conseqüentemente, na retenção de água são praticamente inexistentes. Este trabalho faz uma análise do efeito de mudanças na estrutura do solo na retenção de água. Foram usados três tipos de solos possuindo texturas médio-arenosa e argilosa submetidos a zero (T_0), três (T_1) e nove (T_2) ciclos de U-S. Os resultados mostraram um aumento no número de microporos para todos os solos, após serem submetidos a sucessivos ciclos de umedecimento e secamento, seguido de um aumento na retenção de água a cada novo ciclo. As curvas de retenção obtidas também exibiram diferenças importantes para cada tratamento, mostrando que mudanças na estrutura do solo afetam determinações de curvas de retenção, principalmente, quando uma única amostra é usada para todos os pontos.

WATER RETENTION VARIATIONS DUE TO WETTING AND DRYING CYCLES

Abstract

Information regarding the possible changes on soil structure due to wetting and drying cycles (W-D) and, consequently, on water retention are practically scarce. This paper makes an analysis of the effect of soil structure changes on water retention. Soil samples having sandy and clayey textures were considered; they were submitted to none (T_0), three (T_1), and nine

(T₂) wetting and drying cycles. The obtained results showed an increase in the number of micropores after sequences of W-D cycles, followed by an increase on water retention. The evaluated water retention curves also had noticeable differences for each treatment, showing that soil structure changes affect the water retention measurements, mainly, when a unique sample is used to obtain the complete curve.

10.1 Introdução

A estrutura do solo está relacionada com o arranjo das partículas que constituem este meio poroso e possui papel fundamental nos processos que envolvem movimento e retenção de água. As influências estruturais do solo atuam em diversas escalas tanto macroscópicas como microscópicas. Mudanças estruturais em escala microscópica são extremamente importantes porque causam alterações no arranjo das partículas do solo e, conseqüentemente, mudanças na distribuição de poros (NIMMO, 1997).

Uma relação fundamental para a caracterização das propriedades hidráulicas de um solo é aquela existente entre a umidade (θ) e o seu potencial mátrico (ψ_m). A relação entre o potencial mátrico e a umidade do solo denomina-se curva de retenção da água no solo (REICHARDT & TIMM, 2004). Para as regiões de alto potencial mátrico, na qual os fenômenos capilares são os mais importantes, a curva de retenção é dependente da geometria da amostra, ou seja, do arranjo e das dimensões dos poros. Boas determinações da curva de retenção são extremamente importantes uma vez que conhecendo-se a curva para um dado solo, torna-se possível estimar o potencial mátrico pelo conhecimento da umidade e vice-versa (KUTÍLEK & NIELSEN, 1994). Caso não ocorram modificações significativas na geometria do sistema poroso, ao longo do tempo, a curva de retenção torna-se única, não precisando ser medida a cada experimento (REICHARDT & TIMM, 2004). Esta informação

é importante pelo fato de que os dados da curva são usados em simulações do transporte de água e produtos químicos ao longo do solo, em estimativas da quantidade de água a ser usada para irrigação e na predição de taxas de infiltração (PACHEPSKY et al., 2001).

Nos últimos anos têm sido realizados alguns estudos sobre as influências de mudanças estruturais do solo nas medidas da curva de retenção. Solos que apresentam compactação exibem uma diminuição de retenção de água na região de alto potencial mátrico e mais alta retenção para regiões de mais baixo ψ_m (LIPIEC & HATANO, 2003). Este resultado decorre do fato de que o processo de compactação afeta profundamente a estrutura do solo sendo uma indicação da diminuição de poros maiores e aumento dos menores (ASSOULINE et al., 1997). Nimmo (1997) desenvolveu um modelo para quantificar o efeito da estrutura em curvas de retenção, mostrando a importância desta na retenção de água pelo solo. Práticas de manejo também podem causar alterações na estrutura do solo e, conseqüentemente, na retenção de água. Ahuja et al. (1998) demonstraram o efeito das práticas de manejo nas curvas de retenção, mostrando que existem diferenças entre as curvas principalmente para as regiões de mais alto potencial mátrico. Com relação às modificações induzidas pela compactação na distribuição do tamanho de poros e, conseqüentemente, na retenção de água pelo solo um trabalho interessante é aquele escrito por Tarawally et al. (2004). Estes autores mostraram que o tráfego de implementos agrícolas em solos saturados e próximos a capacidade de campo causam fortes aumentos na quantidade de poros menores que $0,5 \mu m$. No entanto, quando o solo apresenta-se relativamente seco a compactação não apresenta efeitos significativos no volume de poros $< 0,5 \mu m$.

Um outro fator que pode causar impacto na estrutura das amostras usadas na obtenção de curvas de retenção, determinadas especialmente pelo método de Richards (RICHARDS, 1941), é a seqüência de ciclos de umedecimento e secamento (U-S) aplicada às amostras durante a própria execução do método. Ainda não existem trabalhos na literatura que

demonstrem o impacto destes ciclos na retenção de água. As curvas de retenção pelo método de Richards podem ser obtidas usando-se uma única amostra para todos os pontos da curva ou amostras distintas para cada um dos potenciais medidos. No entanto, para o último procedimento existe o problema da variabilidade espacial das amostras de solo (MORAES et al., 1993a; CICHOTA & JONG VAN LIER, 2004). Pires et al. (2005a) desenvolveram um novo método experimental para a determinação de curvas de retenção por meio de um conjunto experimental que associa a câmara de pressão com um feixe de radiação. Neste método a amostra precisa ser saturada uma única vez e a análise da variação da umidade para os diferentes potenciais aplicados é feita usando-se um feixe de radiação. Portanto, por esta nova metodologia os possíveis problemas que poderiam surgir na estrutura das amostras devido aos sucessivos ciclos de umedecimento e secamento seriam bastante minimizados.

Quando o solo é submetido ao umedecimento e secamento a sua estrutura pode sofrer rearranjos. Durante o processo de umedecimento os poros são preenchidos por água podendo modificar a orientação das partículas minerais da matriz do solo. Após o secamento, esta orientação das partículas da matriz do solo pode permanecer inalterada ou ser parcialmente alterada. Rajaram e Erbach (1999) mostraram que um único ciclo de U-S pode alterar certos parâmetros físicos do solo, tais como: resistência à penetração, tamanho e estabilidade dos agregados, etc. Telfair et al. (1957) mostraram que ciclos de U-S resultam na formação de agregados em solos que apresentam poucos agregados e podem ser usados para melhorar a estrutura de alguns solos danificados. Newman e Thomasson (1979) observaram que a estrutura do solo depende da estabilidade e regeneração dos poros com tamanhos entre 0,2 a 30 μm durante ciclos de U-S.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência dos ciclos de umedecimento e secamento na estrutura de três solos diferentes em textura e analisar o impacto destes ciclos na retenção de água pelo solo.

10.2 Material e Métodos

10.2.1 Coleta e preparo das amostras de solo

Amostras de três solos, diferentes em textura, caracterizados como: latossolo vermelho-amarelo distrófico (LVAd), nitossolo vermelho eutrófico (NVe) e latossolo vermelho distrófico (LVd), segundo a classificação da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, foram coletadas nas Fazendas Sertãozinho e Areão (USP/ESALQ) e na Fazenda do IAC, ambas situadas em Piracicaba (22°4' S; 47°38' W; 580 m acima do nível do mar). Quarenta e cinco amostras ($h = 3,0$ cm, $D = 4,8$ cm, $V = 55$ cm³) foram coletadas usando-se cilindros de alumínio e usadas na obtenção das curvas de retenção. Os tratamentos usados neste trabalho foram: amostras submetidas a nenhum ciclo de umedecimento e secamento, chamadas de controle (T_0), amostras submetidas a três (T_1) e nove ciclos (T_2) de U-S, respectivamente. Foram usadas cinco amostras para cada um dos tratamentos totalizando quinze amostras para cada solo. O procedimento de amostragem do solo encontra-se descrito em detalhes no capítulo 6 (*seção material e métodos*). O método de ascensão capilar foi o usado para o umedecimento das amostras (KLUTE, 1986). O procedimento de umedecimento e secamento do solo encontra-se descrito em detalhes no capítulo 8 (*seção material e métodos*). Informações sobre o procedimento para obtenção das curvas de retenção encontram-se descritas em detalhes no capítulo 4 (*seção teorias*).

10.2.2 Variações na retenção de água e nos volumes de micro e macroporos

Visando analisar o efeito dos ciclos de umedecimento e secamento na retenção de água, as amostras de solo indeformadas foram umedecidas e colocadas em uma mesa de

tensão em contato com um meio poroso (mataborrão) e submetidas a uma tensão de -60 cm (6 kPa) de água. A escolha deste nível de pressão é devido ao fato de ser aquele que representa a divisão teórica entre os micros e macroporos do solo. Portanto, o objetivo desta etapa experimental foi verificar a variação de volume de micro e macroporos do solo e, conseqüentemente, na retenção de água no intervalo de tensão de 0 a 6 kPa. Detalhes sobre o procedimento experimental para a determinação de macro e microporos em um solo podem ser encontrados em Embrapa (1997). Com o intuito de se evitar a perda de água das amostras por evaporação, enquanto presentes na mesa de tensão, foi colocada uma tampa de ferro sobre a mesa para isolar as amostras do ambiente externo.

Doze amostras de solo, quatro para cada solo, foram usadas neste experimento específico. O número de ciclos de U-S escolhido foi de nove. Geralmente este é o número de pontos utilizado na determinação de uma curva completa de retenção da água no solo. Gráficos da massa de água (m_{ag}) versus Dm_{ag}^2 foram feitos visando avaliar o impacto dos ciclos de U-S na estrutura do solo e na retenção de água.

10.3 Resultados e Discussão

10.3.1 Variação na estrutura e instabilidade na retenção de água

Visando avaliar o efeito das modificações estruturais na retenção de água pelo solo, análises de mudanças na massa de água retida pelo solo foram realizadas durante as várias seqüências de ciclos de U-S (Figura 1 e Tabela 1).

² Dm_{ag} representa a diferença na massa de água retida no solo entre dois ciclos de umedecimento e secamento consecutivos medida para a uma tensão de -60 cm de água. Diminuições entre estas diferenças indicam uma tendência de estabilidade no volume dos poros menores que constituem a estrutura do solo com as seqüências de ciclos de U-S.

Figura 1. Variação na retenção de água devido a alterações estruturais do solo induzidas por ciclos de umedecimento e secamento (U-S). Dm_{ag} representa a diferença no conteúdo de água entre dois ciclos de U-S consecutivos.

Os dados para os três solos indicam uma instabilidade na retenção de água com os sucessivos ciclos de U-S. Durante os procedimentos de umedecimento e secamento algumas propriedades físicas do solo podem mudar devido a fatores mecânicos relacionados à

porosidade total, estresse mecânico e estado de energia do solo (BAUMGARTL, 1998). Para amostras condicionadas em anéis volumétricos o processo de umedecimento e secamento muitas vezes pode acarretar alterações no volume total do solo. Estas modificações no volume são causadas principalmente por estresses durante o secamento, devido às interfaces água/ar gerarem forças capilares, as quais aumentam sua importância com a drenagem do solo. Como consequência, após cada processo de re-umedecimento a estrutura do solo irá sofrer novas modificações acomodando-se em um novo estado de energia. Este novo estado de energia é diferente dos estados anteriores e, provavelmente, a nova estrutura do solo não pode ser modificada, com a evolução dos ciclos, para o estado de energia inicial (antes da aplicação dos ciclos). Estas alterações no estado de energia podem explicar a instabilidade observada na retenção de água durante os subseqüentes ciclos de U-S. Os resultados obtidos (Figura 1) demonstram uma redução desta instabilidade com a evolução dos ciclos. Como estas análises de retenção de água foram realizadas em mesa de tensão (tensão equivalente a -60 cm de água) observou-se um aumento da massa de água retida, pelas amostras do três solos, com a evolução dos ciclos de U-S, o que representa uma provável alteração na relação entre macro e microporos. Estas modificações na porosidade do solo significam que com a evolução dos ciclos pode estar ocorrendo um provável aumento no número de meso e microporos, tendo como consequência uma maior quantidade de água sendo retida para as amostras que já foram submetidas a estes ciclos.

A diferença na amplitude do primeiro pico para as diferentes amostras de cada solo (Figura 1) dão uma idéia do efeito da amostragem para cada tipo de solo. Por exemplo, o LVAd exibe as menores variações entre amostras em comparação aos outros dois solos. Este resultado permite concluir que solos arenosos sofrem praticamente o mesmo impacto ao longo de toda a estrutura da amostra durante a amostragem. No caso de solos argilosos (NVe e LVd) o dano causado pelo procedimento de amostragem mostra-se mais heterogêneo,

provavelmente devido à estrutura destes solos. Alguns estudos têm mostrado que certos tipos de solo são mais susceptíveis a compactação que outros, especialmente os solos com textura média (CROSSMAN & CLINE, 1957).

Tabela 1 – Mudanças na retenção de água para os três solos submetidos aos ciclos de U-S.

Solo	Dm _{ag} (g)						
	1*	2	3	4	5	6	7
<i>LVAd</i>	0,03**	0,61	0,12	0,36	0,19	0,26	0,20
<i>NVe</i>	0,02	0,28	0,06	0,17	0,03	0,09	0,06
<i>LVd</i>	0,07	0,40	0,12	0,21	0,07	0,17	0,06

* Dm_{ag} = m_{ag(n+1)} – m_{ag(n)} (1 = diferença entre os ciclos 2 e 1) **Cada valor de massa de água representa um valor médio de quatro amostras.

Como pode ser observado a partir da tabela 1, as oscilações entre os valores máximos de m_{ag} (Figuras 1A até 1C) sofrem um forte decréscimo durante a sequência de ciclos de umedecimento e secamento para todos os solos. Com o objetivo de analisar o poder dos ciclos de U-S na modificação da estrutura do solo e, conseqüentemente, na retenção de água, foi definido um termo chamado Dm_{ag} que representa a diferença entre os valores máximos (picos) e mínimos (vales) de m_{ag} apresentados na figura 1. Os dados para o LVAd indicam variações de 0,58 (diferença entre os ciclos 2 e 1), 0,24 (4 e 3) e 0,07 g (6 e 5) na massa de água retida. A redução na Dm_{ag} entre o primeiro (Dm_1) e o último (Dm_3) vales e picos foi aproximadamente 88%. Os dados para os solos NVe e LVd mostram oscilações de 0,26; 0,11 e 0,06 g e 0,33; 0,09 e 0,10 g na m_{ag} com reduções entre Dm_1 e Dm_3 de 77 e 70%, respectivamente. Portanto, para os solos em questão, a redução observada no comportamento errático da variação nas massas de água (Figura 1) revela que a estrutura das amostras de solo comporta-se de forma dinâmica e tende a adquirir uma maior estabilidade com os ciclos de U-S.

10.3.2 Variação da micro e macroporosidade com os ciclos de U-S

A tabela 2 traz os resultados referentes à variação da microporosidade com o aumento no número de ciclos de U-S para um total de dez amostras para cada um dos solos.

Tabela 2 – Variação da microporosidade para os solos submetidos aos diferentes ciclos de umedecimento e secamento.

Solos	LVAd		NVe		LVd	
Ciclos	ϕ_{MICRO} (%)	R (%)*	ϕ_{MICRO} (%)	R (%)	ϕ_{MICRO} (%)	R (%)
1	23,25±1,22	1,56	35,36±0,97	1,23	35,07±1,63	1,45
2	23,20±1,03	1,57	35,36±1,03	1,23	35,27±1,61	1,45
3	24,33±1,08	1,49	35,87±1,04	1,21	36,10±1,66	1,41
4	24,54±1,10	1,48	35,98±1,03	1,21	36,25±1,66	1,41
5	25,20±1,16	1,44	36,29±1,05	1,20	36,73±1,75	1,39
6	25,56±1,26	1,42	36,34±1,05	1,20	36,91±1,82	1,38
7	26,03±1,29	1,40	36,53±1,05	1,19	37,19±1,86	1,37
8	26,41±1,28	1,38	36,64±1,04	1,19	37,29±1,93	1,37
9	27,54±1,24	1,32	37,15±1,05	1,17	37,96±2,04	1,34

* O termo *R* representa a razão entre a microporosidade e a porosidade total para cada um dos ciclos; Os valores de porosidade total para cada um dos solos são os seguintes: 36,34% (LVAd); 43,45% (NVe) e 50,98% (LVd).

Como pode ser observado a partir da tabela 2, todos os solos exibiram aumento no valor da microporosidade com a evolução dos ciclos de umedecimento e secamento. Para o LVAd, a variação em porcentagem da microporosidade entre o primeiro e o nono ciclos de U-S foi de 15,6%, já para os solos NVe e LVd esta variação foi de 4,8 e 7,6%, respectivamente. Esta menor variação para o NVe mostra que este solo é o que sofre menores modificações estruturais com o avanço no número de ciclos de U-S. Este resultado também fica bem evidenciado na análise da variação de massa de água retida pelo solo mostrada na figura 1B (ver Tabela 1). Os solos LVAd e o LVd são aqueles que apresentam as maiores variações da microporosidade com o aumento dos ciclos, sendo esta variação mais significativa para o

LVAd que para o LVd. O comportamento observado nas Figuras 1A e 1C estão coerentes com os resultados de aumento da microporosidade com o aumento no número de ciclos de U-S para estes dois solos, pois exibe um decréscimo na variação da massa de água com a evolução dos ciclos. A figura 2 a seguir traz uma análise das variações no fator R com o aumento dos ciclos de U-S.

(A)

(B)

(C)

Figura 2. Variação do fator R que representa a razão entre a microporosidade e a porosidade total com os ciclos de U-S.

Pelos resultados apresentados na figura 2 fica evidenciada a ocorrência das maiores variações de microporosidade para os solos LVAd e LVd. Para o caso do LVAd, pode ser observado um decréscimo contínuo do fator R , com exceção do ciclo 2, com o aumento dos ciclos de U-S. Esse decréscimo é aproximadamente linear e indica que este solo sofre modificações significativas com os sucessivos umedecimentos e secamentos. Para o NVe, o decréscimo do fator R é bastante modesto ao longo dos ciclos de U-S exibindo valores praticamente constantes a cada dois ciclos (1-2; 3-4; 5-6; 7-8) e decréscimos pequenos após cada um destes dois ciclos com valores praticamente iguais de R . Este resultado mostra um comportamento interessante para este tipo de solo que é a necessidade de sempre dois ciclos para a ocorrência de mudanças perceptíveis na estrutura do solo. Desta forma é possível concluir que este solo irá sofrer mudanças mais lentas na estrutura com os ciclos de U-S. O LVd também exibe um comportamento parecido com o NVe, no entanto, as reduções do fator R a cada dois ciclos são mais significativas que para o caso do NVe. Os resultados mostrados na figura 2 são uma clara indicação do efeito dos ciclos de umedecimento e secamento na estrutura do solo.

10.3.3 Curvas de retenção

Na tabela 3 são apresentados os resultados obtidos para as curvas de retenção determinadas na região de potencial mátrico de 0 a -120 kPa para cada um dos tratamentos e solos. A escolha deste intervalo de potencial mátrico ocorreu por ser o mais importante durante medidas de curvas de retenção pelo fato de estar relacionado aos poros com maiores dimensões do solo, os quais possuem grande importância para a pesquisa e agricultura prática (REICHARDT & TIMM, 2004). Cada valor de umidade representa uma média de cinco repetições para cada pressão aplicada.

Tabela 3 – Valores do potencial mátrico e da umidade e respectivos desvios padrão para cada valor de pressão aplicado nos diferentes solos submetidos à aplicação dos ciclos de umedecimento e secamento.

$-\psi_m$ (kPa)	<u>LVAd</u>			<u>NVe</u>			<u>LVd</u>			d (μm) ^a
	T ₀	T ₁	T ₂	T ₀	T ₁	T ₂	T ₀	T ₁	T ₂	
		U (g.g ⁻¹)			U (g.g ⁻¹)			U (g.g ⁻¹)		
0	0,229±0,017	0,213±0,012	0,222±0,008	0,275±0,008	0,264±0,010	0,270±0,009	0,375±0,022	0,337±0,018	0,367±0,011	-
1	0,209±0,010	0,199±0,013	0,204±0,006	0,257±0,007	0,244±0,012	0,249±0,007	0,322±0,014	0,309±0,017	0,341±0,004	300
3	0,178±0,004	0,175±0,008	0,177±0,004	0,233±0,005	0,225±0,008	0,231±0,002	0,298±0,015	0,289±0,014	0,310±0,002	100
6	0,148±0,006	0,144±0,004	0,150±0,006	0,222±0,004	0,211±0,007	0,216±0,001	0,272±0,013	0,273±0,012	0,286±0,007	50,0
9	0,132±0,006	0,130±0,003	0,139±0,006	0,217±0,006	0,206±0,007	0,210±0,001	0,263±0,014	0,266±0,011	0,278±0,007	33,3
10	0,130±0,005	0,128±0,003	0,137±0,006	0,216±0,004	0,204±0,007	0,208±0,002	0,260±0,012	0,264±0,010	0,275±0,007	30,0
30	0,104±0,010	0,100±0,002	0,115±0,008	0,202±0,003	0,192±0,006	0,195±0,002	0,239±0,015	0,249±0,007	0,258±0,007	9,8
50	0,096±0,004	0,093±0,002	0,108±0,009	0,185±0,001	0,183±0,006	0,187±0,003	0,230±0,017	0,233±0,005	0,241±0,008	6,0
90	0,085±0,007	0,087±0,003	0,105±0,011	0,181±0,001	0,179±0,006	0,183±0,002	0,219±0,012	0,227±0,004	0,235±0,008	3,3
120	0,082±0,004	0,081±0,003	0,097±0,010	0,178±0,001	0,175±0,006	0,180±0,002	0,214±0,011	0,225±0,004	0,231±0,008	2,5

^a O diâmetro dos poros foi obtido a partir da fórmula de ascensão capilar (REICHARDT & TIMM, 2004), fazendo-se $d \approx 3/h$ quando se considera a água a 25°C, onde d representa o diâmetro do poro em milímetros e h é a tensão expressa em centímetros de coluna de água (MORAES et al., 1993a).

Analisando-se os dados da tabela 3 é possível observar que após as amostras sofrerem os ciclos de umedecimento e secamento, existe uma mesma tendência para os três solos de reterem uma quantidade maior de água (comparação entre T_1 e T_2), à medida que aumenta o número de ciclos de U-S, uma vez que as curvas de retenção passam a se deslocar para a direita para os mesmos valores de potencial mátrico (Figura 3). Estas alterações estruturais dão uma indicação de que devem estar ocorrendo modificações importantes no espaço poroso das amostras de solo. Pillai e McGarry (1999) mostraram um aumento da retenção de água de solos cultivados com quatro diferentes culturas na camada de 0–10 cm após sucessivos ciclos de U-S. Estes autores concluíram que este resultado está diretamente relacionado com uma melhora da estrutura do solo e, ainda observaram que, para duas das quatro culturas estudadas, os ciclos de U-S ocasionaram um aumento no número de microporos. Miao et al. (2002) trabalhando com solos expansivos mostraram que o efeito da histerese, durante a obtenção de curvas de retenção, tende a diminuir à medida que amostras de solos são submetidas a vários ciclos de U-S. Estes autores apontaram como principal causa deste fenômeno os efeitos de aumento e diminuição do volume da amostra após eventos consecutivos de umedecimento e secamento. Bresson e Moran (2003) observaram aumentos da microporosidade e diminuições da macroporosidade se solos australianos após umedecimentos por ascensão capilar e posteriores secamentos. Os autores indicaram como possível causa deste aumento na microporosidade a quebra de agregados e aumento do número de agregados menores.

A partir dos dados da tabela 3, para o LVAd, é possível observar que praticamente não existem diferenças na retenção de água entre os tratamentos para os poros maiores e iguais a 50 μm (região dos macroporos). Porém, a retenção de água é ligeiramente menor para T_1 e T_2 quando comparados com T_0 , indicando uma possível redução de uma dada faixa de macroporos com a evolução dos ciclos de U-S. Os macroporos, também conhecidos como

poros não capilares, possuem tamanhos suficientes para que não sejam formadas interfaces curvas entre o ar e a água de modo que as forças capilares tornam-se nulas para estes tipos de poros (KUTÍLEK & NIELSEN, 1994). O formato dos macroporos é geralmente classificado em dois tipos: tubular e planar. O primeiro é causado pela ação de minhocas ou raízes mortas e o último por fissuras e fraturas causadas por rachaduras ou mudanças do volume do solo durante o processo de secamento. No entanto, para poros menores que 50 μm (região dos microporos) foi observada uma diferença importante na retenção de água entre T_2 e os outros dois tratamentos para o LVAd (Tabela 3). Este resultado permite concluir que nove ciclos de U-S causam alterações significativas na microporosidade deste tipo de solo. Para os dois primeiros tratamentos (sem e com aplicação de três ciclos) não foi possível identificar praticamente diferenças na quantidade de água retida. Os microporos, também conhecidos como poros capilares, são aqueles em que o formato da interface ar-água é determinado pela configuração dos poros e pelas forças atuantes na interface. Como resultado da ação destas forças ocorre a formação de um menisco com formato curvado. Quanto maior a curvatura, mais fortemente a água estará retida no solo. Os microporos podem ser divididos em duas categorias: poros relacionados a matriz e a estrutura do solo. Os poros relacionados a matriz encontram-se dentro dos agregados do solo ou dentro dos blocos de solo se não existem agregados presentes. O formato e tamanho dos agregados e dos blocos de solo dependem da gênese do solo. Agregados podem ou não ser estáveis durante o transporte de água. Os poros relacionados à estrutura do solo encontram-se entre agregados, e sua morfologia depende da gênese e do uso do solo. Os microporos são poros com diâmetro menor que 50 μm sendo responsáveis pela armazenagem da água pelo solo (KUTÍLEK, 2004).

Para o caso do NVe, praticamente não existem diferenças entre T_0 e T_2 com a evolução dos ciclos de U-S (Tabela 3), porém esses dois tratamentos diferem em relação a T_1 . Para os poros maiores que 50 μm é possível observar que as amostras de solo submetidas ao

T_0 retêm uma quantidade um pouco maior de água que para os outros dois tratamentos. Para os poros menores que $50\text{ }\mu\text{m}$ começa a ocorrer uma aproximação entre as curvas de retenção para todos os tratamentos, indicando um provável aumento no número de poros menores para este solo. Este resultado torna possível concluir que os ciclos de U-S causaram mudanças tênues para o NVe na escala de poros menores. Para o LVd foi possível observar uma diminuição na retenção de água para os poros maiores que $50\text{ }\mu\text{m}$ entre T_0 e T_1 . Para T_2 , que envolve a aplicação de nove ciclos de U-S, foi observada uma maior retenção de água com a evolução dos ciclos em relação aos demais tratamentos e inclusive para os poros maiores que $50\text{ }\mu\text{m}$. No trabalho de Pires et al. (2005c) foi mostrado que o LVd apresenta o aparecimento de buracos ou a evolução do tamanho da área daqueles já existentes na estrutura das amostras volumétricas coletadas em cilindros de alumínio. Resultados semelhantes aos obtidos para o LVd, envolvendo o aparecimento de buracos (grandes macroporos) na estrutura das amostras de solos, foram também observados para o LVAd e NVe, tornando possível explicar a diferença de retenção de água entre T_1 e T_2 para estes solos. Com relação à retenção de água para a região dos microporos para o LVd foram observadas diferenças importantes já entre T_0 e T_1 . As diferenças entre T_1 e T_2 ocorrem para todas as dimensões de poros investigados na curva de retenção, evidenciando o efeito dos ciclos de umedecimento e secamento na retenção de água para este solo.

A figura 3 a seguir traz as curvas de retenção obtidas para cada um dos solos e tratamentos.

Figura 3. Curvas de retenção obtidas para os três diferentes solos submetidos aos ciclos de U-S.

Analisando a figura 3 é possível observar que existem diferenças pequenas na quantidade de água retida para as amostras controle e os demais tratamentos para os potenciais próximos a saturação para todos os solos, sendo uma exceção o tratamento T₁ para o LVd. A única explicação possível para as amostras T₁, para este solo, seria problemas na

coleta das amostras usadas para o levantamento das curvas de retenção. Vale a pena ressaltar que essas amostras foram coletadas em área sob mata havendo um grande número de raízes no local da amostragem. Após a realização das curvas, as amostras foram destruídas e pequenos pedaços de raízes foram encontrados no interior de algumas delas. Imagens tomográficas mostraram que muitas amostras deste último solo apresentavam inúmeros buracos em sua estrutura.

Para o LVAd (Figura 3A), ocorreu uma aproximação entre as curvas no potencial mátrico de -6 kPa e, para potenciais menores que este, as curvas para T_0 e T_1 passaram a permanecer praticamente juntas e a curva para T_2 apresentou um aumento na retenção de água. Para o NVe (Figura 3B), as curvas apresentaram uma tendência de aproximação para valores mais baixos de potencial mátrico. Para T_0 e T_2 , as curvas permaneceram praticamente juntas para todos os potenciais mátricos usados, porém a partir do potencial de -50 kPa a curva referente a T_2 passou a apresentar uma maior retenção de água. Para o LVd (Figura 3C), as curvas mostram diferenças importantes para todos os valores de potencial mátrico, porém é possível observar uma aproximação entre as curvas para T_1 e T_2 . Essa aproximação também pôde ser observada para o NVe. Os solos LVAd e LVd apresentam uma maior retenção de água para o tratamento T_2 em relação aos demais tomando como referência o potencial mátrico de -10 kPa (após aplicação de seis ciclos de U-S); para o solo NVe isso ocorre somente após o potencial de -50 kPa. Vale lembrar que a amostra controle no potencial mátrico de -10 kPa ficou submetida a seis ciclos de U-S, as amostras T_1 e T_2 , a nove e quinze ciclos, respectivamente, uma vez que as amostras dos últimos dois tratamentos já haviam sido submetidas previamente a três e nove ciclos de U-S. Portanto, estes resultados confirmam aqueles obtidos na figura 1 que mostram um acréscimo na retenção de água pelo solo com o aumento no número de ciclos de umedecimento e secamento.

Porém, alguns resultados obtidos para as curvas de retenção da figura 3 não estão condizentes com o que deveria ser observado. Como o procedimento de amostragem causa uma certa compactação nas amostras coletadas em anéis volumétricos era de se esperar que para o valor de umidade equivalente ao potencial de 0 kPa (saturação) fosse encontrado um valor de θ menor para as amostras T_0 em relação aos outros tratamentos (DEXTER, 2004; ASSOULINE et al., 1997). No entanto, foi observado um resultado contrário para todos os solos, sendo uma exceção o LVd. Também foi mostrado em capítulos anteriores que os ciclos de U-S causam um aumento da porosidade do solo de modo que θ na saturação deveria ser maior para T_1 e T_2 em relação a T_0 na seguinte ordem: $\theta_{ST2} > \theta_{ST1} > \theta_{ST0}$. De fato isso ocorre para as amostras dos tratamentos T_1 e T_2 para todos os solos estando em acordo com o esperado. Um outro resultado obtido é que os ciclos de U-S causam um aumento no número de microporos. Portanto, o resultado esperado seria a existência de um afastamento entre as curvas de retenção para os pontos de alto potencial mátrico e uma provável aproximação para os pontos de mais baixo potencial com o aumento no número de umedecimentos e secamentos. Este resultado foi observado para os solos NVe e LVd, para T_1 e T_2 , e está condizente com os resultados da figura 1, que mostra que o aumento na retenção de água com os ciclos, para uma dada amostra, tende a se tornar cada vez menor a medida que aumenta o número de ciclos de U-S. Essa diminuição gradativa no aumento da retenção de água estaria associada com uma maior estabilidade alcançada pela estrutura do solo após sucessivos umedecimentos e secamentos. Um resultado estranho foi aquele obtido para a curva referente a T_2 para o LVAd que mostrou um afastamento em relação aos demais tratamentos para os pontos de mais baixo potencial mátrico. Vale a pena ressaltar que todas as curvas de retenção para os tratamentos T_1 e T_2 , para os três solos, foram obtidas conjuntamente, ou seja, as amostras foram umedecidas e submetidas ao secamento ao mesmo tempo. As curvas para as amostras controle foram obtidas posteriormente e, portanto, submetidas a condições

diferenciadas, principalmente, de umedecimento. Desta forma, o comportamento das amostras controle que se mostra diferente do esperado, de acordo com os resultados obtidos em capítulos anteriores e neste, pode estar associado a inúmeros fatores, tais como: variabilidade espacial, problemas no umedecimento, amostras pouco representativas, etc.

10.4 Conclusões

Os resultados mostrados neste trabalho fornecem uma idéia dos possíveis impactos dos ciclos de umedecimento e secamento na estrutura e retenção de água pelo solo. Comparando o comportamento das curvas de retenção (Figura 3) apresentadas fica evidenciado que para a região da curva de maior interesse do ponto de vista agrônômico (0 até -100 kPa) existem diferenças importantes entre os tratamentos, principalmente para os solos LVAd e LVd. À medida que ocorre o aumento no número de ciclos de U-S também ocorre um aumento na retenção de água pelo solo na região dos poros menores (microporos). Os resultados mostram que esse aumento na retenção de água é bastante significativo já nos primeiros ciclos e tende a ter um efeito menos proeminente com o aumento no número de umedecimentos e secamentos. Este efeito fica bem evidenciado para os solos NVe e LVAd, embora para o último passe a existir uma diferença significativa na retenção de água, entre T_1 e T_2 , para o potencial mátrico abaixo de -10 kPa. Para o LVd, a mesma tendência foi observada com o aumento no número de ciclos de U-S fazendo com que as curvas para T_1 e T_2 se aproximem, embora de forma mais lenta, ou seja, necessitam de um maior número de seqüências de umedecimentos e secamentos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHUJA, L.R.; FIEDLER, F.; DUNN, G.H.; BENJAMIN, J.G.; GARRISON, A. Changes in soil water retention curves due to tillage and natural reconsolidation. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.62, p.1228-1233, 1998.
- APPOLONI, C.R.; RIOS, E.A. Mass attenuation coefficients of brazilian soils in the range 10-1450 KeV. *Applied Radiation and Isotopes*, Oxford, v.45, p.287-291, 1994.
- APPOLONI, C.R.; MACEDO, A.; FERNANDES, C.P.; PHILIPPI, P.C. Caracterização de microestruturas porosas por microtomografia de raios X. In: SEMINÁRIO LATINO-AMERICANO DE ANÁLISES POR TÉCNICAS DE RAIOS-X, São Pedro, 2000. *Resumos expandidos*. São Pedro: SARX, 2000. CD ROM
- ASSOULINE, S.; TAVARES-FILHO, J.; TESSIER, D. Effect of compaction on soil physical and hydraulic properties: experimental results and modeling. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.61, p.390-398, 1997.
- BACCHI, O.O.S.; REICHARDT, K.; OLIVEIRA, J.C.M.; NIELSEN, D.R. Gamma-ray beam attenuation as an auxiliary technique for the evaluation of soil water retention curve. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v.55, p.499-502, 1998.
- BALOGUN, F.A.; CRUVINEL, P.E. Compton scattering tomography in soil compaction study. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research – Section A*, Oxford, v.505, p.502-507, 2003.
- BARBIZZI, S.; ZORZI, P.; BELLI, M.; PATI, A.; SANSONE, U.; STELLATO, L.; BARBINA, M.; DELUISA, A.; MENEGON, S.; COLETTI, V. Characterization of a reference site for quantifying uncertainties related to soil sampling. *Environmental Pollution*, Oxford, v.127, p.131-135, 2004.
- BAUMGARTL, Th. Physical soil properties in specific fields of application especially in anthropogenic soils. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v.47, p.51-59, 1998.
- BAUMGARTL, Th.; KÖCK, B. Modeling volume change and mechanical properties with hydraulic models. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.68, p.57-65, 2004.
- BAVEYE, P.; ROGASIK, H.; WENDROTH, O.; ONASCH, I.; CRAWFORD, J.W. Effect of sampling volume on the measurement of soil physical properties: simulation with X-ray tomography data. *Measurement Science and Technology*, Bristol, v.13, p.775-784, 2002.

BECKETT, P.H.T.; WEBSTER, R. Soil variability: a review. *Soil Fertility*, Amsterdam, v.34, p.1-15, 1971.

BORGIA, G.C.; BORTOLOTTI, V.; FANTAZZINI, P. Changes of the local pore scale structure quantified in heterogeneous porous media by ^1H magnetic resonance relaxation tomography. *Journal of Applied Physics*, Argonne, v.90, p.1155-1163, 2001.

BOUMA, J.; JONGERIJUS, A.; BOERSMA, O.H.; JAGER, A.; SCHOONDERBEEK, D. The function of different types of macropores during saturated flow through four swelling soil horizons. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.41, p.945-950, 1977.

BOUMA, J.; JONGERIJUS, A.; SCHOONDERBEEK, D. Calculation of saturated hydraulic conductivity of some pedal clay soils using micromorphometric data. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.43, p.261-264, 1979.

BRESSON, L.M.; MORAN, C.J. Structural changes induced by wetting and drying in seedbeds of a hardsetting soil with contrasting aggregate size distribution. *European Journal of Soil Science*, Oxford, v.46, p.205-214, 1995.

BRESSON, L.M.; MORAN, C.J. Role of compaction versus aggregate disruption on slumping and shrinking of repacked hardsetting seedbeds. *Soil Science*, Baltimore, v.168, p.585-594, 2003.

BROOKER, P.I. Modelling spatial variability using soil profiles in the Riverland of South Australia. *Environment International*, Oxford, v.27, p.121-126, 2001.

BRANDSMA, R.T.; FULLEN, M.A.; HOCKING, T.J.; ALLEN, J.R. An X-ray scanning technique to determine soil macroporosity by chemical mapping. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v.50, p.95-98, 1999.

BRAZ, D.; DE OLIVEIRA, L.F.; MORHY, O.N.; LOPES, R.T. Dental restorative materials analysis using 3D Ray microfocus tomography system. In: SEMINÁRIO LATINO-AMERICANO DE ANÁLISES POR TÉCNICAS DE RAIOS-X, São Pedro, 2000. *Resumos expandidos*. São Pedro: SARX, 2000. CD-ROM.

BREWER, R. *Fabric and mineral analysis of soils*. New York: John Wiley & Sons, 1964.

BREWER, R.; SLEEMAN, J.R. Soil structure and fabric: their definition and description. *Journal of Soil Science*, Oxford, v.11, p.172-185, 1960.

BUCKINGHAM, R.C. *Studies of the movement of soil moisture*. Washington: US Government Printing Office, 1907. 61p.

BULLOCK, P.; THOMASSON, A.J. Rothamsted studies of soil structure. II. Measurement and characterization of macroporosity by image analysis and comparison with data from water retention measurements. *Journal of Soil Science*, Oxford, v.30, p.391-413, 1979.

BULLOCK, P.; FEDOROFF, N.; JONGERIUS, A.; STOOPS, G.; TURSINA, T. *Handbook for soil thin section description*. Wolverhampton: Waine Research Publisher, 1985. 152p.

CAMPONEZ DO BRASIL, R.P. *Influência das técnicas de coleta de amostras na determinação das propriedades físicas do solo*. 2000. 110 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

CASTRO, S.S. *Micromorfologia de solos: pequeno guia para descrição de lâminas delgadas*. São Paulo: Departamento de Geografia – USP, 1988. 87p.

CASTRO, S.S.; COOPER, M.; SANTOS, M.C.; TORRADO, P.V. Micromorfologia de solos: bases e aplicações. In: CURI, N.; MARQUES, J.J.; GUILHERME, L.R.G.; LIMA, J.M.; LOPES, A.S.; ALVAREZ V.G. (Ed.) *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa: SBCS, 2003. p.107-164.

CENTURION, J.F.; MORAES, M.H.; DELLA LIBERA, C.L.P. Comparação de métodos para determinação da curva de retenção de água em solos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.21, p.173-179, 1997.

CESAREO, R.; GIANNINI, M. Elemental analysis by means of X-ray attenuation measurements. *Nuclear Instruments and Methods*, Oxford, v.169, p.551-555, 1980.

CESAREO, R.; DE ASSIS, J.T.; CRESTANA, S. Attenuation coefficients and tomographic measurements for soil in the energy range 10-300 keV. *Applied Radiation and Isotopes*, Oxford, v.45, p.613-620, 1994.

CHAHAL, R.S. Effect of temperature and trapped air on the energy status of water in porous media. *Soil Science*, Baltimore, v.98, p.107-112, 1963.

CHAHAL, R.S.; YONG, R.N. Validity of the soil water characteristics determined with pressurized apparatus. *Soil Science*, Baltimore, v.99, p.98-103, 1965.

CHERTKOV, V.Y.; RAVINA, I. Shrinking-swelling phenomenon of clay soils attributed to capillary-crack network. *Theoretical Applied Fractures Mechanics*, Amsterdam, v.34, p.61-71, 2000.

CICHOTA, R.; JONG VAN LIER, Q. Spatial variability analysis of sampling points of the soil water retention curve. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.28, p.585-596, 2004.

COILE, T.S. Moisture content of small stone in soil. *Soil Science*, Baltimore, v.75, p.203-207, 1953.

COLES, M.E.; HAZLETT, R.D.; MUEGGE, E.L.; JONES, K.W.; ANDREWS, B.; DOWD, B.; SIDDONS, P.; PESKIN, A.; SPANNE, P.; SOLL, W. Developments in synchrotron X-ray microtomography with applications to flow in porous media. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, Richardson, v.1, p.288-296, 1998.

COOPER, M. *Influência das condições físico-hídricas nas transformações estruturais entre horizontes B latossólicos e B textural sobre diabásico*. 1999. 130 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

COOPER, M.; VIDAL-TORRADO, P.; CHAPLOT, V. Origin of microagregates in soils with Ferric horizons. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v.62, p. 256-263, 2005.

COPPOLA, M.; REINIGER, P. Influence of the chemical composition on the gamma-ray attenuation by soils. *Soil Science*, Baltimore, v.117, p.331-335, 1974.

CONNER, A.L.; ATWATER, H.F.; PLASSMAN, E.H.; MACGRARY, J.H. Gamma-ray attenuation coefficients measurements. *Physics Review A*, Washington, v.1, p.539-544, 1970.

CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S.; POZZI-MUCELLI, R.S. Static and dynamic three-dimensional studies of water in soil using computerized tomography scanning. *Soil Science*, Baltimore, v.140, p.326-332, 1985.

CRESTANA, S.; CESAREO, R.; MASCARENHAS, S. Using a computed tomography miniscanner in soil science. *Soil Science*, Baltimore, v.142, p.56-61, 1986.

CROSSMAN, R.B.; CLINE, M.G. Fragipan horizons in New York soils. II. Relationships between rigidity and particle size distribution. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, v.21, p.322-325, 1957.

CRUVINEL, P.E.; CESAREO, R.; CRESTANA, S.; MASCAREÑAS, S. X- and γ -Ray computerized minitomograph scanner for soil science. ***IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement***, Albuquerque, v.39, p.745-750, 1990.

CUNHA E SILVA, R.M.; APPOLONI, C.R.; PARREIRA, P.S.; ESPINOZA-QUIÑONES, F.R.; COIMBRA, M.M., ARAGÃO, P.H.A. Two media method for gamma ray attenuation coefficient measurement of archaeological ceramic samples. ***Applied Radiation and Isotopes***, Oxford, v.53, p.1011-1016, 2000.

DANE, J.H.; OOSTROM, M.; MISSILDINE, B.C. An improved method for the determination of capillary pressure-saturation curves involving TCE, water and air. ***Journal of Contaminant Hydrology***, Amsterdam, v.11, p.69-81, 1992.

DE BACKER, L.S.; KLUTE, A. Comparison of pressure and suction methods for soil-water content-pressure head determinations. ***Soil Science***, Baltimore, v.104, p.46-55, 1967.

DEMATTE, J.L.I.; WILDING, L.P.; HOLOWAYCHUCK, N. Solos da região de São Pedro, Estado de São Paulo. III. Micromorfologia. ***Revista Brasileira de Ciência do Solo***, Viçosa, v.1, p.104-107, 1977.

DENEF, K.; SIX, J.; PAUSTIAN, K.; MERCKX, R. Importance of macroaggregate dynamics in controlling soil carbon stabilization: short-term effects of physical disturbance induced by dry-wet cycles. ***Soil Biology and Biochemistry***, Oxford, v.33, p.2145-2153, 2001a.

DENEF, K.; SIX, J.; BOSSUYT, H.; FREY, S.D.; ELLIOTT, E.T.; MERCKX, R.; PAUSTIAN, K. Influence of dry-wet cycles on the interrelationship between aggregate, particulate organic matter, and microbial community dynamics. ***Soil Biology and Biochemistry***, Oxford, v.33, p.1599-1611, 2001b.

DE SWART, J.G.; GROENEVELT, P.H. Column scanning with 60 keV gamma radiation. ***Soil Science***, Baltimore, v. 112, p. 419-424, 1971.

DEXTER, A.R. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. ***Geoderma***, Amsterdam, v.120, p.201-214, 2004.

ELRICK, D.E.; TANNER, C.B. Influence of sample pretreatment on soil moisture retention. ***Soil Science Society of America Journal***, Madison, v.19, p.279-282, 1955.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. *Manual de métodos de análise de solo*. Rio de Janeiro: EMBRAPA, CNPS, 1997. 212p.

FALCI, S.C.; MENDES, A.C.T. Identificação de cutans em perfis de latossol roxo e terra roxa estruturada. *Anais da ESALQ*, Piracicaba, v.30, p.49-70, 1973.

FANTE JÚNIOR, L.; OLIVEIRA, J.C.M.; BASSOI, L.H.; VAZ, C.M.P.; MACEDO, A.; BACCHI, O.O.S.; REICHARDT, K. Tomografia computadorizada na avaliação da densidade de um solo do semi-árido brasileiro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.26, p.835-842, 2002.

FERGUSON, H.; GARDNER, W.H. Water content measurement in soil columns by gamma ray absorption. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.26, p.11-14, 1962.

FERRAZ, E.S.B. *Determinação simultânea de densidade e umidade de solos por atenuação de raios gama do ^{137}Cs e ^{241}Am* . 1974. 120 f. Tese (Livre Docência) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1974.

FERRAZ, E.S.B.; MANSELL, R.S. *Determining water content and bulk density of soil by gamma ray attenuation methods*. Flórida: IFAS - Institute of Food and Agricultural Sciences, University of Florida, 1979. 51p.

FLINT, A.L., FLINT, L.E. The solid phase: Particle density. In: DANE, J.H.; TOPP, G.C. (Ed.) *Methods of soil analysis*. Part 4. Physical Methods. Madison: ASA; SSSA, 2002. p.229-240.

GANTZER, C.J.; ANDERSON, S.H. Computed tomographic measurement of macroporosity in chisel-disk and no-tillage seedbeds. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v.64, p.101-111, 2002.

GOBIN, A.; CAMPLING, P.; FEYEN, J. Soil-Landscape modelling to quantify spatial variability of soil texture. *Physics and Chemistry of the Earth B*, Oxford, v.26, p.41-45, 2001.

GREENLAND, D.J. Soil damage by intensive arable cultivation: temporary or permanent? *Transactions of the Royal Society of London*, London, v.281, p.193-208, 1977.

GROHMANN, F. Distribuição do tamanho de poros em três tipos de solos do Estado de São Paulo. *Bragantia*, Campinas, v.19, p.319-328, 1960.

GROSSMAN, R.B.; REINSCH, T.G. The solid phase: Bulk density and linear extensibility. In: DANE, J.H., TOPP, G.C. (Ed.) *Methods of soil analysis*. Part 4. Physical Methods. Madison: ASA; SSSA, 2002. p.201-238.

GURR, C.G. Use of gamma rays in measurement of water content and permeability in unsaturated columns of soil. *Soil Science*, Baltimore, v.94, p.224-229, 1962.

HAINSWORTH, J.M.; AYLMORE, L.A.G. The use of computer-assisted tomography to determine spatial distribution of soil water content. *Australian Journal of Soil Research*, Collingwood, v.21, p.435-443, 1983.

HELSEL, D.R.; HIRSCH, R.M. *Statistical methods in water resources*. New York: Elsevier, 1992. 522p.

HERBST, M.; DIEKKRÜGER, B. The influence of the spatial structure of soil properties on water balance modeling in a microscale catchment. *Physics and Chemistry of the Earth B*, Oxford, v.27, p.701-710, 2002.

HERMAN, G.T. *Image reconstruction from projections*. London: Academic Press, 1980. 316p.

HILLEL, D. *Introduction to soil physics*. New York: Academic Press, 1982. 365p.

HORGAN, G.W. Mathematical morphology for analyzing soil structure from images. *European Journal of Soil Science*, Oxford, v.49, p.161-173, 1998.

HOUNSFIELD, G.N. Computerized transverse axial scanning (tomography). 1. Description of system. *British Journal of Radiology*, London, v.46, p.1016-1022, 1973.

HUSSEIN, J.; ADEY, M.A. Structural changes in a Vertisol due to wet/dry cycles in the liquid and vapour phases. *European Journal of Soil Science*, Oxford, v.46, p.357-368, 1995.

HUSSEIN, J.; ADEY, M.A. Changes in microstructure, voids and b-fabric of surface samples of a Vertisol caused by wet/dry cycles. *Geoderma*, Amsterdam, v.85, p.63-82, 1998.

KING, L.G. Gamma ray attenuation for soil-water-content measurement using ²⁴¹Am. In: SYMPOSIUM ON THE USE OF ISOTOPE AND RADIATION TECHNIQUES IN SOIL PHYSICS AND IRRIGATION STUDIES, Istanbul, 1967. Vienna: IAEA, 1967. p.17-29.

KAK, A.C.; SLANEY, M. *Principles of computerized tomographic imaging*. New York: IEEE Press, 1988. 327p.

KAPLAN, I. *Física nuclear*. 2.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1983. 633p.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: BLACK, C.A. (Ed.) *Methods of soil analysis*. I. Physical and mineralogical methods. Madison: ASA; SSSA, 1986. p.635-662.

KOOREVAAR, P.; MENELIK, G.; DIRKSEN, C. *Elements of soil physics*. Amsterdam: Elsevier, 1983. 228p.

KRIBAA, M.; HALLAIRE, V.; CURMI, P.; LAHMAR, R. Effect of various cultivation methods on the structure and hydraulic properties of a soil in a semi-arid climate. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v.60, p.43-53, 2001.

KUBIENA, W.L. *Micropedology*. Iowa: Collegiate Press, 1938. 243p.

KUTÍLEK, M.; NIELSEN, D.R. *Soil hydrology*. Berlin: Catena Verlag, 1994. 370p.

KUTÍLEK, M. Soil hydraulic properties as related to soil structure. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v.79, p.175-184, 2004.

JALBERT, M.; DANE, J.H. Correcting laboratory retention curves for hydrostatic fluid distributions. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.65, p.648-654, 2001.

JAMISON, V.C. Sand-silt suction column for determination of moisture retention. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.22, p.82-83, 1958.

JÉGOU, D.; BRUNOTTE, J.; ROGASIK, H.; CAPOWIEZ, Y.; DIESTEL, H.; SCHRADER, S.; CLUZEAU, D. Impact of soil compaction on earthworm burrow systems using X-ray computed tomography: preliminary study. *Soil Biology*, Amsterdam, v.38, p.329-336, 2002.

JENKINS, R.; GOULD, R.W.; GEDCKE, D. *Quantitative X-ray spectrometry*. New York: Marcel Dekker, 1981. 586p.

JENNESON, P.M.; GILBOY, W.B.; MORTON, E.J.; GREGORY, P.J. An X-ray micro-tomography system optimized for the low-dose study of living organisms. *Applied Radiation and Isotopes*, Oxford, v.58, p.177-181, 2003.

JONGERIUS, A.; SCHOONDERBEEK, D.; JAGER, A. The application of the Quantimet 720 in soil micromorphometry. **The Microscope**, Chicago, v.20, p.243-254, 1972.

LANGMAACK, M.; SCHRADER, S.; RAPP-BERNHARDT, U.; KOTZE, K. Soil structure rehabilitation of arable soil degraded by compaction. **Geoderma**, Amsterdam, v.105, p.141-152, 2002.

LEHRSCHE, G.A. Freeze-thaw cycles increase near-surface aggregate stability. **Soil Science**, Baltimore, v.163, p.63-70, 1998.

LI, D.; VELDE, B.; ZHANG, T. Observations of pores and aggregates during aggregation in some clay-rich agricultural soils as seen in 2D image analysis. **Geoderma**, Amsterdam, v.118, p.191-207, 2004.

LIBARDI, P. **Dinâmica da água no solo**. Piracicaba: O autor, 2000. 509p.

LIPIEC, J.; HATANO, R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth. **Geoderma**, Amsterdam, v.116, p.107-136, 2003.

LUNDQUIST, E.J.; JACKSON, L.E.; SCOW, K.M. Wet-dry cycles affect dissolved organic carbon in two California agricultural soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v.31, p.1031-1038, 1999.

MACEDO, A.; CRESTANA, S.; VAZ, C.M.P. X-ray microtomography to investigate thin layers of soil clod. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.49, p.249-253, 1998.

MACEDO, A.; VAZ, C.M.P.; NAIME, J.M.; CRUVINEL, P.E.; CRESTANA, S. X-ray microtomography to characterize the physical properties of soil and particulate systems. **Powder Technology**, Lausanne, v.101, p.178-182, 1999.

MARSILI, A.; SERVADIO, P.; PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N. Changes of some physical properties of a clay soil following passage of rubber- and metal-tracked tractors. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.49, p.185-199, 1998.

MENDES, A.C.T.; FALCI, S.C.; DEMATTÉ, J.L.I. Seções delgadas de solos: método de impregnação. **Anais da ESALQ**, Piracicaba, v.30, p.35-48, 1973.

MIAO, L.; LIU, S.; LAI Y. Research of soil-water characteristics and shear strength features of Nanyang expansive soil. **Engineering Geology**, Amsterdam, v.65, p.261-267, 2002.

MICROVIS. *Programa de reconstrução e visualização de imagens tomográficas*. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2000. 18p.

MILLER, D.G. **Americium-241 as a photon source of the gamma absorption metric technique**. Oak Ridge: USAEC. 1955. (Report HW 39971. Chemistry TID - 4500).

MOOLMAN, J.H. Soil textural properties influencing compactibility. *Agrochemophysica*, Amsterdam, v.13, p.13-19, 1981.

MORAES, S.O. *Heterogeneidade hidráulica de uma terra roxa estruturada*. 1991. 141 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.

MORAES, S.O.; LIBARDI, P.L.; DOURADO NETO, D. Problemas metodológicos na obtenção da curva de retenção da água pelo solo. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v.50, p.383-392, 1993a.

MORAES, S.O.; LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S. Heterogeneity of experimental points of soil-water retention curves. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v.50, p.393-403, 1993b.

MOURA FILHO, W.; BUOL, S.W. Studies of a Latosol Roxo (Eutrustox) in Brazil: Micromorphology effect on ion release. *Experientiae*, Viçosa, v.21, p.161-177, 1976.

MURPHY, C.P.; BULLOCK, P.; TURNER, R.H. The measurement and characterization of voids in soil thin sections by image analysis: Part I: Principles and techniques. *Journal of Soil Science*, Oxford, v.28, p.498-508, 1977a.

MURPHY, C.P.; BULLOCK, P.; TURNER, R.H. The measurement and characterization of voids in soil thin sections by image analysis: Part I: Applications. *Journal of Soil Science*, Oxford, v.28, p.509-518, 1977b.

MURPHY, C.P. *Thin section preparation of soils and sediments*. Berkhamsted: Academic Publishers, 1986. 149p.

NEWMAN, A.C.D.; THOMASSON, A.J. Rothamsted studies of soil structure: III. Pore size distributions and shrinkage processes. *Journal of Soil Science*, Oxford, v.30, p.415-439, 1979.

NIMMO, J.R. Modeling structural influences on soil water retention. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.61, p.712-719, 1997.

OLESEN, D.E. Gamma radiation for measuring water contents in soils columns with changing bulk density. *Journal of Soil Science*, Oxford, v.24, p.461-469, 1973.

OLIVEIRA, J.C.M.; VAZ, C.M.P.; REICHARDT, K.; SWARTZENDRUBER, D. Improved soil particle-size analysis by gamma-ray attenuation. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.61, p.23-26, 1997.

OLIVEIRA, J.C.M.; APPOLONI, C.R.; COIMBRA, M.M.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S.; FERRAZ, E.; SILVA, S.C.; GALVÃO FILHO, W. Soil structure evaluated by gamma-ray attenuation. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v.48, p.127-133, 1998.

PACHEPSKY, Y.; RAWLS, W.J.; GIMÉNEZ, D. Comparison of soil water retention at field and laboratory scales. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.65, p.460-462, 2001.

PAGLIAI, M.; BISDOM, E.B.A.; LEDIN, S. Changes in surface structure (crusting) after application of sewage sludges and pig slurry to cultivated agricultural soils in northern Italy. *Geoderma*, Amsterdam, v.30, p.35-53, 1983.

PAGLIAI, M. Micromorphometric and micromorphological investigations on the effect of compaction by pressures and deformations resulting from tillage and wheel traffic. In: MONNIER, G., GOSS, M.J. (Ed.) *Soil compaction and regeneration*. Rotterdam: A.A. Balkema, 1987. p.31-38.

PAGLIAI, M.; LA MARCA, M.; LUCAMANTE, G. Changes in soil porosity in remolded soils treated with poultry manure. *Soil Science*, Baltimore, v.144, p.128-140, 1987.

PAGLIAI, M. Soil porosity aspects. *International Agrophysics*, Lublin, v.4, p.215-232, 1988.

PAGLIAI, M.; ROUSSEVA, S.; VIGNOZZI, N.; PIOVANELLI, C.; PELLEGRINI, S.; MICLAUS, N. Tillage impact on soil quality. I. Soil porosity and related physical properties. *Italian Journal Agronomy*, Rome, v.2, p.11-20, 1998.

PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N. Use of manure for soil improvement. In: WALLACE, A.; TERRY, R.E. (Eds) *Handbook of soil conditions: Substances that enhance the physical properties of soil*. New York: Marcel Dekker, 1998.

PAGLIAI, M. *Soil structure*. Trieste: ICTP, 2001. 44p. (College on Soil Physics).

PAGLIAI, M.; MARSILI, A.; SERVADIO, P.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S. Changes in some physical properties of a clay soil in central Italy following the passage of rubber tracked and wheeled tractors of medium power. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v.73, p.119-129, 2003.

PARDINI, G.; VIGNA GUIDI, G.; PINI, R.; REGÜÉS, D.; GALLART, F. Structure and porosity of smectitic mudrocks as affected by experimental wetting-drying cycles and freezing-thawing cycles. *Catena*, Amsterdam, v.27, p.149-165, 1996.

PAULUS, M.J.; SARI-SARRAF, H.; GLEASON, S.S.; BOBREK, M.; HICKS, J.S.; JOHNSON, D.K.; BEHEL, J.K.; THOMPSON, L.H.; ALLEN, W.C. A new X-ray computed tomography system for laboratory mouse imaging. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, Albuquerque, v.46, p.558-564, 1999.

PEDROTTI, A.; PAULETTO, E.A.; CRESTANA, S.; CRUVINEL, P.E.; VAZ, C.M.P.; NAIME, J.M.; DA SILVA, A.M. Planossol soil sample size for computerized tomography measurement of physical parameters. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v.60, p.735-740, 2003.

PERECIN, D.; CAMPOS, D.A.F. Evidencias micromorfológicas de gênese de solos de Piracicaba, SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 15., 1975, Campinas. *Anais*. Campinas: SBCS, 1976. p.461-466.

PERRET, J.; PRASHER, S.O.; KANTZAS, A.; LANGFORD, C. Three-dimensional quantification of macropore networks in undisturbed soil cores. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.63, p.1530-1543, 1999.

PERROUX, K.M.; RAATS, P.A.C.; SMILES, D.E. Wetting moisture characteristic curves derived from constant-rate infiltration into thin samples. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.46, p.231-234, 1982.

PETROVIC, A.M.; SIEBERT, J.E.; RIEKE, P.E. Soil bulk density analysis in three dimensions by computed tomographic scanning. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.46, p.445-450, 1982.

PHOGAT, V.K.; AYLMORE, L.A.G. Evaluation of soil structure by using computer-assisted tomography. *Australian Journal of Soil Research*, Collingwood, v.27, p.313-323, 1989.

PHOGAT, V.K.; AYLMOORE, L.A.G.; SCHULLER, R.D. Simultaneous measurement of the spatial-distribution of soil-water content and bulk-density. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.55, p.908-915, 1991.

PILLAI, U.P.; MCGARRY, D. Structure repair of a compacted vertisol with wet-dry cycles and crops. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.63, p.201-210, 1999.

PIRES, L.F.; MACEDO, J.R.; SOUZA, M.D.; BACCHI, O.O.S.; REICHARDT, K. Gamma-ray computed tomography to characterize soil surface sealing. *Applied Radiation and Isotopes*, Oxford, v.57, p.375-380, 2002.

PIRES, L.F.; MACEDO, J.R.; SOUZA, M.D.; BACCHI, O.O.S.; REICHARDT, K. Gamma-ray computed tomography to investigate compaction on sewage-sludge-treated soil. *Applied Radiation and Isotopes*, Oxford, v.59, p.17-25, 2003.

PIRES, L.F.; ARTHUR, R.C.; CAMPONEZ DO BRASIL, R.P.; CORRECHEL, V.; BACCHI, O.O.S.; REICHARDT, K. The use of gamma ray computed tomography to investigate soil compaction due to core sampling devices. *Brazilian Journal of Physics*, São Paulo, v.34, p.728-731, 2004a.

PIRES, L.F.; BACCHI, O.O.S.; REICHARDT, K. Damage to soil physical caused by soil sampler devices as assessed by gamma ray computed tomography. *Australian Journal of Soil Research*, Collingwood, v.42, p.857-863, 2004b.

PIRES, L.F.; BACCHI, O.O.S.; REICHARDT, K. Soil water retention curve determined by gamma-ray beam attenuation. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v.82, p.89-97, 2005a.

PIRES, L.F.; BACCHI, O.O.S.; REICHARDT, K. Application of γ -ray computed tomography to analysis of soil structure before density evaluations. *Applied Radiation and Isotopes*, Oxford, v.63, p.505-511, 2005b.

PIRES, L.F.; BACCHI, O.O.S.; REICHARDT, K. Gamma ray computed tomography to evaluate wetting/drying soil structure changes. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, Oxford, v.229, p.443-456, 2005c.

POTTKER, W.E.; APPOLONI, C.R. Measurement of amorphous materials porosity by gamma-ray transmission methodology. *Radiation Physics and Chemistry*, Oxford, v.61, p.535-536, 2001.

RAJARAM, G.; ERBACH, D.C. Effect of wetting and drying on soil physical properties. *Journal of Terramechanics*, Oxford, v.36, p.39-49, 1999.

RALISCH, R.; TAVARES FILHO, J. Compactação: uma preocupação pertinente. *A Granja*, Porto Alegre, v.646, p.55-57, 2002.

RAMSEY, M.H. Measurement uncertainty arising from sampling: Implications for the objectives of geoanalysis. *Analyst*, Cambridge, v.122, p.1255-1260, 1997.

RAMSEY, M.H.; SQUIRE, S.; GARDNER, M.J. Synthetic reference sampling target for the estimation of measurement uncertainty. *Analyst*, Cambridge, v.124, p.1701-1706, 1999.

RASIAH, V.; AYLMOORE, L.A.G. Computed tomography data on soil structural and hydraulic parameters assessed for spatial continuity by semivariance geostatistics. *Australian Journal of Soil Research*, Collingwood, v.36, p.485-493, 1998.

REEVE, M.J.; SMITH, P.D.; THOMASSON, A.J. The effect of density on water retention properties of field soils. *Journal of Soil Science*, Oxford, v.24, p.355-367, 1973.

REGINATO, R.J.; VAN BAVEL, C.H.M. Pressure cell for soil cores. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.26, p.1-3, 1962.

REGÜÉS, D.; PARDINI, G.; GALLART, F. Regolith behaviour and physical weathering of clayey mudrock as dependent on seasonal weather conditions in a badland area at Vallcebre, Eastern Pyrenees. *Catena*, Amsterdam, v.25, p.199-212, 1995.

REICHARDT, K. *Uso da radiação gama na determinação da densidade aparente e da umidade do solo*. 1965. 34 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1965.

REICHARDT, K.; VIEIRA, S.R.; LIBARDI, P.L. Soil spatial variability and field experimentation. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.10, p.1-6, 1987.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. *Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações*. Barueri: Manole, 2004. 478p.

RICHARDS, L.A. The usefulness of capillary potential to soil moisture and plant investigators. *Journal of Agriculture Research*, Washington, v.37, p.719-742, 1928.

RICHARDS, L.A. A pressure-membrane extraction apparatus for soil solution. *Soil Science*, Baltimore, v.51, p.377-386, 1941.

RICHARDS, L.A.; FIREMAN, M. Pressure plate apparatus for measuring moisture sorption and transmission by soils. *Soil Science*, Baltimore, v.56, p.395-404, 1943.

RINGROSE-VOASE, A.J. One-dimensional image analysis of soil structure. I. Principles. *Journal of Soil Science*, Oxford, v.41, p.499-512, 1990.

RINGROSE-VOASE, A.J.; BULLOCK, P. The automatic recognition and measurement of soil pore types by image analysis and computer programs. *Journal of Soil Science*, Oxford, v.35, p.673-684, 1984.

RINGROSE-VOASE, A.J.; NYS, C. One-dimensional image analysis of soil structure. II. Interpretation of parameters with respect to four forest soil profiles. *Journal of Soil Science*, Oxford, v.41, p.513-527, 1990.

ROGASIK, H.; CRAWFORD, J.W.; WENDROTH, O.; YOUNG, I.M.; JOSCHKO, M.; RITZ, K. Discrimination of soil phases by dual energy X-ray tomography. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.63, p.741-751, 1999.

ROGASIK, H.; ONASCH, I.; BRUNOTTE, J.; JEGOU, D.; WENDROTH, O. Assessment of soil structure using X-ray computed tomography. In: MEES, F.; SWENNEN, R.; VAN GEET, M.; JACOBS, P. (Ed.) *Applications of X-ray computed tomography in the geosciences*. London: Geological Society, 2003. p.151-165.

SARMAH, A.K.; PILLAI- McGARRY, U.U.P.; McGARRY, D. Repair of the structure of a compacted Vertisol via wet/dry cycles. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v.38, p.17-33, 1996.

SARTORI, G.; FERRARI, G.A.; PAGLIAI, M. Changes in soil porosity and surface shrinkage in a remolded, saline clay soil treated with compost. *Soil Science*, Baltimore, v.139, p.523-530, 1985.

SCHAEFER, C.E.R.; SOUZA, C.M.; VALLEJOS, M.; VIANA, J.H.M.; GALVÃO, J.C.C.; RIBEIRO, L.M. Características da porosidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo submetido a diferentes sistemas de preparo de solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.25, p.765-769, 2001.

SCHROER, C.G. Reconstructing X-ray fluorescence microtomograms. *Applied Physics Letters*, Argonne, v.79, p.1912-1914, 2001.

SLATTERY, M.C.; BRYAN, R.B. Surface seal development under simulated rainfall on an actively eroding surface. *Catena*, Amsterdam, v.22, p.17-34, 1994.

STAMPANONI, M.; BORCHERT, G.; ABELA, R.; RUEGSEGG, P. Nanotomography based on double asymmetrical Bragg diffraction. *Applied Physics Letters*, Argonne, v.82, p.2922-2924, 2003.

STENSTROM, M.; OLANDER, B.; CARLSSON, C.A.; ALM CARLSSON, G.; LEHTO-AXTIELIUS, D.; HAKANSON, R. The use of computed microtomography to monitor morphological changes in small animals. *Applied Radiation and Isotopes*, Oxford, v.49, p.565-570, 1998.

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. *Revista Brasileira de Engenharia Agrônômica e Ambiental*, Viçosa, v.6, p.207-212, 2002.

STROOSNIJDER, L.; DE SWART, J.G. Column scanning with simultaneous use of ^{241}Am and ^{137}Cs gamma radiation. *Soil Science*, Baltimore, v.118, p.61-69, 1974.

SURFER. *Surface mapping system*. Colorado: Golden Software Inc., 1997.

TARAWALLY, M.A.; MEDINA, H.; FRÓMETA, M.E.; ITZA, C.A. Field compaction at different soil-water status: effects on pore size distribution and soil water characteristics of a Rhodic Ferralsol in Western Cuba. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v.76, p.95-103, 2004.

TELFAR, D.; GARDNER, M.R.; MIARS, D. The restoration of a structurally degenerated soil. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.21, p.131-134, 1957.

TESSIER, D.; BEAUMONT, A.; PEDRO, G. Influence of clay mineralogy and rewetting rate on clay microstructure. In: DOUGLAS, L.A. (Ed.) *Soil micromorphology*. Amsterdam: Elsevier Science Publisher, 1990. p.115-121.

THOMPSON, M.L.; SINGH, P.; CORAK, S.; STRASZHEIM, W.E. Cautionary notes for the automated analysis of soil pore-space images. *Geoderma*, Amsterdam, v.53, p.399-415, 1992.

TREIMER, W.; STROBL, M.; HILGER, A.; SEIFERT, C.; FEYE-TREIMER, U. Refraction as imaging signal for computerized (neutron) tomography. *Applied Physics Letters*, Argonne, v.83, p.398-400, 2003.

VAN BAVEL, C.H.M. Soil densitometry by gamma transmission. *Soil Science*, Baltimore, v.87, p.50-58, 1959.

VAN BAVEL, C.H.M.; UNDERWOOD, N.; RAGAR, S.R. Transmission of gamma radiation by soils and soil densitometry. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.21, p.588-591, 1957.

VAN GENUCHTEN, M.Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.44, p.892-898, 1980.

VANDENBYGAART, A.J.; PROTZ, R. The representative elementary area (REA) in studies of quantitative soil micromorphology. *Geoderma*, Amsterdam, v.89, p.333-346, 1999.

VANDENBYGAART, A.J.; PROTZ, R.; TOMLIN, A.D.; MILLER, J.J. Tillage system effects on near-surface soil morphology: observations from the landscape to micro-scale in silt loam soils of southwestern Ontario. *Soil and Tillage Research*, Amsterdam, v.51, p.139-149, 1999.

VAZ, C.M.P.; CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S.; CRUVINEL, P.E.; REICHARDT, K.; STOLF, R. Computed tomography miniscanner for studying tillage induced soil compaction. *Soil Technology*, Amsterdam, v.2, p.313-321, 1989.

VAZ, C.M.P.; NAIME, J.M.; MACEDO, A. Soil particle size fractions determined by gamma-ray attenuation. *Soil Science*, Baltimore, v.164, p.403-410, 1999.

VOGEL, H.-J.; ROTH, K. Moving through scales of flow and transport in soil. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v.272, p.95-106, 2003.

VOMOCIL, J.A. In situ measurement of bulk density of soil by gamma absorption technique. *Soil Science*, Baltimore, v.77, p.341-342, 1954.

WANG, C.H.; WILLIS, D.L.; LOVELAND, W.D. Characteristics of ionizing radiation. In: WANG, C.H.; WILLIS, D.L.; LOVELAND, W.D. (Ed.) *Radiotracer methodology in the biological environmental and physics science*. New Jersey: Prentice-Hall, 1975. p.39-74.

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.

WILDENSCHILD, D.; HOPMANS, J.W.; VAZ, C.M.P.; RIVERS, M.L.; RIKARD, D.; CHRISTENSEN, B.S.B. Using X-ray computed tomography in hydrology: systems, resolutions, and limitations. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v.267, p.285-297, 2002.

WILLIAMS, R.D.; AHUJA, L.R.; NANEY, J.W. Comparison of methods to estimate soil water characteristics from soil texture, bulk density, and limited data. *Soil Science*, Baltimore, v.153, p.172-184, 1992.

ANEXO

CONCEITOS BÁSICOS USADOS NA ANÁLISE MICROMORFOLÓGICA

Termos básicos

A seguir são apresentados alguns termos básicos usados na descrição de amostras de solo impregnadas usando como base o trabalho de Castro (1988).

- *Fábrica*

Existem diferentes classificações para o termo fábrica na análise micromorfológica. Kubiena (1938) conceituou o termo fábrica como sendo o arranjo dos constituintes do solo e a relação existente entre cada um deles. Brewer e Sleeman (1960) e Brewer (1964) restringiram o conceito ao arranjo dos constituintes, incluindo orientação e padrão de distribuição, e definiram fábrica como sendo a constituição física do material expressa pelo seu arranjo de partículas e sistema poroso. Bullock et al. (1985) definiram fábrica de uma forma mais geral e a relacionaram a organização total do solo expressa pelo arranjo espacial dos seus constituintes, sua forma, dimensão e frequência.

- *Estrutura*

O termo estrutura também apresenta muitas definições sendo que algumas delas consideram os poros do solo e outras não. O conceito mais recente foi formulado por Bullock et al. (1985) e diz que a constituição física de um material pedológico é expressa pela forma e arranjo das partículas sólidas e pelos poros formando agregados ou não. Portanto, quando um material pedológico é examinado com um aumento superior a cinco vezes os aspectos da estrutura visíveis são chamados de microestrutura. Quando o material sofre agregação ocorre à formação de volumes, chamados de pedos ou agregados, possuindo estruturas com diferentes formas geométricas e com diferentes graus de desenvolvimento (pedalidade). Em

uma análise micromorfológica é sempre importante descrever os agregados quanto à forma que possuem.

- *Textura*

Muitos trabalhos até meados da década de oitenta do século passado utilizavam limites granulométricos na caracterização da textura do solo e se baseavam para análise na separação entre plasma e esqueleto – esses dois conceitos serão definidos a frente – no limite de dois micrometros, considerando o primeiro como material fino e o segundo como grosseiro. Bullock et al. (1985) seguem o critério C/F (“coarser/fine material”) seguido da dimensão e da proporção destes materiais na amostra de solo.

- *Pedalidade*

Representa a constituição física de um material pedológico, expressa pelo tamanho, forma e arranjo dos agregados (também chamados pedes). Bullock et al. (1985) propõem avaliar os graus de pedalidade, ou seja, os graus de desenvolvimento da estrutura (microestrutura) da seguinte maneira: i) fortemente desenvolvida (unidades subarredondadas separadas inteiramente por poros (pédica)); ii) moderadamente desenvolvida (unidades ainda não inteiramente separadas, mas já possuindo aproximadamente 2/3 de sua área limitados por poros planares e/ou cerca de 1/3 dessa área ligada por pontes que os ligam aos pedes vizinhos (pédica incompleta)); e iii) fracamente desenvolvida (unidades que se apresentam ainda incipientes em que os poros planares, ao contrário da anterior, ocupam 1/3 da área ou os pedes estão ligados por pontes que ocupam 2/3 do pede (pédica incompleta)). A figura 1 traz uma representação esquemática dos graus de desenvolvimento da estrutura do solo.

Figura 1. Graus de desenvolvimento da estrutura do solo. (A) Fortemente desenvolvida, (B) moderadamente desenvolvida e (C) fracamente desenvolvida.

- Componentes do material pedológico

Os componentes do material pedológico são o plasma, o esqueleto e os poros. O *plasma* é caracterizado por partículas com diâmetro menor que 2 μm classificadas como fração argila. Não é possível identificá-las unitariamente através de microscópio óptico, sendo que para sua identificação usam-se colorantes ou microscopia eletrônica de varredura, transmissão ou difração de raios X. O plasma pode conter matéria orgânica, minerais de argila, sais, óxidos, hidróxidos, etc. Muitas vezes o forte grau de cristalização do plasma faz com que este atinja dimensões superiores a 2 μm como ocorre para a gibbsita. Neste caso, o termo usado é cristaliplasma ou plasma crístico. O *esqueleto* caracteriza-se por partículas com diâmetros maiores que 2 μm . Estas partículas são classificadas, a partir da realização da análise granulométrica, como silte e areia. O esqueleto é constituído de minerais primários, tais como: quartzo, feldspatos, micas, etc.; e, às vezes, as feições pedológicas, por exemplo, nódulos, podem ser abundantes se comportando como esqueleto (pseudo-silte, pseudo-areia), sendo que neste caso as feições passam a desempenhar o papel de esqueleto. Os *poros* são representados pelos volumes vazios ou orifícios possuindo diferentes funções, tais como: transporte e retenção de água pelo solo, aeração, percolação de soluções, etc. Os poros podem apresentar diferentes origens, formatos e tamanhos. Os poros intragregados constituem a porosidade do fundo matricial, porém é válido ressaltar que também há a porosidade

interagregados e transagregados. Durante a observação de uma lâmina convém sempre discriminar o tipo de porosidade observada quando possível.

- *Unidades de organização*

As unidades de organização são caracterizadas por conjuntos unitários e, portanto, finitos, contendo arranjo próprio, sendo os: agregados, feição pedológica e fundo matricial. Os *agregados* representam uma unidade reconhecível no solo, consistindo de um aglomerado de partículas, separando-se das unidades vizinhas através de superfícies possuindo menor resistência, por exemplo, poros, revestimentos, etc. Um solo pode ser classificado como pédico ou apédico, no primeiro caso possui agregados e no segundo não. A *feição pedológica* representa uma unidade reconhecível no solo se distinguindo do material vizinho através de diferenças na concentração de uma fração do plasma ou na pedofábrica (assembléia ou arranjo) dos constituintes, ou ainda por corpos estranhos incluídos (de origem sedimentar ou biológica). O *fundo matricial* diz respeito ao material ou matéria prima que se encontra dentro dos agregados elementares ou compondo solos que não apresentam agregados (apédicos). O fundo matricial é constituído geralmente do plasma+esqueleto+poros intragregados.

Critérios gerais para análise da assembléia (pedofábrica)

Existem alguns critérios descritivos gerais que serão tratados a seguir que podem ser muito úteis na caracterização dos componentes de um determinado material que esteja sendo observado, dependendo dos objetivos do trabalho. São eles:

- *Dimensão*: diz respeito ao tamanho das partículas que constituem o solo. Podem ser classificadas como: argilas (<2 µm), silte (2-50 µm), areia muito fina (100-200 µm), areia média (200-500 µm), areia grossa (500-1000 µm) e areia muito grossa (1000-

2000 μm). Outras modalidades que poderão ser usados são cripto, micro e macrocristalino.

- *Frequência*: Diz respeito à área total ocupada pelas partículas em uma determinada amostra. As frequências podem ser classificadas como: muito dominante ($>70\%$), dominante ($50-70\%$), comum ($30-50\%$), frequente ($15-30\%$), pouco ($5-15\%$) e muito pouco ($<5\%$). A figura 2 ilustra o modelo de frequências para objetos com diferentes distribuições granulométricas.

Figura 2. Modelo de frequência (%) para objetos (em preto) contendo diferentes distribuições granulométricas (Castro, 1988).

- *Grau de seleção*: com relação a este critério descritivo tem-se: perfeitamente selecionado (só uma fração presente), bem selecionado (5 a 10 % de contribuição de outras frações), moderadamente selecionado (10 a 30 % de contribuição de outras frações), pobremente selecionado (não há fração dominante) e mal selecionado (há grande variedade de frações). As frações dizem a respeito à quantidade de silte, argila ou areia que compõe a amostra de solo.
- *Cor*: a descrição de uma lâmina pode ser feita usando-se luz normal, com nicóis cruzados e, às vezes, sob luz refletida (alguns nódulos, por exemplo). A cor pode apresentar variação dependendo da espessura da lâmina, da intensidade da luz, do tipo de luz, com o aumento usado e com a posição da platina.
- *Forma*: com relação a este critério é sempre bom “pensar tridimensionalmente” diante da visão em duas dimensões. Um dos critérios que pode ser usado é o sedimentológico (Figura 3).

Figura 3. Modelo combinado entre esfericidade/arredondamento e rugosidade/alisamento para a descrição da forma das partículas.

- *Textura superficial (rugosidade/alisamento)*: quanto a este critério pode-se ter a seguinte classificação: geral (rugoso, ondulado, alisado) ou detalhado (serrilhado,

mamelar, palmado, digitado, etc.). Alguns critérios clássicos de sedimentologia e mineralogia podem ser usados. A figura 3 também traz algumas imagens relacionadas com a classificação geral para a textura superficial.

- *Limites (contraste/nitidez) de um indivíduo em relação a outro(s):* A caracterização que será realizada dos limites irá depender do aumento empregado, e deverá ser feita tanto sob nicóis cruzados como sob luz normal. Quanto ao *contraste* é possível ter: i) proeminente (forte): neste caso o indivíduo diferencia-se claramente do entorno em termos de cor, arranjo, birrefringência e ou outras características morfológicas; ii) distinto (moderado): onde o indivíduo pode apresentar claramente uma diferenciação em relação ao entorno, porém apresentando algumas características morfológicas em comum com o entorno; fraco: neste caso o indivíduo irá se diferenciar muito pouco do entorno, como por exemplo, na cor, no arranjo, etc. Quanto à *nitidez* tem-se: i) nítido: apresenta separação evidente entre cor e/ou distribuição (tamanho das partículas $<60\mu\text{m}$); ii) claro: possui transmissão entre cor e/ou distribuição das partículas $<60\mu\text{m}$; iii) difuso: transmissão entre cor e/ou distribuição (tamanho das partículas $>6\mu\text{m}$). Os termos contraste e nitidez podem apresentar ainda termos intermediários como “muito”, “pouco”, etc, acrescidos a eles.
- *Variabilidade numa classe de constituintes:* a seguinte classificação pode ser encontrada: baixa (apresenta diferenças fracas entre indivíduos de uma mesma classe), média (apresenta diferenças moderadas quanto a uma dada característica ou fracas entre muitas características entre os indivíduos de uma mesma classe) e alta (possui fortes diferenças para uma dada característica, moderadas em várias ou fracas para muitas características entre indivíduos de uma mesma classe).