

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
SETOR DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS/ FÍSICA

JAQUELINE APARECIDA RIBASKI BORGES

**TAMANHOS ELEMENTARES REPRESENTATIVOS DE ATRIBUTOS DO SOLO
VIA ATENUAÇÃO DE RAIOS GAMA E TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA**

PONTA GROSSA

2015

JAQUELINE APARECIDA RIBASKI BORGES

**TAMANHOS ELEMENTARES REPRESENTATIVOS DE ATRIBUTOS DO SOLO
VIA ATENUAÇÃO DE RAIOS GAMA E TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências, área de concentração Física, da Universidade Estadual de Ponta Grossa, como requisito para obtenção do título de doutora em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Pires
Co-orientador: Prof. Dr. Fábio Augusto Meira Cássaro

PONTA GROSSA

2015

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Setor de Tratamento da Informação BICEN/UEPG

B732 Borges, Jaqueline Aparecida Ribaski
Tamanhos elementares representativos de
atributos do solo via atenuação de raios
gama e tomografia computadorizada/
Jaqueline Aparecida Ribaski Borges. Ponta
Grossa, 2015.
119f.

Tese (Doutorado em Ciências - Área de
Concentração: Física), Universidade
Estadual de Ponta Grossa.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando
Pires.

Coorientador: Prof. Dr. Fábio Augusto
Meira Cássaro.

1.Medidas representativas.
2.Coefficiente de atenuação de massa do
solo. 3.Macroporosidade. 4.Tortuosidade.
5.Conectividade. I.Pires, Luiz Fernando.
II. Cássaro, Fábio Augusto Meira. III.
Universidade Estadual de Ponta Grossa.
Doutorado em Ciências. IV. T.

CDD: 539

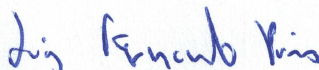
TERMO DE APROVAÇÃO

JAQUELINE APARECIDA RIBASKI BORGES

"Tamanhos Elementares Representativos de Atributos do Solo via Atenuação de Raios Gama e Tomografia computadorizada"

Tese aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor no Programa de Pós-Graduação em Ciências - Física da Universidade Estadual de Ponta Grossa, pela seguinte banca examinadora.

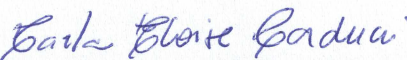
Orientador:



Dr. Luiz Fernando Pires
Departamento de Física - UEPG/PR



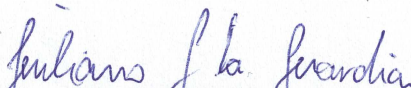
Prof. Dr. Fabiano Gilberto Wolf
Departamento de Engenharia Mecânica – UFSC/SC



Profª. Dra. Carla Eloize Carducci
Departamento de Agronomia – UFSC/SC



Prof. Dr. Gelson Biscaia de Souza
Departamento de Física – UEPG/PR



Prof. Dr. Giuliano Gadioli La Guardia
Departamento de Matemática e Estatística - UEPG/PR

Ponta Grossa, 11 de setembro de 2015

Dedico esta conquista

*à alguns dos meus anjos da
guarda: Jane, Durvalina,
Júlia, José e Rafael. Vocês me
protegeram e me guiaram nos
momentos em que mais precisei.
Serei sempre grata!*

AGRADECIMENTOS

À Deus, fonte das minhas forças, por me abençoar com tantas pessoas maravilhosas em meu caminho.

À minha família, por todo o amor, apoio e compreensão.

Ao Rafael R. Borges, pelo apoio e auxílio incondicional. Seu amor e carinho sempre me deram forças para seguir em frente!

Aos Profs. Dr. Luiz F. Pires e Dr. Fábio A. M. Cássaro, pela oportunidade, orientação e dedicação na realização deste trabalho. Agradeço pela imensurável contribuição que vocês tiveram para a minha formação científica.

Ao Prof. Dr. Richard J. Heck, pela colaboração, permissão de uso dos laboratórios da Universidade de Guelph e pela orientação no trabalho com as imagens de microtomografia.

Ao Prof. Dr. Waldir Leite Roque, pela colaboração, permissão de uso do programa OsteoImage e pela orientação no trabalho com as análises de tortuosidade e conectividade dos poros.

Ao Dr. Jadir A. Rosa por permitir o uso de amostras de solo do IAPAR - Ponta Grossa.

Ao amigo Jonathan C. Costa, por todo o apoio e por disponibilizar o seu banco de dados do mestrado para as análises de comprimento representativo.

Ao Layon S. Onofre, por todo o empenho e dedicação para o desenvolvimento de softwares para agilizar o processo de recorte dos subvolumes nas imagens e agrupamento dos dados a partir de um grande número de planilhas. Sua contribuição foi essencial para a execução do presente trabalho, e certamente também o será para os próximos que irão trabalhar com a técnica de microtomografia. Outrossim, agradeço ao Prof. Jonathan de Matos pelo auxílio na área de programação.

À Talita R. Ferreira, agradeço por seu apoio incondicional para a realização deste trabalho de tese. Você se tornou uma grande amiga e colega de pesquisa. Obrigada pelas longas horas de discussão sobre tamanhos representativos, tomografia computadorizada etc.

Ao André C. Auler, por todo o auxílio com as análises estatísticas e pelas discussões agronômicas.

À Sabrina Passoni, pela colaboração nos meus dois primeiros anos de doutorado, e por ter compartilhado o período de aprendizado sobre a técnica de microtomografia de raios X, pré-processamento, processamento e análise de imagens.

À todos que fazem parte da família FASCA, pelo apoio, conhecimento compartilhado e por todos os bons momentos que passamos juntos.

Ao Rômulo Vinícius C. C. de Souza e à Carla E. Carducci, que não mediram esforços para me auxiliar no processo de doutorado sanduíche. Obrigada pelo apoio e por compartilharem sua experiência e seus conhecimentos. Também agradeço ao Adriano R. Guerra, pelo auxílio durante a minha estadia em Guelph, principalmente para a operação do equipamento tomográfico e tratamento das imagens.

À todos os professores que contribuíram para a minha formação, em especial ao Prof. Dr. André Vitor C. de Andrade, por ter possibilitado o meu início na pesquisa científica.

À Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de doutorado e de doutorado sanduíche (Bolsista da CAPES – Proc. nº BEX 1771/ 14-0).

À todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

No presente estudo, as técnicas de tomografia computadorizada (TC) e atenuação de raios gama (AGR) foram utilizadas na investigação do tamanho representativo de amostras para atributos referentes à estrutura do solo. Primeiramente, foi analisado o comprimento elementar representativo (*CER*) de amostras de um solo de textura arenosa e outro de textura argilosa para medidas experimentais do coeficiente de atenuação de massa do solo (μ_{es}). O estudo foi realizado com duas fontes radioativas de raios gama (^{241}Am e ^{137}Cs), três aberturas de colimadores circulares (2-4 mm) e 14 espessuras (x) distintas de amostras deformadas de solo (2-15 cm). A partir destas análises foi possível identificar um intervalo de espessura ideal para cada uma das fontes estudadas (2-4 cm e 12-15 cm para as fontes de ^{241}Am e ^{137}Cs , respectivamente). A aplicação dos resultados obtidos para a fonte de ^{241}Am , e solo argiloso, em avaliações de área elementar representativa (*AER*) para medidas de densidade do solo (ρ_s) via TC, indicaram que os valores médios de μ_{es} para $x > 4$ cm podem induzir ao uso de amostras com tamanho não representativo. Na sequência, imagens de microtomografia de raios X (μTC), com volume total de $39 \times 39 \times 33 \text{ mm}^3$ e resolução espacial de $60 \text{ }\mu\text{m}$, foram utilizadas para a caracterização micromorfológica do sistema macroporoso de um Latossolo vermelho de textura argilosa, submetido aos sistemas de manejo de plantio direto (PD) e plantio convencional (PC). Foram analisados atributos físicos como macroporosidade (*MAP*), número de macroporos (*NMAP*), tortuosidade (τ) e conectividade (*C*) dos poros. O grau de *C* dos poros foi estimado a partir da característica de Euler-Poincaré (*CEP*). Uma vez que imagens 3D possibilitam o estudo destes atributos em diferentes volumes de amostra, o estudo proposto é ideal para a análise de volumes elementares representativos (*VERs*). Geralmente, a seleção dos subvolumes para análises de *VER* se dá concentricamente a um volume de origem ou em posições adjacentes a este. Neste trabalho foi introduzida uma nova forma de seleção da posição dos subvolumes, os quais são selecionados randomicamente dentro do volume total da imagem (seleção aleatória). Observou-se que as maiores amplitudes de flutuações nos valores de cada atributo analisado ocorreram para os subvolumes menores quando selecionados de forma aleatória, em comparação à seleção centralizada. Quando estas posições são selecionadas aleatoriamente, todas as regiões da amostra têm a mesma probabilidade de ocorrência. Com isso, os subvolumes podem ser selecionados em regiões que apresentem características similares, ou então, que sejam muito diferentes umas das outras. Os resultados permitiram o estudo de cada um destes atributos em função do volume

de amostra analisado. Tais análises possibilitaram a identificação de um *VER* para medidas de *MAP* e τ para os dois solos estudados. No entanto, a *NMAP* e a *CEP* não apresentaram indícios de estabilização até o volume total de amostra analisado ($39 \times 39 \times 33 \text{ mm}^3$). Quanto aos dois sistemas de manejo avaliados (PD e PC), foi possível detectar a influência de cada um deles na estrutura macroporosa do solo. De uma forma geral, o solo sob PC apresentou maior regularidade nos resultados obtidos, o que se deve à homogeneização do mesmo induzida pelo revolvimento do solo realizado duas vezes ao ano.

Palavras-chave: Medidas representativas. Coeficiente de atenuação de massa do solo. Macroporosidade. Tortuosidade. Conectividade.

ABSTRACT

In this study, the Computed Tomography (CT) and gamma-ray attenuation (GRA) techniques were used in the investigation of representative sample sizes for attributes related to soil structure. First of all, the representative elementary length (REL) for experimental measurements of soil mass attenuation coefficient (μ_{es}), of samples from a sandy and a clayey soil, was analyzed. The study was conducted with two radioactive sources (^{241}Am and ^{137}Cs), three collimators (2–4 mm diameters), and 14 thickness (x) samples (2–15 cm). From these analyzes, it was possible to identify an ideal thickness range for each of the studied sources (2-4 cm and 12-15 cm for the sources of ^{241}Am and ^{137}Cs , respectively). The application of such results in representative elementary area evaluations, in clayey soil clods via CT, indicated that experimental soil mass attenuation coefficient average values obtained for $x > 4$ cm and source ^{241}Am might induce the use of samples which are not large enough for soil bulk density evaluations. Subsequently, μCT images with a total volume of $39 \times 39 \times 33 \text{ mm}^3$ and spatial resolution of $60 \text{ }\mu\text{m}$ were used for macroporous system morphological characterization of a Rhodic Ferralsol with clayey texture, under no-till (NT) and conventional till (CT) systems. Attributes as macroporosity (MAP), number of macropores ($NMAP$), tortuosity (τ) and connectivity (C) of the pores were assessed. The C degree was estimated based on the Euler-Poincaré characteristic (EPC). Once 3D images enable the study of these attributes in different sample volumes, the proposed study is ideal for the analysis of representative elementary volume (REV). Usually, the selection of subvolumes for REV analysis occurs concentrically to a small volume or in adjacent positions. Here, we introduced a new method for selecting the positions of subvolumes, which are randomly chosen within the total image volume (random selection). It was observed that higher fluctuations in amplitude of each analyzed property values occurred for smaller subvolumes and random selection. When these positions are randomly selected, all regions of the sample have the same probability of occurrence. Thus, the subvolumes can be selected from regions that exhibit similar characteristics, or which are quite different from each other. The results allowed the study of each of these attributes in function of the analyzed sample volume. Such analysis enabled the identification of a REV for MAP and τ measurements for both soils. However, $NMAP$ and CEP showed no indication of stabilization within the total sample volume analyzed ($39 \times 39 \times 33 \text{ mm}^3$). From this study, it was possible to detect the influence of each management systems (NT and CT) on the macroporous system. In general, results

obtained for soil under PC showed higher regularity, which is probably due to its homogenization induced by the plowing, conducted twice a year.

Keywords: Representative measurements. Soil mass attenuation coefficient. Macroporosity. Tortuosity. Connectivity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Equipamento de atenuação de raios gama localizado no Laboratório de Física do Solo (Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Piracicaba). No lado esquerdo encontra-se o castelo de chumbo com as fontes de raios gama de ^{241}Am e ^{137}Cs (1), no centro a amostra de solo contida na caixa de acrílico (2) e à direita o detector sob proteção de chumbo (3).....	29
Figura 2.2: Ilustração esquemática do tomógrafo de raios gama de primeira geração.	31
Figura 2.3. Coeficiente de atenuação de massa experimental do solo (μ_{es}) e comprimento elementar representativo (CER). Os resultados foram obtidos para diferentes espessuras de amostra (x), tipos de solo (a, b) e colimadores para a fonte de ^{137}Cs . A linha tracejada corresponde à média dos valores de μ_{es} para espessura de amostra $x \geq 10$ cm. O símbolo preenchido corresponde ao valor teórico obtido via XCOM.....	35
Figura 2.4. Coeficiente de atenuação de massa experimental do solo (μ_{es}) e comprimento elementar representativo (CER). Os resultados foram obtidos para diferentes espessuras de amostra (x), tipos de solo (a, b) e colimadores para a fonte de ^{241}Am . A linha tracejada corresponde à média dos valores de μ_{es} para espessura de amostra $x < 10$ cm. O símbolo preenchido corresponde ao valor teórico obtido via XCOM.....	36
Figura 2.5. Frequência (F) e frequência acumulada (FA) do número de amostras que atingiu a área elementar representativa (AER) para medidas da densidade do solo (ρ_s) em cada uma das áreas (A) selecionadas. Os resultados foram obtidos utilizando os valores médios de coeficiente de atenuação de massa experimental (μ_{es}) ($x \leq 4$ e $x > 4$ cm) para a fonte de ^{241}Am e colimadores circulares com diâmetros de 3 (a,b) e 4 mm (c,d).....	38
Figura 2.6. Imagens tomográficas (2D) de um torrão de solo argiloso geradas com o valor teórico (XCOM) e com os valores médios de μ_{es} ($x \leq 4$ e $x > 4$ cm) para a fonte de ^{241}Am e diferentes colimadores. A barra em escala de cinza apresenta os valores de densidade do solo (ρ_s).	40
Figura 3.1: Imagens ilustrativas das etapas de aquisição (a), reconstrução (b,c) e tratamento (d,e) das imagens.	48
Figura 3.2: Principais procedimentos realizados na etapa de segmentação dos conjuntos de imagens 3D.....	50
Figura 3.3: Exemplo de configuração de três macroporos detectados a partir de imagens de μTC . Cada aglomerado de <i>voxels</i> consecutivos, referentes ao espaço poroso do solo, é identificado como um macroporo independente.	51
Figura 3.4: Formato de um objeto a partir de seus eixos principais: maior (mai.), menor (men.) e intermediário (int.) (BULLOCK et al., 1985).	52
Figura 3.5: Imagens de μTC renderizadas mostrando o emaranhado de todos os macroporos (a,c) e apenas do macroporo predominante (b,d) da fatia central até o topo de uma amostra (275 fatias) sob sistema de manejo de Plantio Direto (PD) e Plantio Convencional (PC), na resolução espacial de 60 μm . Os tons de cinza representam os macroporos em diferentes profundidades dentro do volume de imagem. Os valores em vermelho indicam a escala das imagens em termos do número de <i>voxels</i>	54
Figura 3.6: Macroporosidade (MAP) e número total de macroporos ($NMAP$) para as amostras sob os sistemas de manejo de Plantio Direto (PD) e Plantio Convencional (PC).	55

Figura 3.7: (a) Macroporosidade média (MAP) e (b) número de macroporos médio (NMAP) para os sistemas de manejo de Plantio Direto (PD) e Plantio Convencional (PC). A MAP para o raio de poro equivalente de 30 μm foi determinada via μTC e mesa de tensão, enquanto o NMAP foi determinado apenas via μTC	56
Figura 3.8: Distribuição normalizada da macroporosidade (MAP) e do número de macroporos (NMAP) por intervalo de volume de macroporos para as amostras sob o sistema de manejo de plantio direto (PD).	59
Figura 3.9: Distribuição normalizada da macroporosidade (MAP) e do número de macroporos (NMAP) por intervalo de volume de macroporos para as amostras sob o sistema de manejo de plantio convencional (PC).	60
Figura 3.10: Distribuição normalizada da macroporosidade média (MAP) e número de macroporos médio (NMAP) por intervalo de volume de macroporos para os sistemas de manejo de Plantio Direto (PD) e Plantio Convencional (PC), obtidos a partir de imagens de μTC com volume total de $39 \times 39 \times 33 \text{ mm}^3$ e resolução espacial de 60 μm	61
Figura 3.11: Distribuição normalizada da macroporosidade (MAP) e do número de macroporos (NMAP) por formato de macroporo para as amostras sob o sistema de manejo de plantio direto (PD).	62
Figura 3.12: Distribuição normalizada da macroporosidade (MAP) e do número de macroporos (NMAP) por formato de macroporo para as amostras sob o sistema de manejo de plantio convencional (PC).	63
Figura 3.13: Distribuição normalizada da macroporosidade média (MAP) e do número de macroporos médio (NMAP) por formato de macroporo para os sistemas de manejo de Plantio Direto (PD) e Plantio Convencional (PC), obtidos a partir de imagens de tomografia com volume de $39 \times 39 \times 33 \text{ mm}^3$ e resolução espacial de 60 μm	64
Figura 4.1: Representação esquemática da definição do volume elementar representativo (VER) em medidas de porosidade (P). $V_{\text{mín.}}$ e $V_{\text{máx.}}$ correspondem, respectivamente, aos volumes mínimo e máximo que podem fornecer resultados representativos de P para meios porosos não homogêneos.	73
Figura 4.2: Esquema de seleção dos subvolumes em posições (a) centralizadas e (b) aleatórias. Na forma de seleção aleatória, cada tamanho de subvolume foi selecionado em três posições independentes.	75
Figura 4.3: Gráficos de macroporosidade (MAP) por volume (V) de amostras sob plantio direto (PD). O marcador preenchido indica o VER para cada amostra (Am 01, Am 02, ..., Am 06) e forma de seleção dos subvolumes (aleatória ou centralizada). Os gráficos em escala reduzida representam uma ampliação da região correspondente aos menores subvolumes analisados.	79
Figura 4.4: Gráficos de macroporosidade (MAP) por volume (V) de amostras sob plantio convencional (PC). O marcador preenchido indica o VER para cada amostra (Am 01, Am 02, ..., Am 06) e forma de seleção dos subvolumes (aleatória ou centralizada). Os gráficos em escala reduzida representam uma ampliação da região correspondente aos menores subvolumes analisados.	80
Figura 4.5: Gráficos de frequência (F) e frequência acumulada (FA) por volume representando o número de amostras que atingiram o volume elementar representativo (VER)	

nas formas de seleção de subvolumes centralizada e aleatória. PD e PC representam os plantios direto e convencional, respectivamente.	81
Figura 4.6: Gráficos do número de macroporos ($NMAP$) por volume (V) das amostras (Am 01, Am 02, ..., Am 06) sob plantio direto (PD). Os subvolumes foram selecionados de forma aleatória e centralizada. Os gráficos em escala reduzida representam uma ampliação da região correspondente aos menores subvolumes analisados.	84
Figura 4.7: Gráficos do número de macroporos ($NMAP$) por volume (V) das amostras (Am 01, Am 02, ..., Am 06) sob plantio convencional (PC). Os subvolumes foram selecionados de forma aleatória e centralizada. Os gráficos em escala reduzida representam uma ampliação da região correspondente aos menores subvolumes analisados.	85
Figura 4.8: Gráficos do número de macroporos médio ($NMAP$) por volume (V) das amostras (Am 01, Am 02, ..., Am 06) sob plantio direto (PD) e plantio convencional (PC) e respectivos ajustes lineares. O $NMAP$ corresponde à média dos resultados obtidos para as duas formas de seleção de subvolumes (aleatória e centralizada).	88
Figura 4.9: Gráficos do número de macroporos específico ($NMAP_e$) por volume (V) das amostras sob plantio direto (PD). O marcador preenchido indica o VER para cada amostra (Am 01, Am 02, ..., Am 06) e forma de seleção dos subvolumes (aleatória ou centralizada). Os gráficos em escala reduzida representam uma ampliação da região correspondente aos menores subvolumes analisados.	90
Figura 4.10: Gráficos do número de macroporos específico ($NMAP_e$) por volume (V) das amostras sob plantio convencional (PC). O marcador preenchido indica o VER para cada amostra (Am 01, Am 02, ..., Am 06) e forma de seleção dos subvolumes (aleatória ou centralizada). Os gráficos em escala reduzida representam uma ampliação da região correspondente aos menores subvolumes analisados.	91
Figura 5.1: Distância geodésica (LG) e distância Euclidiana (LE), tomada entre planos ou entre pontos.	98
Figura 5.2: Algoritmo de reconstrução geodésica (RG) para uma imagem bidimensional de 4×4 pixels e utilizando um elemento estruturante de 4 vizinhos (EE_4). O número da RG está indicado no interior de cada pixel.	99
Figura 5.3: Volume de uma estrutura amostrado pelo disector. h corresponde ao espaçamento entre as seções planas; I , aos eventos de ilha; B , às ramificações e H , às cavidades fechadas.	100
Figura 5.4: Gráficos de tortuosidade (τ) em função do volume (V) da Am 01 sob plantio direto (PD). O marcador preenchido indica o volume elementar representativo (VER) para cada direção e sentido de análise (x^+ , x^- , y^+ , y^- , z^+ , z^-), bem como para cada forma de seleção dos subvolumes (aleatória ou centralizada). Os gráficos em escala reduzida representam uma ampliação da região correspondente aos menores subvolumes analisados.	105
Figura 5.5: Gráficos de tortuosidade (τ) em função do volume (V) da Am 03 sob plantio convencional (PC). O marcador preenchido indica o volume elementar representativo (VER) para cada direção e sentido de análise (x^+ , x^- , y^+ , y^- , z^+ , z^-), bem como para cada forma de seleção dos subvolumes (aleatória ou centralizada). Os gráficos em escala reduzida representam uma ampliação da região correspondente aos menores subvolumes analisados.	106

Figura 5.6: Gráficos de frequência (F) e frequência acumulada (FA) em função do volume representando o número de amostras que atingiram o volume elementar representativo (VER) para a tortuosidade (τ) em cada direção e sentido de análise (x^+ , x^- , y^+ , y^- , z^+ , z^-). Os resultados são apresentados para as formas de seleção de subvolumes centralizada e aleatória, para o sistema de manejo de plantio direto (PD).....	108
Figura 5.7: Gráficos de frequência (F) e frequência acumulada (FA) em função do volume representando o número de amostras que atingiram o volume elementar representativo (VER) para a tortuosidade (τ) em cada direção e sentido de análise (x^+ , x^- , y^+ , y^- , z^+ , z^-). Os resultados são apresentados para as formas de seleção de subvolumes centralizada e aleatória, para o sistema de manejo de plantio convencional (PC).	109
Figura 5.8: Gráficos da característica de Euler-Poincaré média (CEP) em função do volume (V) das amostras (Am 01, Am 02, ..., Am 06) sob plantio direto (PD). Os subvolumes foram selecionados de forma aleatória e centralizada. Os gráficos em escala reduzida representam uma ampliação da região correspondente aos menores subvolumes analisados.	111
Figura 5.9: Gráficos da característica de Euler-Poincaré média (CEP) em função do volume (V) das amostras (Am 01, Am 02, ..., Am 06) sob plantio convencional (PC). Os subvolumes foram selecionados de forma aleatória e centralizada. Os gráficos em escala reduzida representam uma ampliação da região correspondente aos menores subvolumes analisados.	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Resultados obtidos para o coeficiente de atenuação de massa do solo (μ_s) a partir da análise elementar (utilizando o programa XCOM) e da técnica de atenuação de raios gama.	33
Tabela 2.2. Óxidos presentes em quantidade superior a 1% nos solos analisados.....	33
Tabela 4.1: Tamanho de cada subvolume selecionado nas imagens de μ TC para as análises de VER.....	75
Tabela 4.2: Parâmetros matemáticos do ajuste linear para os gráficos apresentados nas Figuras 4.6-4.8, para as formas de seleção aleatória e centralizada.	86
Tabela 5.1: Tortuosidade horizontal (x^+ , x^- , y^+ , y^-) e vertical dos poros (z^+ , z^-) para os sistemas de manejo de plantio direto (PD) e plantio convencional (PC). DTD indica o desvio da tortuosidade direcional entre ambos os sentidos (+ e -), para uma mesma direção.....	102

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

μ TC: Microtomografia de Raios X

AER: Área elementar representativa

AL: Área livre

ARG: Atenuação de Raios Gama

C: Conectividade

CEP: Característica de Euler-Poincaré

CER: Comprimento Elementar Representativo

CV: Coeficiente de variação

DR: Diferença relativa

FRX: fluorescência de raios X

MAP: Macroporosidade

NMAP: Número de macroporos

NMAP_e: Número de macroporos específico

PC: Plantio Convencional

PD: Plantio Direto

TC: Tomografia Computadorizada

UT: Unidade tomográfica

VER: Volume Elementar Representativo

LISTA DE SÍMBOLOS

x : Espessura da amostra

x^* : Espessura ótima

μ_a : Coeficiente de atenuação de massa da água

μ_{es} : Coeficiente de atenuação de massa experimental do solo

μ_s : Coeficiente de atenuação de massa do solo

τ : Tortuosidade

σ : Desvio padrão

σ^2 : Variância

SUMÁRIO

1. Introdução.....	20
Objetivos Gerais	21
Referências.....	22
2. Comprimento elementar representativo para medidas do coeficiente de atenuação de massa do solo.....	24
Resumo	24
Abstract.....	24
2.1. Introdução	25
2.2. Material e métodos.....	26
2.2.1. Coleta e preparo das amostras	27
2.2.2. Análise elementar	27
2.2.3. Medidas do coeficiente de atenuação de massa do solo.....	28
2.2.4. Análise dos dados	29
2.2.5. Comprimento elementar representativo e medidas de densidade do solo	30
2.2.5.1. Tomógrafo de raios gama.....	30
2.2.5.2. Obtenção da matriz densidade do solo.....	31
2.2.5.3. Área elementar representativa.....	31
2.3. Resultados e discussão.....	32
2.3.1. Coeficiente de atenuação de massa do solo.....	32
2.3.2. Comprimento elementar representativo.....	34
2.3.3. Influência de μ_{es} em medidas da <i>AER</i> para a densidade do solo via TC	37
Conclusões	40
Referências.....	41
3. Microtomografia de raios X na caracterização micromorfológica dos macroporos de um solo submetido a diferentes sistemas de manejo	43
Resumo	43
Abstract.....	43
3.1. Introdução	44
3.2. Material e métodos.....	46
3.2.1. Localização e caracterização do local de estudo	46
3.2.2. Amostragem, preparo das amostras e análises laboratoriais	46
3.2.3. Aquisição e pré-processamento das imagens	47

3.2.4.	Processamento: classificação dos poros e análises micromorfológicas	51
3.2.5.	Análise dos dados	52
3.3.	Resultados e discussão	53
3.3.1.	Macroporosidade e número de macroporos.....	53
3.3.2.	Distribuição da <i>MAP</i> e do <i>NMAP</i> por intervalo de volume de macroporo	58
3.3.3.	Distribuição da <i>MAP</i> e <i>NMAP</i> por formato de macroporo.....	61
	Conclusões	64
	Referências.....	65
4.	Volume elementar representativo de atributos micromorfológicos do solo via microtomografia de raios X: Parte 1. Macroporosidade e número de macroporos.....	70
	Resumo	70
	Abstract.....	71
4.1.	Introdução	72
4.2.	Material e métodos.....	74
4.2.1.	Seleção dos tamanhos e processo de recorte dos subvolumes	74
4.2.2.	Análise dos dados	76
4.3.	Resultados e discussão	76
4.3.1.	Macroporosidade (<i>MAP</i>)	76
4.3.2.	Número de macroporos (<i>NMAP</i>).....	82
	Conclusões	91
	Referências.....	92
5.	Volume elementar representativo de atributos micromorfológicos do solo via microtomografia de raios X: Parte 2. Tortuosidade e conectividade	95
	Resumo	95
	Abstract.....	95
5.1.	Introdução	96
5.2.	Material e métodos.....	97
5.2.1.	Medidas de tortuosidade (τ).....	97
5.2.2.	Determinação da Característica de Euler-Poincaré (<i>CEP</i>).....	99
5.2.3.	Análise dos dados	101
5.3.	Resultados e discussão	101
5.3.1.	Tortuosidade (τ).....	101
5.3.2.	Característica de Euler-Poincaré (<i>CEP</i>) e conectividade (<i>C</i>).....	109

Conclusões	113
Referências.....	113
Considerações finais	116
Anexo	

1. Introdução

Os avanços na área de física do solo tem feito com que novos métodos de análise dos atributos desse meio poroso sejam utilizados em conjunto com os já convencionalmente estabelecidos. Isto possibilita que diferentes tipos de estudos sejam realizados de forma mais detalhada e precisa, acerca da estrutura do solo. Alguns desses métodos mais modernos apresentam custo elevado, mas possibilitam ganhos no que se refere ao tempo de análise e à possibilidade de investigação de diversos atributos em diferentes escalas e volumes. Esse é o caso das metodologias que envolvem análise de imagens da estrutura interna do solo, obtidas de forma não destrutiva.

As técnicas de tomografia computadorizada (TC) e atenuação de raios gama (ARG) se baseiam no princípio da atenuação da radiação interagindo com o interior de meios materiais homogêneos ou heterogêneos (FERRAZ; MANSELL, 1979). Os principais processos de absorção são o efeito fotoelétrico, espalhamento Compton e produção de pares. Estas interações irão depender da energia da radiação incidente e do número atômico do material absorvedor (KAPLAN, 1983; WANG; WILLIS; LOVELAND, 1975).

Tais técnicas são comumente utilizadas na caracterização de diferentes atributos físicos do solo, tais como: densidade, porosidade, umidade, condutividade hidráulica, distribuição de poros e curva de retenção (BACCHI et al., 1998; BAMBERG et al., 2009; BERALDO; SCANNAVINO JUNIOR; CRUVINEL, 2014; COSTA et al., 2014; PIRES; BACCHI; REICHARDT, 2005; PIRES et al., 2010).

Em especial, a microtomografia de raios X (μ TC) é capaz de fornecer imagens de um volume da amostra com resolução espacial da ordem de micrômetros. A partir de imagens 3D, após procedimento de segmentação, é possível, por exemplo, estudar o sistema poroso do solo. Informações sobre a porosidade, número, volume, esfericidade, formato, tortuosidade e conectividade dos poros podem ser obtidas. Também, o estudo qualitativo das imagens possibilita analisar a atividade das raízes das culturas no espaço poroso do solo (CARDUCCI et al., 2014; DAL FERRO et al., 2014; DOWUONA; TAINA; HECK, 2009; MOONEY et al., 2011).

Por se tratar de um meio poroso complexo composto de três fases (sólida, líquida e gasosa), os atributos do solo apresentam dependência em relação ao tamanho de amostra analisado (HILLEL, 1998; JURY; HORTON, 2004). Para garantir a representatividade dos resultados obtidos a partir de amostras coletadas em áreas experimentais, para o solo como um todo, estudos do tamanho elementar representativo para medidas de diferentes atributos

vem sendo realizados a partir de imagens de tomografia (BAVEYE et al., 2002; COSTANZA-ROBINSON; ESTABROOK; FOUHEY, 2011; FERREIRA; BORGES; PIRES, 2015; VANDENBYGAART; PROTZ, 1999).

No entanto, uma questão que precisa ser considerada na definição de tamanhos elementares representativos é que diferentes atributos podem apresentar diferentes padrões espaciais ou temporais, de modo que o tamanho representativo de um dado atributo pode não ser adequado para outros. Isso indica que cada atributo analisado tem a sua própria escala característica (HILLEL, 1998). Uma vez que cada meio poroso possui propriedades intrínsecas (como diferentes classes de solo ou o mesmo solo submetido a diferentes sistemas de manejo), é importante observar também que um tamanho elementar representativo de um determinado atributo de um meio, provavelmente será diferente para outro tipo de meio poroso (BAVEYE et al., 2002; BORGES, 2012).

O presente trabalho de tese está organizado em capítulos, nos quais são abordados temas correlacionados entre si no que se refere ao estudo dos tamanhos elementares representativos de amostras para diferentes atributos físicos do solo, e tem como base as seguintes hipóteses:

- O conceito de comprimento elementar representativo pode ser utilizado na definição de tamanhos ótimos de amostras para medidas de atributos físicos do solo pela técnica de atenuação de raios gama;
- Atributos micromorfológicos do solo podem ser utilizados na definição de volumes elementares representativos mesmo diante da complexidade deste meio poroso;
- Imagens de microtomografia podem ser úteis na definição de volumes representativos de amostras de solos em escala micrométrica.

Objetivos Gerais

Os objetivos gerais do presente estudo foram:

- Definir um comprimento elementar representativo (*CER*) para medidas do coeficiente de atenuação de massa experimental (μ_{es}) de dois solos com diferentes granulometrias (um arenoso e outro argiloso), utilizando fontes radioativas de ^{241}Am (ARG e TC) e ^{137}Cs (ARG);

- Utilizar imagens 3D de μ TC para a caracterização micromorfológica do sistema macroporoso de um Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto (PD) e plantio convencional (PC).
- Investigar o comportamento da macroporosidade (*MAP*), número de macroporos (*NMAP*), tortuosidade (τ) e conectividade (*C*) em função do volume da amostra;
- Verificar a possibilidade de definir um volume elementar representativo (*VER*) para medidas da *MAP*, *NMAP*, τ e *C*;
- Avaliar a influência da forma de seleção de subvolumes (em posições aleatórias ou centralizadas dentro da imagem) na definição de um *VER*;
- Analisar o efeito do sistema de manejo do solo sobre os resultados de *VER*.

Referências

BACCHI, O. O. S. et al. Gamma-ray beam attenuation as an auxiliary technique for the evaluation of the soil water retention curve. **Scientia Agricola**, v. 55, n. 3, p. 498–502, 1998.

BAMBERG, A. L. et al. Bulk density of an alfisol under cultivation systems in a long-term experiment evaluated with gamma ray computed tomography. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 5, p. 1079–1086, out. 2009.

BAVEYE, P. et al. Effect of sampling volume on the measurement of soil physical properties: simulation with x-ray tomography data. **Measurement Science and Technology**, v. 13, n. 5, p. 775 – 784, 2002.

BERALDO, J. M. G.; SCANNAVINO JUNIOR, F. DE A.; CRUVINEL, P. E. Application of x-ray computed tomography in the evaluation of soil porosity in soil management systems. **Engenharia Agrícola**, v. 34, n. 6, p. 1162–1174, dez. 2014.

BORGES, J. A. R. **Área Elementar Representativa Para Medidas Da Densidade E Porosidade Do Solo Usando Tomografia Computadorizada De Raios Gama**. Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2012.

CARDUCCI, C. E. et al. Scaling of pores in 3D images of Latosols (Oxisols) with contrasting mineralogy under a conservation management system. **Soil Research**, v. 52, n. 3, p. 231, 1 abr. 2014.

COSTA, J. C. et al. Soil mass attenuation coefficient: Analysis and evaluation. **Annals of Nuclear Energy**, v. 64, p. 206–211, fev. 2014.

COSTANZA-ROBINSON, M. S.; ESTABROOK, B. D.; FOUHEY, D. F. Representative elementary volume estimation for porosity, moisture saturation, and air-water interfacial areas in unsaturated porous media: Data quality implications. **Water Resources Research**, v. 47, n. 7, p. n/a–n/a, 8 jul. 2011.

- DAL FERRO, N. et al. Soil macro- and microstructure as affected by different tillage systems and their effects on maize root growth. **Soil and Tillage Research**, v. 140, p. 55–65, jul. 2014.
- DOWUONA, G. N. N.; TAINA, I. A.; HECK, R. J. Porosity Analysis of Two Acrisols by X-Ray Computed Microtomography. **Soil Science**, v. 174, n. 11, p. 583–593, nov. 2009.
- FERRAZ, E. S. B.; MANSELL, R. S. **Determining water content and bulk density of soil by gamma ray attenuation methods**. Florida: IFAS, 1979.
- FERREIRA, T. R.; BORGES, J. A. R.; PIRES, L. F. Representative elementary area for soil bulk density measurements of samples collected in volumetric rings by CT image analyses. **Soil and Tillage Research**, v. 152, p. 74–84, set. 2015.
- HILLEL, D. **Environmental Soil Physics: Fundamentals, Applications, and Environmental Considerations**. London: Academic Press, 1998.
- JURY, W. A.; HORTON, R. C. N. **Soil physics**. 6th. ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley, 2004.
- KAPLAN, I. **Nuclear Physics**. Massachusetts: Addison-Wesley Pub. Co., 1983.
- MOONEY, S. J. et al. Developing X-ray Computed Tomography to non-invasively image 3-D root systems architecture in soil. **Plant and Soil**, v. 352, n. 1-2, p. 1–22, 18 nov. 2011.
- PIRES, L. F. et al. Twenty-five years of computed tomography in soil physics: A literature review of the Brazilian contribution. **Soil and Tillage Research**, v. 110, n. 2, p. 197–210, 2010.
- PIRES, L. F.; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K. Soil water retention curve determined by gamma-ray beam attenuation. **Soil and Tillage Research**, v. 82, p. 89–97, 2005.
- VANDENBYGAART, A. J.; PROTZ, R. The representative elementary area (REA) in studies of quantitative soil micromorphology. **Geoderma**, v. 89, n. 3-4, p. 333–346, maio 1999.
- WANG, C. H.; WILLIS, D. L.; LOVELAND, W. D. Characteristics of ionizing radiation. In: WANG, C. H.; WILLIS, D. L.; LOVELAND, W. D. (Eds.). **Radiotracer Methodology in the Biological Environmental, and Physics Sciences**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1975. p. 39–74.

2. Comprimento elementar representativo para medidas do coeficiente de atenuação de massa do solo

Resumo

Com a crescente demanda pelo aumento da produtividade nas áreas agrícolas, o uso de medidas representativas dos atributos físicos do solo ganha cada vez mais notoriedade. As técnicas nucleares como a tomografia computadorizada (TC) e a atenuação de raios gama (ARG) tem sido aplicadas para tal finalidade. O coeficiente de atenuação de massa do solo (μ_s) é um importante parâmetro para análises via TC e ARG. Quando determinado experimentalmente (μ_{es}), o uso de amostras com tamanho adequado possibilita determiná-lo com precisão, bem como reduz o tempo de execução e os custos da análise. Neste trabalho, foi analisado o comprimento elementar representativo de amostras de um solo arenoso e outro argiloso para medidas de μ_{es} . Foram utilizadas duas fontes radioativas (^{241}Am e ^{137}Cs), três aberturas de colimadores (2-4 mm) e 14 espessuras (x) de amostras (2-15 cm). Os resultados indicaram um intervalo de espessura ideal de 2–4 cm e 12–15 cm para as fontes de ^{241}Am e ^{137}Cs , respectivamente. O uso desses resultados em avaliações da área elementar representativa, em torrões do solo argiloso via TC, indicaram que valores médios de μ_s obtidos experimentalmente para $x > 4$ cm e fonte radioativa de ^{241}Am podem induzir ao uso de amostras demasiadamente pequenas em avaliações da densidade do solo. Consequentemente, a densidade do solo pode ser sub ou superestimada, gerando conclusões imprecisas sobre a qualidade física do solo em estudo.

Representative elementary length to measure soil mass attenuation coefficient

Abstract

With increasing demand for better yield in agricultural areas, soil physical property representative measurements are more and more essential. Nuclear techniques such as computed tomography and gamma-ray attenuation have been widely employed with this purpose. The soil mass attenuation coefficient is an important parameter for computed tomography and gamma-ray attenuation analyzes. When experimentally determined, the use of suitable sized samples enable to evaluate it precisely, as well as to reduce measurement

time and costs. This study investigated the representative elementary length of sandy and clayey soils for soil mass attenuation coefficient measurements. Two radioactive sources were employed (^{241}Am and ^{137}Cs), three collimators (2–4 mm diameters), and 14 thickness (x) samples (2–15 cm). Results indicated ideal thickness intervals of 2–4 and 12–15 cm for the sources ^{241}Am and ^{137}Cs , respectively. The application of such results in representative elementary area evaluations for clayey soil clods via computed tomography indicated that experimental soil mass attenuation coefficient average values obtained for $x > 4$ cm and source ^{241}Am might induce the use of samples which are not large enough for soil bulk density evaluations. As a consequence, the soil bulk density might be under- or overestimated, generating inaccurate conclusions about the physical quality of the soil under study.

2.1. Introdução

Um tamanho elementar representativo corresponde à dimensão (volume, área ou comprimento) de uma amostra, necessária para fornecer medidas que representem o todo (BEAR, 1972). No estudo do solo, o uso de amostras com tamanho representativo é de suma importância devido à dependência que os atributos físicos deste meio poroso apresentam com o tamanho das mesmas (JURY; HORTON, 2004). Amostras que não tenham um tamanho representativo podem gerar altos valores de desvio padrão e não representar a estrutura espacial do solo, bem como dificultar as medições de seus atributos físicos (MIYAZAKI, 2005).

As técnicas de tomografia computadorizada (TC) e de atenuação de raios gama (ARG) têm sido aplicadas com sucesso para a determinação de atributos físicos do solo (COSTA; BORGES; PIRES, 2013; PIRES et al., 2010). Ambas possibilitam que medidas sejam realizadas sem comprometer a estrutura física da amostra, pois estão baseadas no princípio da interação da radiação com a matéria.

O coeficiente de atenuação de massa do solo (μ_s) representa um importante parâmetro para caracterizar a transmissão da radiação através desse meio poroso (FERRAZ; MANSELL, 1979). Valores precisos de μ_s são importantes para obter resultados representativos dos atributos físicos analisados via TC e ARG. Neste trabalho, o coeficiente de atenuação de massa do solo determinado experimentalmente foi denominado μ_{es} .

Apesar da dependência de μ_s estar relacionada apenas com a composição química do meio e a energia dos fótons do feixe incidente, quando determinado experimentalmente está sujeito a variações associadas à medida (ABDEL-RAHMAN et al., 2000; GOPAL; SANJEEVAIAH, 1973). Mesmo sistemas com boa geometria (distância ideal entre a fonte e o detector; feixe de radiação bem colimado), adequados às restrições para o emprego da Lei de Beer-Lambert, podem causar efeitos que resultem na obtenção de valores sub ou superestimados de μ_{es} (PIRES, 2002; SIDHU et al., 1999).

Pesquisas mostram a dependência de μ_{es} com fatores como a espessura da amostra (x) e tamanho do colimador utilizado. O uso de amostras com a espessura ideal pode minimizar erros associados ao espalhamento múltiplo dos fótons de raios gama (SIDHU et al., 1999; VARIER; KUNJU; MADHUSUDANAN, 1986). Por sua vez, o uso de colimadores maiores aumenta o ângulo de aceitação na face do detector que, por sua vez, resulta na detecção de um número maior de fótons espalhados (GOSWAMI; CHAUDHURI, 1973; OCHBELAGH, 2009). No entanto, poucas análises como estas, utilizando o solo como meio poroso, estão disponíveis na literatura. Devido à sua composição variada, existe maior complexidade em análises realizadas com este meio poroso, quando comparado a meios homogêneos.

O objetivo desta investigação foi definir um comprimento elementar representativo (*CER*) em medidas de μ_{es} para dois solos com diferentes texturas. A análise foi realizada usando fontes radioativas de ^{241}Am e ^{137}Cs e três colimadores com diferentes diâmetros de (2-4 mm). As duas fontes são amplamente utilizadas em pesquisas na área de física do solo. Os diferentes colimadores foram empregados para verificar o possível efeito de fótons espalhados nos resultados obtidos.

2.2. Material e métodos

As análises de *CER* foram realizadas a partir de um banco de dados gerado no trabalho de dissertação de Costa (2011). Nesta seção, o material e os métodos utilizados são apresentados de forma resumida. Informações adicionais podem ser encontradas nos trabalhos científicos de Costa; Borges e Pires (2013) e Costa et al. (2014).

2.2.1. Coleta e preparo das amostras

Duas áreas experimentais pertencentes à Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiróz (ESALQ), SP, Brasil (22°40'S, 47°34'O, 580 m de altitude), foram disponibilizadas para esta pesquisa. As amostras de solo foram coletadas na camada superficial (0-10 cm) de dois solos com diferentes classes texturais: franco-arenosa (770 g kg⁻¹ areia, 50 g kg⁻¹ silte, 180 g kg⁻¹ argila) e argilosa (240 g kg⁻¹ areia, 330 g kg⁻¹ silte, 430 g kg⁻¹ argila). De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (EMBRAPA, 2013), o solo arenoso foi classificado como um Latossolo Vermelho-Amarelo e, o argiloso, como um Nitossolo Vermelho.

No procedimento de preparo as amostras foram secadas em estufa a 105 °C por um período de 48 h e passadas em peneira com malha de 1 mm de abertura. Este procedimento foi realizado com o intuito de se obter um preenchimento mais homogêneo das amostras nos recipientes de acrílico usados nas medidas de μ_{es} .

2.2.2. Análise elementar

A análise elementar foi realizada com um espectrômetro de fluorescência de raios X (FRX) com energia dispersiva, Shimadzu, modelo EDX-720. Este equipamento possui em seu tubo o elemento Ródio como alvo; sua voltagem varia de 5 a 50 kV e o filamento opera com corrente de 1 a 1000 μ A. Um semicondutor de Si(Li) que funciona à temperatura de -196 °C, obtida com nitrogênio líquido, é utilizado como detector. Os filtros primários são de Zr, Ni, Ti e Al.

As amostras foram moídas em almofariz e então acondicionadas no porta-amostra, o qual foi vedado nas partes inferior e superior com *mylar* de 6 μ m de espessura. Foram realizadas cinco repetições para cada solo, sendo utilizado aproximadamente 2 g de solo para cada medida.

O espectro de FRX foi obtido para cada amostra em um tempo de 100 s nas faixas de energia do Na-Sc (15 kV) e do Ti-U (50 kV). Todas as medidas foram realizadas com pressão menor que 30 Pa.

Os resultados da análise elementar foram utilizados para calcular os valores teóricos de μ_s utilizando o programa XCOM (BERGER et al., 1999; HUBBELL; SELTZER, 1995). Um procedimento similar foi realizado para determinar o coeficiente de atenuação de massa da água (μ_a).

2.2.3. Medidas do coeficiente de atenuação de massa do solo

O espectrômetro gama utilizado possui mesa de medidas composta por um castelo de chumbo que contém em uma de suas extremidades uma fonte radioativa de ^{137}Cs (661,6 keV) e, na outra, ^{241}Am (59,54 keV). Um detector de cintilação sólida de NaI(Tl) do tipo plano (7,62×7,62 cm) é utilizado para detecção dos fótons gama.

Os tempos de contagem adotados para as medidas de μ_{es} foram de 600 s e 1200 s para as fontes de ^{137}Cs e ^{241}Am , respectivamente. Por este tempo ser considerado relativamente alto, o *background* da sala foi monitorado diariamente com estes mesmos tempos de contagem. Para isso, a saída da fonte foi bloqueada com um colimador “cego” e com um bloco de chumbo de 10 cm de espessura.

Na entrada do detector foi fixado um colimador com diâmetro de 4,5 mm para todas as medidas e, na saída da fonte, foi possível fixar colimadores com diferentes diâmetros. A temperatura do laboratório foi mantida em 19 ± 1 °C.

Foram medidos espectros diários da radiação durante todo o procedimento experimental, o que permitiu ajustar as janelas do fotopico durante os períodos de medida. Um colimador de 2 mm de diâmetro e tempos de contagem de 30 s (^{137}Cs) e 60 s (^{241}Am) foram utilizados nas medidas dos espectros para o feixe livre e com as amostras utilizadas. A distância entre a fonte e o detector foi mantida fixa e igual a 23 cm. A largura total à meia altura (FWHM) do fotopico foi monitorada diariamente.

O μ_{es} foi determinado a partir da lei de Beer-Lambert:

$$\mu_{\text{es}} = \frac{1}{x\rho_s} \ln\left(\frac{I_0}{I}\right), \quad (2.1)$$

em que I_0 e I (contagens por segundo) representam a intensidade do feixe incidente e do transmitido através da amostra, ρ_s (g cm^{-3}) representa a densidade do solo e x (cm) a sua espessura.

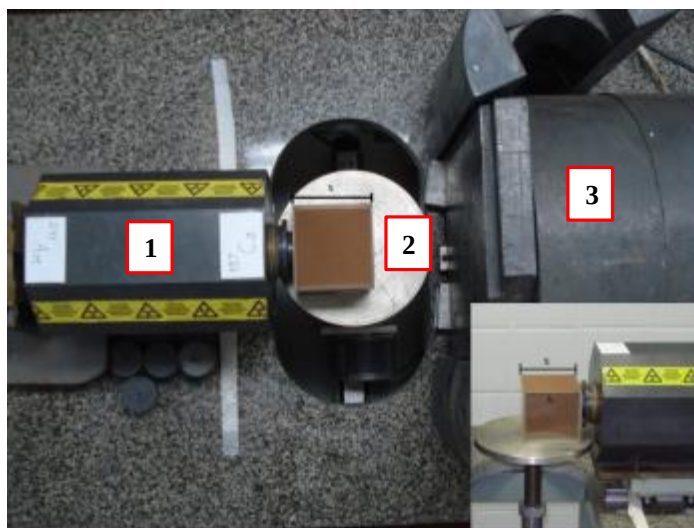
O erro nas medidas de μ_{es} foi calculado por meio de:

$$d\mu_{\text{es}} = \frac{1}{x\rho_s} \left(\frac{\sqrt{I_0}}{I_0} - \frac{\sqrt{I}}{I} \right). \quad (2.2)$$

Colimadores circulares de chumbo com 2, 3 e 4 mm de diâmetro foram utilizados nesse estudo. Medidas de μ_{es} foram realizadas em amostras com diferentes espessuras. Para isso, foram construídas 14 caixas de acrílico com x variando de 2 a 15 cm. Todas as caixas tinham largura e altura de aproximadamente 7,0 e 6,5 cm, respectivamente. Estas foram preenchidas tomando-se o cuidado de manter ρ_s das amostras praticamente constante e igual a $1,39 \pm 0,01 \text{ g cm}^{-3}$ para o solo arenoso, e a $1,24 \pm 0,01 \text{ g cm}^{-3}$ para o solo argiloso.

Durante a realização das medidas, cada caixa foi posicionada em frente à saída da fonte, encostada no colimador, de tal forma que o feixe atravessasse aproximadamente o centro da amostra e ortogonalmente a esta posição. A distância entre a fonte e o detector foi mantida a mesma durante todas as medidas (Figura 2.1).

Figura 2.1: Equipamento de atenuação de raios gama localizado no Laboratório de Física do Solo (Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Piracicaba). No lado esquerdo encontra-se o castelo de chumbo com as fontes de raios gama de ^{241}Am e ^{137}Cs (1), no centro a amostra de solo contida na caixa de acrílico (2) e à direita o detector sob proteção de chumbo (3).



Fonte: Adaptado de Costa (2011).

2.2.4. Análise dos dados

Os melhores resultados de ρ_s geralmente são obtidos a partir de amostras de solo com espessura inferior a 10 cm para a fonte radioativa de ^{241}Am , e no intervalo de 10-25 cm, para a fonte de ^{137}Cs (FERRAZ; MANSELL, 1979). Com base nestes resultados, no presente trabalho foram calculados os valores médios de μ_{es} para as espessuras $x < 10$ e $x \geq 10$ cm. Este procedimento foi realizado para os resultados de cada solo, colimador e fontes radioativas utilizadas. Os resultados foram comparados com o valor teórico de μ_s (XCOM), por meio da diferença relativa (DR) entre eles.

Os valores médios de μ_{es} foram utilizados como referência para verificar a ocorrência de estabilização das medidas com as diferentes espessuras de amostra utilizadas. O μ_{es} de solos de textura similar apresentam um coeficiente de variação (CV) em torno de 2% (FERRAZ; MANSELL, 1979). Com isso, os seguintes critérios foram adotados para estabelecer o *CER*:

- (i) diferença relativa entre o valor de μ_{es} de cada espessura de amostra utilizada e o seu valor médio ($x < 10$ e $x \geq 10$ cm) não superior a 2%;
- (ii) pelo menos três espessuras consecutivas não devem diferir entre si nos valores de μ_{es} , utilizando o critério de variação do Item (i).

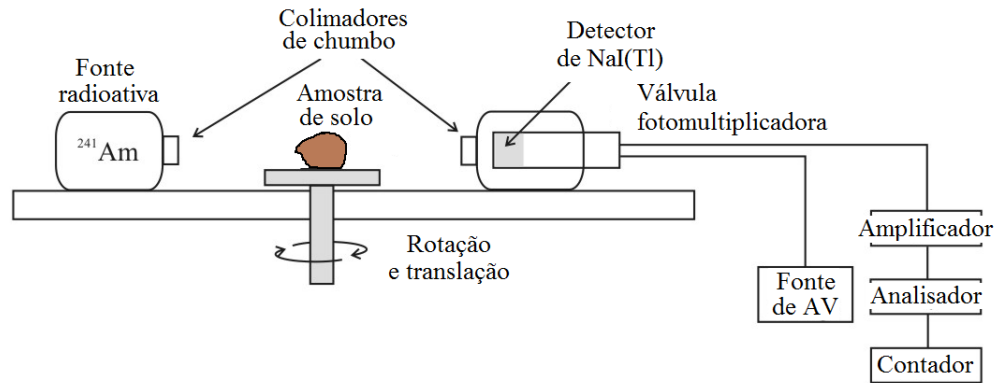
2.2.5. Comprimento elementar representativo e medidas de densidade do solo

Os resultados obtidos com a fonte de ^{241}Am e solo argiloso foram aplicados em análises da área elementar representativa (*AER*) para medidas de ρ_s do solo via TC. Para isso, foram utilizados dados tomográficos de 18 amostras de torrão do solo argiloso coletadas no mesmo local das amostras usadas no estudo do *CER*.

2.2.5.1. Tomógrafo de raios gama

O tomógrafo utilizado é de primeira geração, com fonte e detector fixos e movimentos de rotação e translação realizados pela amostra. O feixe possui configuração de raios paralelos. O tomógrafo foi equipado com fonte de raios gama de ^{241}Am (59,54 keV) com atividade aproximada de 3,7 GBq e detector plano de cintilação sólida de NaI(Tl) com dimensões de 7,62×7,62 cm (Figura 2.2). Os colimadores de chumbo usados na saída da fonte e entrada do detector foram de 1 mm e 4,5 mm, respectivamente. As matrizes de unidades tomográficas (*UT*) obtidas foram de 80×80 para todas as medidas. A resolução espacial obtida para as amostras de torrão foi de 1,1×1,1 mm² e os passos lineares do sistema tomográfico foram de 1,0 a 1,1 mm. Foi obtida uma imagem bidimensional (2D) para cada torrão com a varredura sendo realizada no centro do torrão de solo. O torrão foi fixado na mesa de medidas com auxílio de fita adesiva. Mais detalhes do equipamento podem ser encontrados em Cruvinel et al. (1990) e Pires et al. (2010).

Figura 2.2: Ilustração esquemática do tomógrafo de raios gama de primeira geração.



Fonte: Pires et al. (2011).

2.2.5.2. Obtenção da matriz densidade do solo

Cada pixel da imagem tomográfica possui um valor característico de UT, o qual é proporcional ao coeficiente de atenuação linear do meio. Para o solo, a UT corresponde à contribuição das partículas minerais, da matéria orgânica, da água e do ar (CRESTANA et al., 1996). A relação entre as UTs e ρ_s é dada por:

$$\rho_s = \frac{1}{\mu_s} \left(\frac{UT}{\alpha} - \mu_a \rho_a \theta_r \right), \quad (2.3)$$

onde α (cm) é o coeficiente angular da reta de ajuste obtido durante a calibração do TC e θ_r ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$) representa a umidade residual do solo.

Para cada amostra foram geradas quatro matrizes de ρ_s , a partir dos valores médios de μ_{es} , para cada intervalo de espessura e colimador. O programa Microvis (MACEDO; JORGE; CRESTANA, 2000) foi usado para a reconstrução e análise das imagens tomográficas. O método de retroprojeção filtrada foi utilizado na reconstrução das imagens (KAK; SLANEY, 1999).

2.2.5.3. Área elementar representativa

Para a análise da AER, ρ_s foi calculada para diferentes áreas selecionadas nas imagens tomográficas. Primeiramente foi selecionada uma área englobando quase toda a imagem, com formato irregular, denominada área livre (AL). O valor de ρ_s obtido na AL de cada torrão com o valor de μ_s (XCOM) foi adotado como valor de referência via TC. Em

seguida, delimitou-se a maior área retangular possível no interior da amostra, sem a interferência das bordas na imagem tomográfica. Dentro desta, foram selecionadas áreas quadrangulares concêntricas consecutivas. A área inicial foi obtida a partir de uma matriz quadrada de ordem 1×1 ($1,1 \times 1,1$ mm). O número de áreas delimitadas no interior de cada amostra variou de acordo com o tamanho e formato da mesma. Mais detalhes com relação ao procedimento realizado podem ser encontrados em Borges; Pires e Pereira (2012).

Medidas de ρ_s obtidas pelo método tradicional do torrão parafinado, para o solo argiloso analisado, apresentaram CV de 4% (BORGES; PIRES, 2012). Assim, para cada amostra foi determinada a *AER* em função de ρ_s com valores médios de μ_{es} calculados a partir dos resultados de *CER*, conforme os seguintes critérios:

- (i) diferença relativa entre o valor de referência de ρ_s e de cada uma das demais áreas não superior a 4%;
- (ii) pelo menos três áreas consecutivas não devem diferir entre si nos valores de ρ_s , utilizando o critério de variação do Item (i).

O valor da espessura ótima da amostra (x^*) (FERRAZ; MANSELL, 1979), para medidas de atributos físicos do solo, foi calculado a partir da Equação 2.4:

$$x^* = \frac{2}{\mu_s \rho_s + \mu_a \rho_a \theta_r}. \quad (2.4)$$

Para isso, foi utilizado o valor da densidade média do solo obtido a partir do resultado de ρ_s de cada uma das 18 amostras de torrão de solo argiloso, bem como os valores de μ_s e μ_a teóricos (XCOM) para a energia de 59,54 keV (^{241}Am). Os resultados de x^* foram comparados com os obtidos via análises da *AER*.

2.3. Resultados e discussão

2.3.1. Coeficiente de atenuação de massa do solo

Na Tabela 2.1 são apresentados os valores de μ_s calculados (XCOM) e medidos, e a diferença relativa entre eles. O erro associado às medidas (Equação 2.2) foi obtido na 5ª casa decimal para a fonte de ^{137}Cs e na 4ª casa para a fonte de ^{241}Am .

Tabela 2.1: Resultados obtidos para o coeficiente de atenuação de massa do solo (μ_s) a partir da análise elementar (utilizando o programa XCOM) e da técnica de atenuação de raios gama.

Colimador		^{137}Cs				^{241}Am			
		Arenoso		Argiloso		Arenoso		Argiloso	
		μ_s (cm ² g ⁻¹)	DR (%)	μ_s (cm ² g ⁻¹)	DR (%)	μ_s (cm ² g ⁻¹)	DR (%)	μ_s (cm ² g ⁻¹)	DR (%)
	XCOM	0,0767	--	0,0763	--	0,2807	--	0,3764	--
2 mm	<10*	0,0763	0,5	0,0758	0,7	0,2703	3,7	0,3720	1,2
	≥10	0,0772	0,7	0,0773	1,3	0,2626	6,4	0,3295	12,5
3 mm	<10	0,0735	4,2	0,0737	3,4	0,2730	2,7	0,3628	3,6
	≥10	0,0754	1,7	0,0748	2,0	0,2728	2,8	0,3652	3,0
4 mm	<10	0,0708	7,7	0,0714	6,4	0,2612	6,9	0,3611	4,1
	≥10	0,0735	4,2	0,0737	3,4	0,2629	6,3	0,3625	3,7

Fonte: A autora.

Nota: *Os resultados obtidos via atenuação de raios gama correspondem à média para as espessuras de $x < 10$ e $x \geq 10$ cm para cada energia (^{241}Am e ^{137}Cs), colimador e solo. As diferenças relativas (DRs) foram calculadas entre cada valor médio e o respectivo μ_s obtido via programa XCOM, adotado como valor de referência.

A partir dos resultados obtidos via XCOM, observou-se que os valores de μ_s para fótons gama de baixa energia (≈ 60 keV) apresentam maior diferença entre os solos analisados em relação aos valores de μ_s para a energia de radiação de ≈ 662 keV. Isto se deve ao fato de que, em baixas energias, as diferenças na composição química afetam de forma mais pronunciada a atenuação da radiação por um dado material (FERRAZ; MANSELL, 1979). No presente estudo, o solo argiloso apresentou um valor de μ_s 25,4% maior em relação ao solo arenoso para a energia do ^{241}Am . Para a fonte de ^{137}Cs os resultados são muito próximos. Porém, com uma suave inversão. Este fato se deve à maior quantidade de Fe_2O_3 presente no solo argiloso (Tabela 2.2) (HUBBELL; SELTZER, 1995). Uma simulação realizada com valores hipotéticos mostrou que, ao se aumentar a quantidade de Fe_2O_3 presente na composição do solo, o μ_s para a energia do ^{241}Am aumenta na ordem de décimos, enquanto que o do ^{137}Cs é reduzido em milésimos.

Tabela 2.2. Óxidos presentes em quantidade superior a 1% nos solos analisados.

Solo	Óxidos (%)					
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	TiO_2	SO_3	Outros
Arenoso	62,80	30,03	3,47	1,93	1,39	0,38
Argiloso	44,19	32,84	16,74	3,49	1,71	1,03

Fonte: A autora.

Com relação aos resultados experimentais da Tabela 2.1, para a fonte de ^{137}Cs observou-se que para os colimadores de 3 e 4 mm as DRs entre os valores médios de μ_s das espessuras maiores em relação ao teórico foram inferiores àqueles das espessuras menores. O comportamento inverso foi observado apenas para o colimador de 2 mm, para ambos os solos. Para a fonte de ^{241}Am e colimadores de 2 e 3 mm não houve definição do espectro para

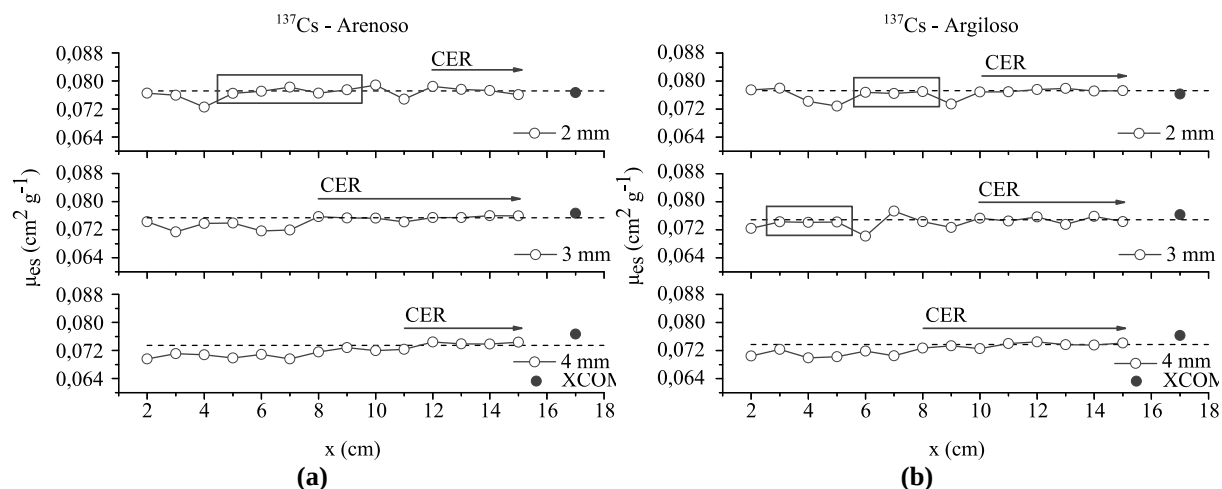
espessuras maiores que 12 e 14 cm, respectivamente. As menores DRs foram obtidas para $x < 10$ cm para o colimador de 2 mm (ambos os solos) e para o colimador de 3 mm e solo arenoso. Para os demais casos, as menores DRs foram observadas para espessuras $x \geq 10$ cm.

Os valores médios de μ_{es} mais próximos para ambos os intervalos de espessura e ambos os solos foram obtidos para o colimador de 2 mm e fonte de ^{137}Cs , e para o de 4 mm e fonte de ^{241}Am . Ou seja, as diferenças entre os intervalos de espessura são mais pronunciados ao se utilizar os colimadores maiores para a fonte de ^{137}Cs , e os colimadores menores para a fonte de ^{241}Am . Quanto à DR extremamente alta de μ_{es} para $x \geq 10$ cm, fonte de ^{241}Am , colimador de 2 mm e solo argiloso, o espectro indefinido para espessuras maiores que 12 cm já é um indicativo da inadequação destas para medidas realizadas com fótons de baixa energia e colimadores com abertura muito pequena. A heterogeneidade do solo, o tamanho de suas partículas e possível compactação da amostra que venha a acontecer dentro do porta-amostra, tornam-se possíveis fontes de erro (FERRAZ; MANSELL, 1979).

2.3.2. Comprimento elementar representativo

Nas Figuras 2.3 e 2.4 são apresentados os gráficos dos valores de μ_{es} obtidos para cada espessura de amostra analisada. A partir da análise da variabilidade dos resultados foi possível identificar regiões de *plateau* nos gráficos. De um modo geral, para a fonte de ^{137}Cs observa-se maior flutuação de cada valor em relação ao valor médio (linha tracejada) para as menores espessuras, quando comparados aos resultados obtidos para as espessuras maiores (Figura 2.3a, b). Essas flutuações são reduzidas à medida que a espessura aumenta até atingir um *plateau*, no qual cada valor de μ_{es} apresenta variação inferior a 2% em relação ao valor médio.

Figura 2.3. Coeficiente de atenuação de massa experimental do solo (μ_{es}) e comprimento elementar representativo (CER). Os resultados foram obtidos para diferentes espessuras de amostra (x), tipos de solo (a, b) e colimadores para a fonte de ^{137}Cs . A linha tracejada corresponde à média dos valores de μ_{es} para espessura de amostra $x \geq 10$ cm. O símbolo preenchido corresponde ao valor teórico obtido via XCOM.



Fonte: A autora.

Para o solo arenoso, o *plateau* ocorreu a partir das espessuras 12, 8 e 11 cm para os colimadores de 2, 3 e 4 mm, respectivamente (Figura 2.3a). Para o solo argiloso estes valores foram de 10 cm para os colimadores de 2 e 3 mm, e de 8 cm para o de 4 mm (Figura 2.3b).

Para o solo arenoso e colimador de 2 mm, além do *plateau*, uma outra região de estabilização foi observada para um número mínimo de 3 espessuras sequenciais: 5-9 cm. Os demais colimadores não apresentaram essa característica. Para o solo argiloso, essas regiões foram observadas para os dois colimadores menores: 6-8 (2 mm) e 3-5 cm (3 mm). No entanto, apesar de serem estáveis, estas regiões encontram-se isoladas e não apresentam um padrão entre os diferentes solos e colimadores.

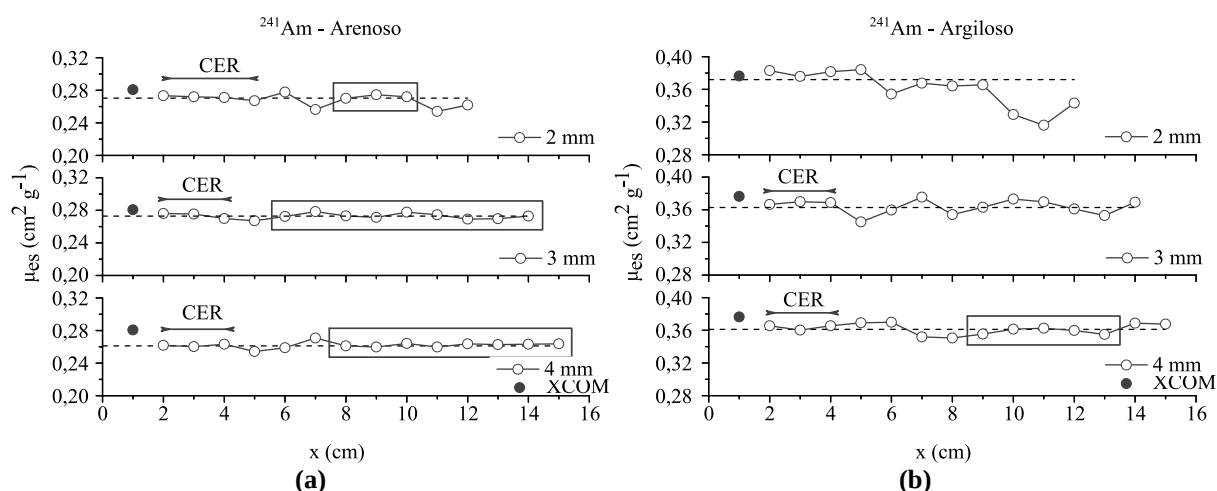
Quanto aos valores teóricos de μ_s plotados na sequência dos resultados experimentais (símbolo preenchido), de uma forma geral observa-se que para ambos os solos as regiões de *plateau* dos colimadores menores apresentaram uma tendência mais acentuada a este, quando comparados aos resultados obtidos para o colimador de 4 mm, de acordo com os valores de DR apresentados na Tabela 2.1.

Como a fonte de ^{137}Cs possui energias de radiação de intensidade média (≈ 662 keV), os valores de μ_{es} não diferiram muito entre si para os dois solos estudados. Com isso, é possível definir um valor de espessura mínimo a ser adotado para medidas de μ_{es} destes dois solos, com cada um dos colimadores. Para o colimador de 2 mm, a espessura mínima necessária para que o *plateau* fosse atingido para ambos os solos foi de 12 cm. Para os colimadores de 3 e 4 mm, esta espessura foi de 10 e 11 cm, respectivamente. Para ambos os solos e com qualquer um destes três colimadores, podem ser utilizadas amostras com

espessura de 12-15 cm, já que estas foram as que apresentaram resultado estável a 2% de variação em todos os casos analisados.

Para a fonte de ^{241}Am (Figura 2.4a, b), a situação inversa é observada. Uma região de *plateau* para as espessuras iniciais ocorre em todos os casos (diferentes solos e colimadores), com exceção apenas para o colimador de 2 mm e solo argiloso. Esta exceção pode ser explicada pela associação de dois fatores: a composição química e mineralógica deste solo e o diâmetro do colimador utilizado. Como visto na Tabela 2.2, o solo argiloso apresenta maior quantidade de Fe_2O_3 ($\approx 79\%$ a mais que o solo arenoso) e, para a energia da fonte de ^{241}Am as diferenças na composição química das amostras influenciam de forma mais acentuada no seu valor de μ_s . O diâmetro do colimador utilizado pode explicar a maior ocorrência de valores de μ_{es} subestimados ($\approx 64\%$) em relação ao valor médio, o que neste caso ocorreu para as espessuras acima de 5 cm.

Figura 2.4. Coeficiente de atenuação de massa experimental do solo (μ_{es}) e comprimento elementar representativo (CER). Os resultados foram obtidos para diferentes espessuras de amostra (x), tipos de solo (a, b) e colimadores para a fonte de ^{241}Am . A linha tracejada corresponde à média dos valores de μ_{es} para espessura de amostra $x < 10$ cm. O símbolo preenchido corresponde ao valor teórico obtido via XCOM.



Fonte: A autora.

Para o solo arenoso (Figura 2.4a) foi observada mais uma região de estabilização além do *plateau* nas primeiras espessuras, para todos os colimadores. No entanto, os resultados mais estáveis ocorreram para os colimadores maiores. Com especial atenção para o colimador de 3 mm; neste foi observada alta uniformidade entre os valores de μ_{es} , sendo que apenas uma espessura, a de 5 cm, apresentou variação superior. No entanto, esta diferença foi de apenas 0,09 a mais que 2%. Para o solo argiloso, este comportamento foi observado apenas para o colimador de 4 mm. Esses valores estáveis observados para as espessuras maiores podem ser explicados devido ao espalhamento Compton se tornar importante na razão da

intensidade da radiação (I/I_0) e gerar resultados mais altos do que o esperado para fótons de baixa energia (FERRAZ; MANSELL, 1979).

De uma forma geral, as regiões de *plateau* que mais se aproximaram do valor de μ_s ocorreram para os colimadores menores. O colimador de 4 mm apresenta uma maior homogeneidade nos resultados, não sendo tão sensível às variações na espessura da amostra utilizada, e gerando valores mais discrepantes em relação ao teórico.

A partir desses resultados observa-se que nos casos em que o *plateau* foi atingido, as espessuras de 2-4 cm são comuns em todos eles, podendo ser estas utilizadas para medidas representativas de μ_{es} com os colimadores de 2 a 4 mm para o solo arenoso e de 3 a 4 mm para o solo argiloso. A possibilidade de utilização de amostras pequenas e, principalmente, a obtenção de resultados representativos de μ_{es} , é importante tanto devido à menor quantidade necessária de amostra a ser coletada e preparada para uso, quanto para a redução do tempo de análise.

No entanto, é importante observar que os resultados aqui apresentados foram obtidos com amostras deformadas, o que reduz a possibilidade de ocorrência de erros devido a não uniformidades na estrutura física da amostra como, por exemplo, regiões com diferentes ρ_s . O emprego de amostras indeformadas provavelmente exigiria espessuras diferentes para a obtenção de medidas representativas de μ_{es} .

2.3.3. Influência de μ_{es} em medidas da AER para a densidade do solo via TC

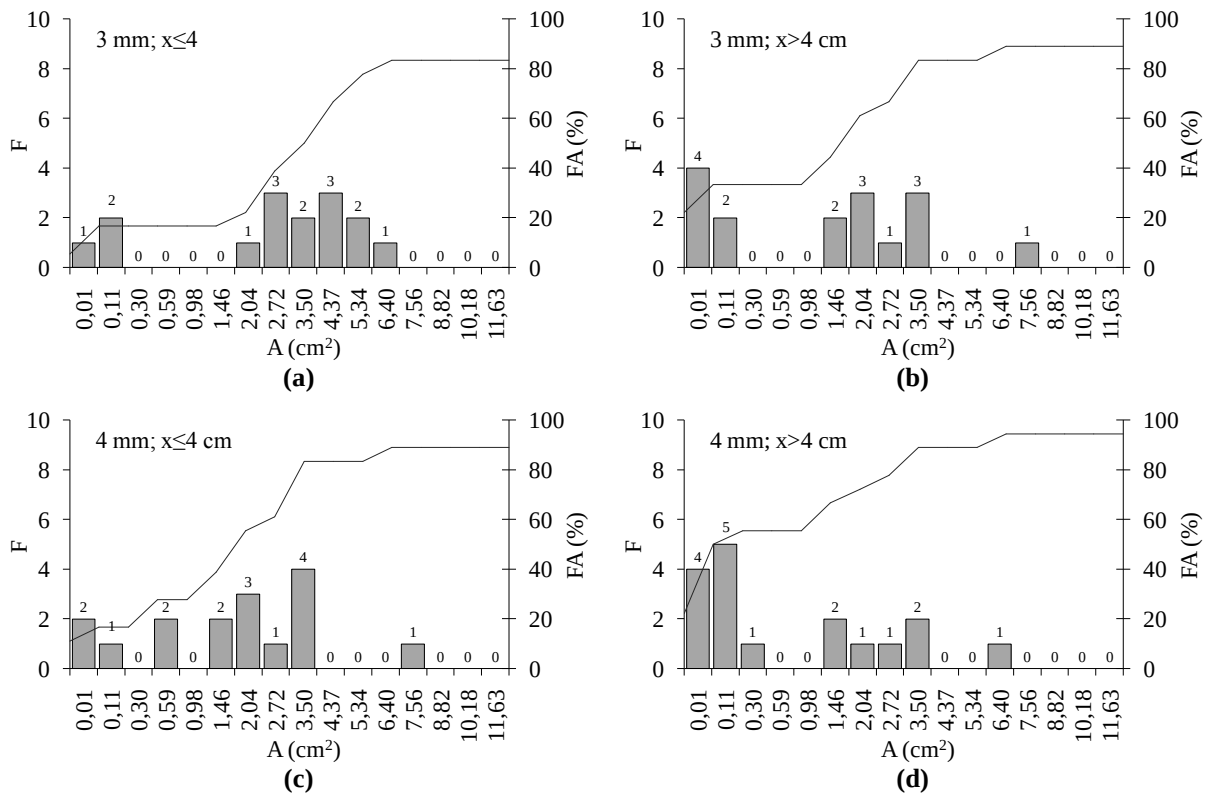
As amostras de torrão de solo apresentaram umidade residual $\theta_r=0,01 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e densidade média $1,52 \pm 0,06 \text{ g cm}^{-3}$. O coeficiente de atenuação de massa da água foi de $0,2066 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$. A partir desses resultados, o valor de espessura ótima calculada foi de 3,48 cm.

Com os resultados de CER, matrizes densidade foram geradas com os valores médios de μ_{es} para $x \leq 4$ e $x > 4$ cm para os colimadores de 3 e 4 mm. Os valores de μ_{es} foram 0,3684 e 0,3623 $\text{cm}^2 \text{ g}^{-1}$ (3 mm) e 0,3638 e 0,3611 $\text{cm}^2 \text{ g}^{-1}$ (4 mm).

A Figura 2.5 exibe o número de amostras que atingiu a AER para cada um dos casos analisados. Para o valor médio de μ_{es} obtido para espessuras $x \leq 4$ cm e colimador de 3 mm (Figura 2.5a), um total de 15 amostras (83%) atingiu a AER até no máximo a 12ª área quadrangular selecionada ($6,40 \text{ cm}^2$). Para este mesmo colimador e μ_{es} médio para $x > 4$ cm, 16 amostras atingiram a AER até a 13ª área ($7,56 \text{ cm}^2$). Para o colimador de 4 mm (Figura 2.5c,

d), 16 e 17 amostras atingiram a *AER* até a 13^a e 12^a área, para $x \leq 4$ e $x > 4$ cm, respectivamente.

Figura 2.5. Frequência (F) e frequência acumulada (FA) do número de amostras que atingiu a área elementar representativa (*AER*) para medidas da densidade do solo (ρ_s) em cada uma das áreas (A) selecionadas. Os resultados foram obtidos utilizando os valores médios de coeficiente de atenuação de massa experimental (μ_{es}) ($x \leq 4$ e $x > 4$ cm) para a fonte de ^{241}Am e colimadores circulares com diâmetros de 3 (a,b) e 4 mm (c,d).



Fonte: A autora.

Os resultados mostraram que em todos os casos analisados mais de 80% das amostras atingiram a *AER* dentro da área quadrangular máxima selecionada (11,63 cm²), a qual corresponde a uma espessura de 3,41 cm. Este resultado corrobora com o valor de x^* calculado, bem como com resultados encontrados na literatura para medidas de ρ_s de amostras de solo indeformadas (FERRAZ; MANSELL, 1979; PEDROTTI et al., 2003). No entanto, a partir das análises de *AER* observou-se que a grande maioria das amostras apresentou valores estáveis de ρ_s para análises via TC em espessuras inferiores a 3,41 cm. A espessura máxima necessária para que as amostras que apresentaram estabilização atingissem a *AER* foi de 2,53 (Figura 2.5a, d) e 2,75 cm (Figura 2.5b, c).

Segundo Miyazaki (2005), um dos critérios para definir o tamanho elementar representativo é que este deve fornecer um método de medida operacionalmente conveniente. A possibilidade do uso de amostras com espessuras como as obtidas neste trabalho facilita as

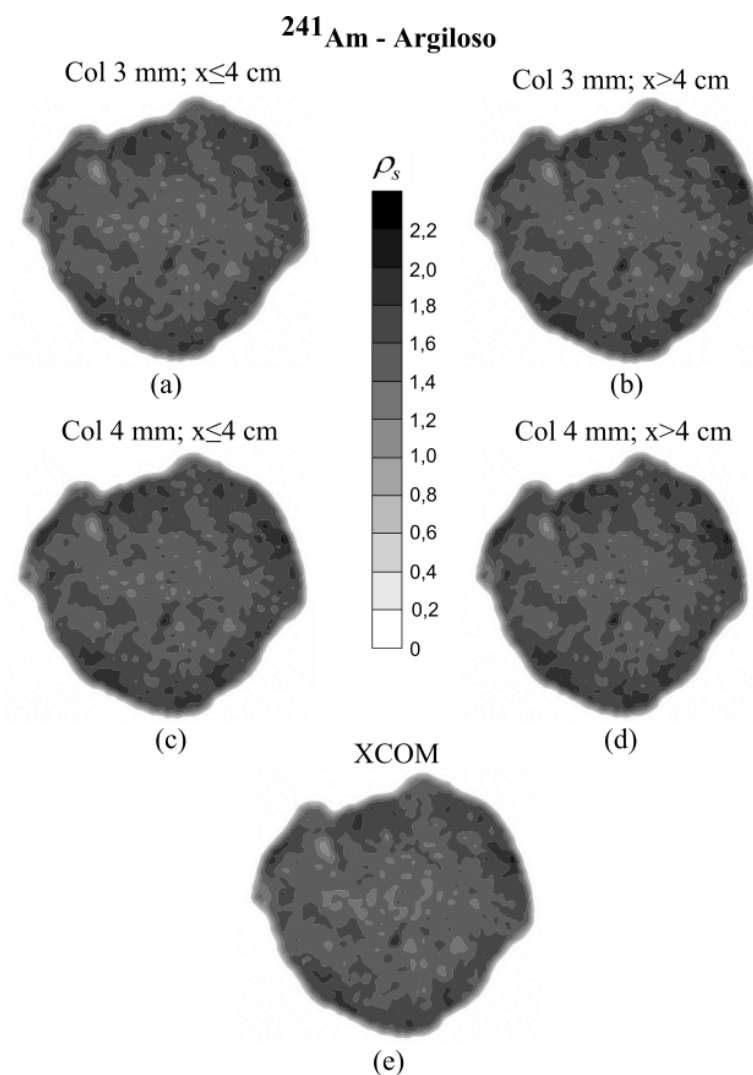
etapas de coleta e preparo, e, principalmente, para análises via TC demandam um menor custo computacional.

A partir da Figura 2.5 também é possível observar um aumento no número de amostras que apresentaram valores de ρ_s estáveis nas 5 primeiras áreas, quando é utilizado o valor médio de μ_{es} para $x > 4$ cm. Este número foi igual ao dobro do valor para $x \leq 4$ cm para ambos os colimadores: de 3 para 6 (3 mm) e de 5 para 10 amostras (4 mm). Com isso, os resultados obtidos a partir de um valor de μ_{es} não representativo podem induzir à utilização de amostras com tamanhos inferiores ao ideal, gerando valores de ρ_s que não representem a situação encontrada no campo experimental.

Na Figura 2.6 são apresentadas imagens tomográficas 2D geradas com os dados de um dos torrões de solo argiloso utilizados neste trabalho, e com os diferentes valores médios de μ_{es} . Análises qualitativas indicam as variações de ρ_s no interior da amostra. De acordo com o valor de μ_{es} utilizado, regiões de maior ou menor ρ_s (tons mais escuros ou mais claros na escala de cinza) podem aparecer com maior ou menor frequência na imagem, fazendo com que ρ_s seja sub ou superestimada.

As Figuras 2.6a e 2.6c correspondem às imagens que apresentam distribuições de ρ_s mais próximas à obtida com o valor de μ_s teórico (XCOM). Este resultado é corroborado pelo desvio entre estes valores médios de μ_{es} ($x \leq 4$ cm) e o valor teórico. As DRs foram de 2,13 e 3,75% (3 mm) e de 3,35 e 4,06% (4 mm) para as espessuras $x \leq 4$ e $x > 4$ cm, respectivamente. Ou seja, os menores desvios foram obtidos para a média das espessuras menores para ambos os colimadores.

Figura 2.6. Imagens tomográficas (2D) de um torrão de solo argiloso geradas com o valor teórico (XCOM) e com os valores médios de μ_{es} ($x \leq 4$ e $x > 4$ cm) para a fonte de ^{241}Am e diferentes colimadores. A barra em escala de cinza apresenta os valores de densidade do solo (ρ_s).



Fonte: A autora.

Conclusões

Os resultados confirmam que, para maior precisão em medidas do coeficiente de atenuação de massa experimental do solo (μ_{es}), a espessura da amostra deve ser otimizada. Para medidas do μ_{es} de solos arenosos e argilosos, com colimadores circulares de 2, 3, e 4 mm de diâmetro, o comprimento elementar representativo está no intervalo de espessura de 2–4 e 12–15 cm para as fontes de ^{241}Am e ^{137}Cs , respectivamente. Estes intervalos de espessura fornecem μ_{es} com as menores variações e mais próximos ao valor teórico (XCOM). A aplicação dos resultados obtidos para a fonte de ^{241}Am para o solo argiloso em avaliações de área elementar representativa para medidas de densidade do solo via tomografia computadorizada indicam

que os valores médios de μ_{es} para $x > 4$ cm podem induzir ao uso de amostras com tamanho não representativo.

Referências

- ABDEL-RAHMAN, M. A. A. et al. Effect of sample thickness on the measured mass attenuation coefficients of some compounds and elements 59.54, 661.6 and 1332.5 keV gamma-rays. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A**, v. 447, p. 432–436, 2000.
- BEAR, J. **Dynamics of Fluids in Porous Media**. New York, NY, USA: Dover Publications, 1972.
- BERGER, M. J. et al. **XCOM: Photon Cross Sections on a Personal Computer**. Gaithersburg: National Bureau of Standard, 1999. Disponível em: <<http://www.nist.gov/pml/data/xcom/index.cfm>>.
- BORGES, J. A. R.; PIRES, L. F. Representative elementary area (REA) in soil bulk density measurements through gamma ray computed tomography. **Soil and Tillage Research**, v. 123, p. 43–49, jul. 2012.
- BORGES, J. A. R.; PIRES, L. F.; PEREIRA, A. B. Computed Tomography to Estimate the Representative Elementary Area for Soil Porosity Measurements. **The Scientific World Journal**, v. 2012, p. 10, jan. 2012.
- COSTA, J. C. **Tamanho do colimador e espessura da amostra em medidas do coeficiente de atenuação de raios gama do solo**. Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2011.
- COSTA, J. C. et al. Soil mass attenuation coefficient: Analysis and evaluation. **Annals of Nuclear Energy**, v. 64, p. 206–211, fev. 2014.
- COSTA, J. C.; BORGES, J. A. R.; PIRES, L. F. Soil bulk density evaluated by gamma-ray attenuation: Analysis of system geometry. **Soil and Tillage Research**, v. 129, p. 23–31, maio 2013.
- CRESTANA, S. et al. (EDS.). **Agricultural Instrumentation: Contributions on the Threshold of New Century**. Brasília: EMBRAPA - SPI, 1996.
- CRUVINEL, P. E. et al. X- and γ -Rays Computerized Minitomograph Scanner for Soil Science. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 39, n. 5, p. 745–750, 1990.
- EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. Brasília: EMBRAPA, 2013.
- FERRAZ, E. S. B.; MANSELL, R. S. **Determining water content and bulk density of soil by gamma ray attenuation methods**. Florida: IFAS, 1979.

GOPAL, S.; SANJEEVAIAH, B. Gamma-Ray Attenuation Coefficient Measurements. **Physical Review A**, v. 8, p. 2814–2818, 1973.

GOSWAMI, B.; CHAUDHURI, N. Measurements of Gamma-Ray Attenuation Coefficients. **Physical Review A**, v. 7, p. 1912–1916, 1973.

HUBBELL, J. H.; SELTZER, S. M. **Tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients 1 keV to 20 MeV for elements Z=1 to 92 and 48 additional substances of dosimetric interest**. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 1995.

JURY, W. A.; HORTON, R. C. N. **Soil physics**. 6th. ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley, 2004.

KAK, A. C.; SLANEY, M. **Principles of Computerized Tomographic Imaging**. New York: IEEE Press, 1999.

MACEDO, A.; JORGE, L. A. C.; CRESTANA, S. **Microvis: Program Manual for Reconstruction and Visualization of Tomographic Images**. São Carlos: Embrapa - CNPDIA, 2000.

MIYAZAKI, T. **Water Flow in Soils**. 2. ed. Boca Raton, FL, USA: Taylor & Francis Group, 2005.

OCHBELAGH, D. R. Investigation of Collimator Effect on Full-Width at Half-Maximum of NaI(Tl) Detector. **Asian Journal of Experimental Sciences**, v. 23, n. 1, p. 357–362, 2009.

PEDROTTI, A. et al. Planosol soil sample size for computerized tomography measurement of physical parameters. **Scientia Agricola**, v. 60, p. 735–740, 2003.

PIRES, L. F. **Atenuação de Raios Gama como técnica auxiliar para a determinação da curva de retenção da água no solo**. Universidade de São Paulo, 2002.

PIRES, L. F. et al. Twenty-five years of computed tomography in soil physics: A literature review of the Brazilian contribution. **Soil and Tillage Research**, v. 110, n. 2, p. 197–210, 2010.

PIRES, L. F. et al. Characterization of changes in soil porous system by gamma-ray tomography. **Nuclear Instruments & Methods in Physics Research Section a-Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment**, v. 644, p. 68–71, 2011.

SIDHU, G. S. et al. Effect of collimator size and absorber thickness on gamma ray attenuation measurements for bakelite and perspex. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 56, p. 535–537, 1999.

VARIER, K. M.; KUNJU, S. N.; MADHUSUDANAN, K. Effect of Finite Absorber Dimensions on Gamma-Ray Attenuation Measurements. **Physical Review A**, v. 33, p. 2378–2381, 1986.

3. Microtomografia de raios X na caracterização micromorfológica dos macroporos de um solo submetido a diferentes sistemas de manejo

Resumo

Neste trabalho, imagens tridimensionais (3D) de microtomografia de raios X (μ TC) foram utilizadas para caracterizar o espaço poroso de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso, submetido ao sistema plantio direto (PD) e ao plantio convencional (PC). O equipamento microtomográfico utilizado foi um “MS8x-130 μ CT scanner” de segunda geração, com placa de detectores de geometria bidimensional e feixe de raios X cônico. Foram analisadas seis amostras de cada sistema de manejo, amostradas na camada superficial (0,05-0,10 m). O volume total de imagem analisado foi de 50.193 mm³, com resolução espacial de 60 μ m, possibilitando a detecção de poros com raio equivalente ≥ 30 μ m (macroporos). *Plugins* específicos implementados no programa *ImageJ* foram utilizados para o pré-processamento e processamento das imagens. Os macroporos foram caracterizados tridimensionalmente quanto ao número (*NMAP*) e volume, bem como estudou-se a distribuição dos mesmos por intervalo de volume e formato do poro. A macroporosidade (*MAP*, %) também foi determinada pelo método tradicional da mesa de tensão. Os resultados de macroporosidade média ($\overline{MAP}$) para ambos os sistemas de manejo não diferiram entre os métodos de medida pelo teste t-Student ($p \leq 0,05$). Os maiores valores de $\overline{MAP}$ e $\overline{NMAP}$ foram obtidos para o PC. No entanto, a distribuição de *MAP* e *NMAP* por volume e formato de poros foi similar para ambos os manejos. Os poros do tipo canal foram os mais abundantes, enquanto os do tipo planar e acircular-planar foram detectados em menor quantidade.

X-ray microtomography in the micromorphological characterization of macropores of a soil under different tillage systems

Abstract

In this paper, three-dimensional (3D) tomographic images were utilized to characterize the pore space of a Rhodic Ferralsol of clay texture under no-till (NT) and conventional till (CT) systems. X-ray CT imagery of the soil was obtained using a MS8x-130 μ CT scanner (EVS Corp., Toronto, ON), which is equipped with a 2D geometry detector plate and conic X-ray

beam. Six samples collected from the surface layer (0.05-0.10 m) of each tillage systems were analyzed. The total image volume of 50,193 mm³ with 60 µm spatial resolution was studied, which enabled the detection of soil pores with an equivalent radius ≥ 30 µm (macropores). Specific plugins implemented in *ImageJ* software were used for pre-processing and processing of the images. The macropores were characterized three-dimensionally concerning the number (*NMAP*) and volume, as well as the pore distribution was studied by the volume interval and pore shape. The macroporosity (*MAP*) was also determined by the traditional method of tension table. The results of average macroporosity ($\overline{MAP}$) for both tillage systems did not differ regarding methods by the t-Student test ($p \leq 0.05$). The highest value of $\overline{MAP}$ and $\overline{NMAP}$ were obtained for CT. However, the distribution of *MAP* and *NMAP* by volume and pore shape was similar for both managements. The channel pores were the most abundant, while planar and acircular-planar types were detected in small amounts..

3.1. Introdução

A caracterização micromorfológica do solo é tradicionalmente realizada por meio da análise de imagens de amostras indeformadas coletadas em blocos e impregnadas com resina, com posterior confecção de lâminas (VEPRASKAS; WILSON, 2008). Esta técnica viabiliza o estudo de componentes estruturais do solo (matriz, poros), possibilitando a descrição da distribuição e arranjo de seus constituintes. No entanto, dificuldades como o tempo longo necessário para realizar a impregnação, o corte e o polimento das amostras tornam o trabalho oneroso, sendo inviável a avaliação tridimensional da estrutura do solo a partir deste método (CASTRO et al., 2003; KOOISTRA, 1990; PIRES et al., 2013). Amostras submetidas a tal tratamento tem sua estrutura original comprometida, o que impossibilita a avaliação das mesmas por diferentes métodos. Além disso, outra limitação da técnica se dá no estudo do transporte de solutos em meios não saturados e de processos de armazenamento, uma vez que toda a fase líquida é removida durante a preparação da amostra (REZANEZHAD et al., 2009).

A associação da análise micromorfológica com novas técnicas de obtenção de imagens, como a microtomografia de raios X (µTC), permite ampliar a sua aplicabilidade (TAINA et al., 2010). Juntamente com avanços no tratamento, segmentação e análise de imagens (BECKERS et al., 2014; JEFFERIES et al., 2014), a µTC possibilita que imagens 3D sejam obtidas com alta resolução espacial, e vem sendo aplicada com sucesso no estudo da

estrutura interna de amostras de solo, bem como dos processos dinâmicos que ocorrem neste meio poroso (KATUWAL et al., 2015; PIRES et al., 2010; STEFANIUK; TANKIEWICZ; STRÓŻYK, 2015).

Na caracterização do sistema poroso do solo, a μ TC pode ser empregada em análises do número, volume, esfericidade, formato, tortuosidade e conectividade dos poros, bem como na quantificação de sua porosidade total (CARDUCCI et al., 2014b; DAL FERRO et al., 2014; DOWUONA; TAINA; HECK, 2009). Em especial, os macroporos, também denominados poros de transmissão, são de suma importância para a avaliação da estrutura do solo e dos processos que ocorrem nesse meio poroso (GŁĄB; ŚCIGALSKA; ŁABUZ, 2013; RAB et al., 2014).

Os macroporos afetam diretamente a infiltração de água no solo, a aeração, o crescimento e a respiração do sistema radicular (JURY; HORTON, 2004). Sua formação é influenciada por fatores tais como: atividade de raízes, ciclos de umedecimento e secamento, ação biótica do solo e, principalmente, ações antrópicas, as quais estão relacionadas aos tipos de manejo do solo (BRONICK; LAL, 2005; PAGENKEMPER et al., 2013; PIRES et al., 2008).

O manejo adequado do solo é fundamental para a produção agrícola sustentável (HAMZA; ANDERSON, 2005; LAL; SHUKLA, 2004; PEDROTTI; JUNIOR, 2009; RAB et al., 2014). No Brasil, os sistemas de manejo mais praticados são o plantio direto (PD) e o plantio convencional (PC). Estes sistemas diferem quanto ao grau de revolvimento do solo. Enquanto no PC são feitas operações de preparo (arações e gradagens) para a semeadura de culturas, no PD o revolvimento do solo é mínimo e restrito à linha de semeadura (BETIOLI JÚNIOR et al., 2012; DAVEIGA et al., 2007). Em função disso, ambos os manejos provocam alterações na estrutura do solo, afetando principalmente a sua macroporosidade (AULER et al., 2014; BERTOL et al., 2000; FERRERAS et al., 2000; TORMENA et al., 2004).

Com a vantagem de possibilitar a análise visual da estrutura interna do solo, bem como quantificar o atributo físico de interesse, a μ TC possibilita avaliar o impacto causado por diferentes sistemas de manejo sobre o solo. Além disso, os aparelhos de μ TC são capazes de fornecer imagens na resolução espacial ideal para detectar os macroporos do solo (BERALDO; SCANNAVINO JUNIOR; CRUVINEL, 2014; MUNKHOLM; HECK; DEEN, 2013). Tendo isto em mente, o objetivo do presente estudo foi utilizar imagens tridimensionais da estrutura do solo obtidas via μ TC para a caracterização micromorfológica dos macroporos de um Latossolo Vermelho distrófico sob os sistemas de manejo de plantio direto e plantio convencional.

3.2. Material e métodos

3.2.1. Localização e caracterização do local de estudo

As amostras utilizadas neste estudo foram coletadas no Instituto Agronômico do Paraná (IAPAR), na cidade de Ponta Grossa, Paraná (25°06' S, 50°10' O, 875 m acima do nível do mar). A região apresenta clima subtropical úmido (Cfb), segundo classificação de Köppen, com precipitação média anual de 1550 mm e temperatura média no mês mais frio abaixo de 18 °C. A ocorrência de geadas é frequente (mesotérmico) e os verões são frescos com temperatura média no mês mais quente abaixo de 22 °C e sem estação seca definida (IAPAR, 2009).

O solo em estudo foi classificado como um Latossolo Vermelho distrófico argiloso (LVd) de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (EMBRAPA, 2013). Foram avaliados os sistemas de manejo de PD e PC, os quais vem sendo praticados na área de estudo por um período de aproximadamente 25 anos (CÁSSARO et al., 2011). No PD o revolvimento do solo foi restrito à linha de semeadura (0,10 m de largura × 0,10 m de profundidade). No PC, duas vezes ao ano empregaram-se as operações de aração a 0,20 m e gradagem de nivelamento no terreno para a implantação das culturas de inverno e verão. A rotação de culturas utilizada ao longo dos anos foi aveia-preta ou trigo/soja e ervilhaca ou tremoço/milho. Mais informações a respeito deste solo podem ser encontradas nos trabalhos de Borkowski (2009); Gonçalves (2008) e Rodrigues et al. (2011).

3.2.2. Amostragem, preparo das amostras e análises laboratoriais

A amostragem do solo foi realizada pós-colheita do milho, nas entrelinhas da cultura. Durante a coleta tomou-se o devido cuidado em evitar áreas com sinais de tráfego recente das máquinas utilizadas na colheita e manejo fitossanitário.

Para as análises via μ TC foram utilizadas seis amostras de cada sistema de manejo, provenientes da camada superficial (0-0,15 m). Para a coleta, cilindros de acrílico de 0,15 m de altura e 0,064 m de diâmetro interno foram introduzidos manualmente no solo, com o auxílio de um martelo de nylon. Em seguida, as amostras foram secas em estufa a 40 °C até que suas massas se tornassem aproximadamente constantes (tempo médio de 30 dias). Uma balança semi-analítica (precisão de 0,01 g) foi utilizada nessas medidas. Este procedimento é importante para minimizar possíveis interferências de filmes de água na atenuação dos raios

X, a fim de se obter uma melhor diferenciação entre os tons de cinza correspondentes aos poros e à matriz do solo nas imagens de μ TC (CARDUCCI et al., 2014a).

A macroporosidade também foi determinada de maneira indireta a partir de resultados de retenção de água no solo, obtidos via mesa de tensão (BORKOWSKI, 2009). O equipamento utilizado é da marca Eijkelkamp (EIJKELKAMP, 2007) e pertence ao laboratório de Física Aplicada a Solos e Ciências Ambientais do Departamento de Física, UEPG. Para isso, outras seis amostras indeformadas foram coletadas de cada sistema de manejo, em anéis volumétricos de 0,05 m de altura e 0,05 m de diâmetro interno. Para a coleta foi utilizado um amostrador de Uhland. Foi aplicado um potencial mátrico de -50 cm H_2O , para drenar os macroporos de raio equivalente a $\approx 30 \mu m$ (Equação 3.1), uma vez que este corresponde ao raio do menor macroporo possível de ser identificado a partir das imagens de μ TC utilizadas neste estudo (ver Item 3.2.5) (KLUTE, 1986; LAL; SHUKLA, 2004):

$$r = \frac{1490}{h}, \quad (3.1)$$

em que r (μm) é o raio de poro equivalente e h (cm H_2O) é a tensão aplicada.

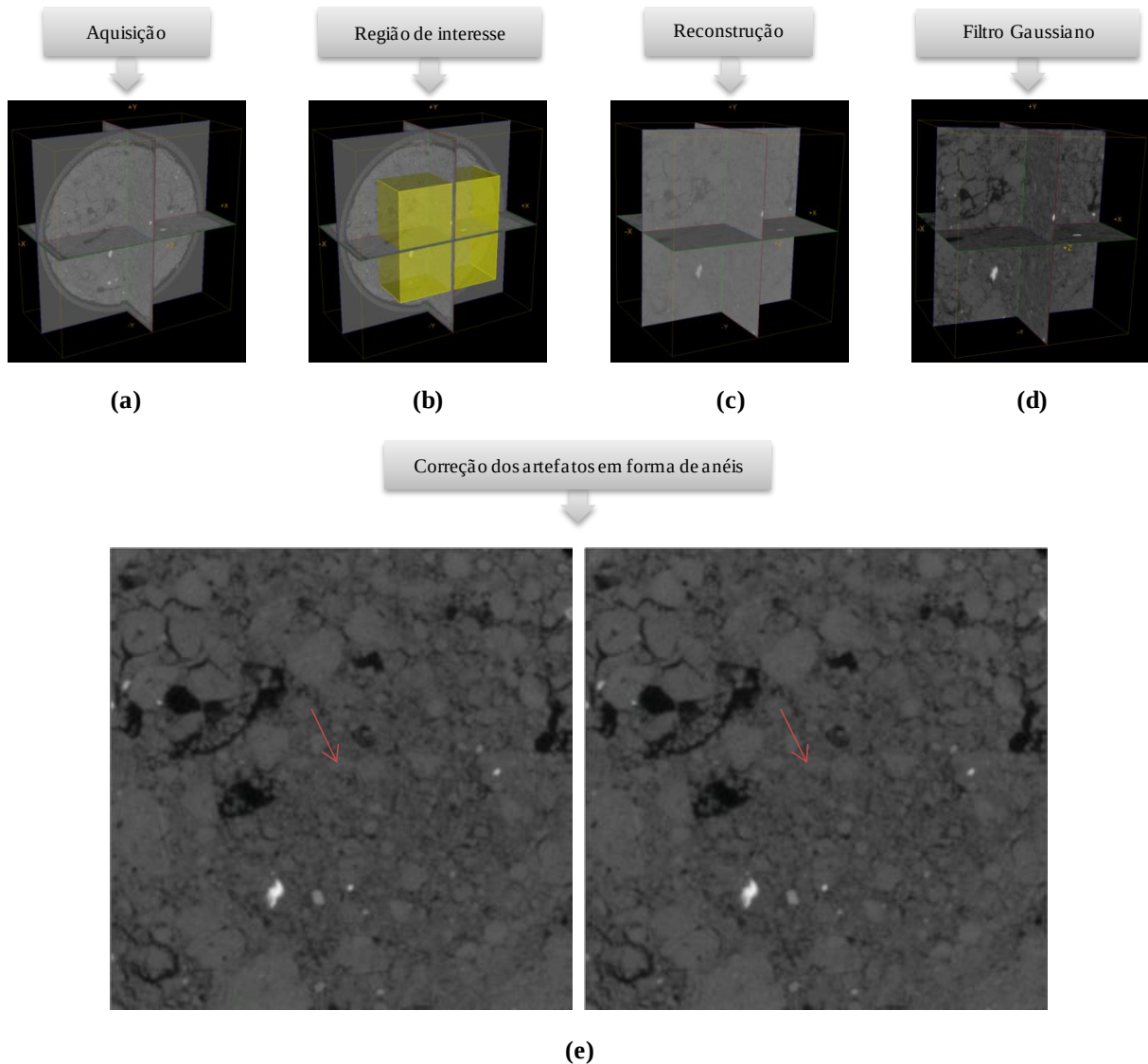
3.2.3. Aquisição e pré-processamento das imagens

Um microtomógrafo de raios X “MS8x-130 μ CT scanner” de segunda geração (EVS Corp., Toronto, ON), com placa de detectores de geometria bidimensional e fonte com feixe de raios X cônico fixos (movimento de rotação e translação da amostra), foi utilizado para obtenção das imagens. A voltagem aplicada foi de 120 kV com corrente de 155 μA . Um filtro de cobre foi utilizado na saída do feixe para a atenuação dos fótons de raios X de baixas frequências.

O escaneamento foi realizado na região central das amostras (camada de 0,05 a 0,10 m), com resolução espacial de 20 μm . O volume de imagem obtido inicialmente para cada amostra foi de $70 \times 70 \times 37 \text{ mm}^3$ (Figura 3.1a). A partir destas imagens, utilizando o programa *GEHC MicroView* (GE HEALTHCARE, 2006), a região de interesse (do inglês: *region of interest*, ROI) foi selecionada para reconstrução na resolução espacial de 60 μm (Figura 3.1b). A seleção desta região foi realizada de forma a evitar as bordas das imagens, as quais podem apresentar artefatos. O volume reconstruído é constituído por $650 \times 650 \times 550 \text{ voxels}$, o qual corresponde a $39 \times 39 \times 33 \text{ mm}^3$. Um conjunto de dados de aproximadamente 232 milhões de

voxels foi obtido para cada amostra analisada. A reconstrução das imagens foi feita pelo método de retroprojeção filtrada (KAK; SLANEY, 1999), usando a interface de reconstrução do tomógrafo (Figura 3.1c) (GE HEALTHCARE, 2005).

Figura 3.1: Imagens ilustrativas das etapas de aquisição (a), reconstrução (b,c) e tratamento (d,e) das imagens.



Fonte: A autora.

O processo de filtragem e segmentação das imagens foi realizado de acordo com o protocolo adotado pelo grupo de pesquisa do Laboratório de Imagem de Solo da Universidade de Guelph, Canadá, grupo ao qual também pertence o tomógrafo utilizado. Após reconstrução, um filtro gaussiano, disponível no programa *GEHC MicroView* (GE HEALTHCARE, 2006), foi aplicado para reduzir o ruído das imagens (Figura 3.1d). As imagens 3D foram então convertidas em uma sequência de imagens 2D utilizando *plugins*

específicos do programa *ImageJ* (RASBAND, 2007). A partir dos volumes reconstruídos foi gerado um conjunto de imagens com 550 fatias para cada amostra. Em seguida, o *plugin Ring Artifacts Mean Polar Kernel* foi aplicado para reduzir os artefatos em forma de anéis gerados durante o processo de aquisição das imagens (Figura 3.1e) (HECK, 2009; PASSONI et al., 2015).

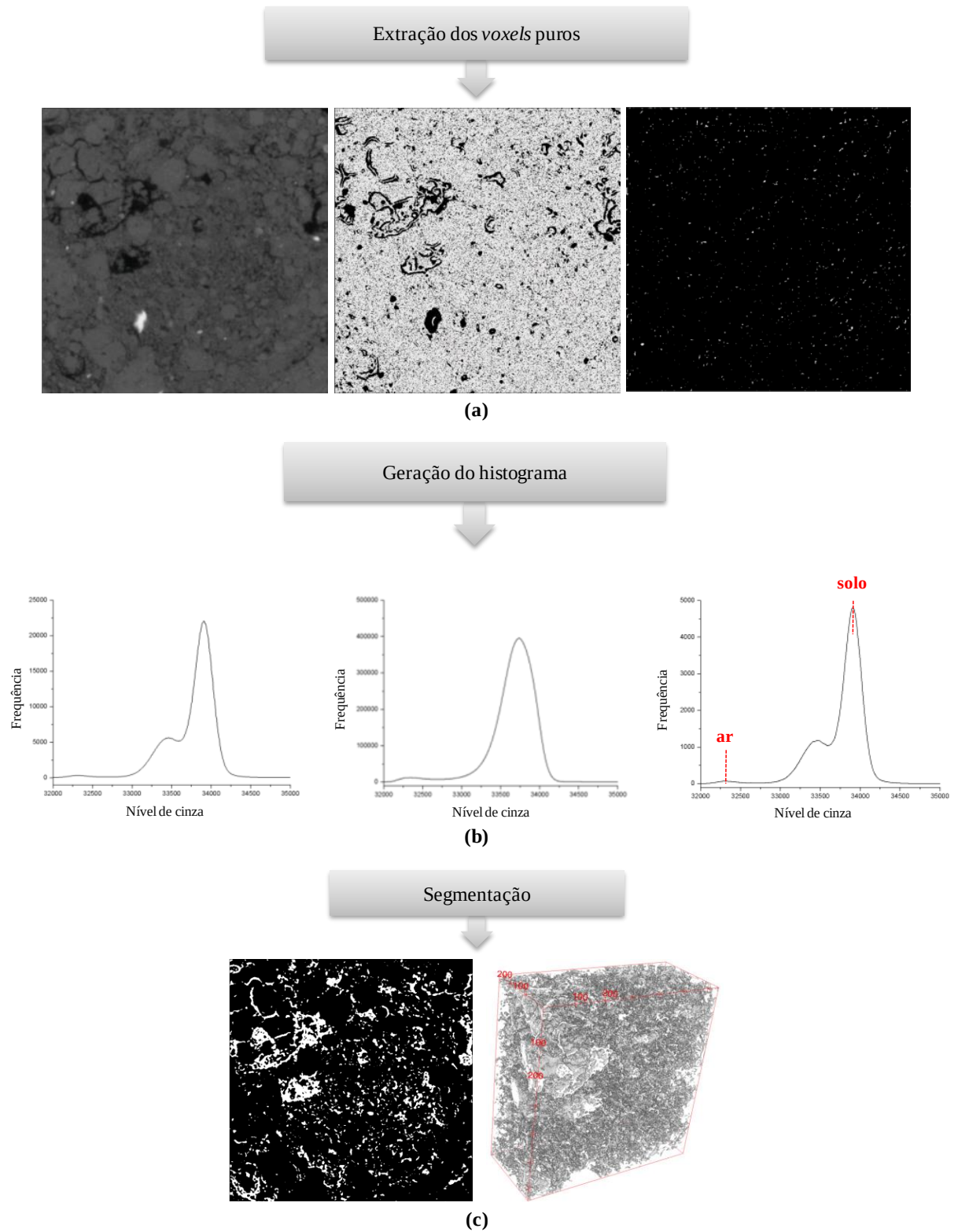
O processo de segmentação foi realizado com base nos histogramas de escala de cinza característicos de cada imagem (SCHLÜTER; WELLER; VOGEL, 2010). Com a finalidade de eliminar os *voxels* mistos, que podem causar o alargamento dos picos do histograma, os *voxels* relativamente puros (que apresentam baixa variância em relação aos seus vizinhos) foram selecionados por meio do *plugin Pure voxel extraction* (Figura 3.2a) (ELLIOT; HECK, 2007; JEFFERIES et al., 2014).

O programa *OriginPro* (ORIGINLAB CORPORATION, 2006) foi utilizado na identificação e caracterização dos picos referentes aos poros e a matriz do solo (Figura 3.2b). Valores de Centro Máximo (CM) e Variância (σ^2), referentes aos picos do ar e da matriz do solo, foram utilizados no processo de segmentação. Devido ao pico do solo ser bem definido, *voxels* com tons de cinza igual ou superior a $-4 \times$ desvio padrão do CM foram considerados como correspondentes à matriz do solo. Para o pico do ar foi utilizado o próprio valor de CM. Os valores intermediários foram classificados automaticamente pelo programa (SCHLÜTER; WELLER; VOGEL, 2010). Ao fim desse procedimento foi gerada uma sequência de imagens segmentadas 2D, nas quais os *pixels* de cor branca correspondem aos poros e àqueles de cor preta, à matriz do solo (Figura 3.2c).

A precisão e a sensibilidade desta etapa do procedimento são cruciais, uma vez que devido ao grande número de tons de cinza presentes nas imagens (16 bits), pequenas alterações nos parâmetros de segmentação podem sub ou superestimar o número e o volume de poros, bem como mascarar ou criar conexões inexistentes entre eles (TARQUIS et al., 2009).

Mais detalhes quanto aos processos de aquisição e pré-processamento realizados nas imagens de solo podem ser encontrados em Elliot e Heck (2007), Heck (2009), Jefferies et al. (2014) e Tarquis et al. (2009).

Figura 3.2: Principais procedimentos realizados na etapa de segmentação dos conjuntos de imagens 3D.



Fonte: A autora.

3.2.4. Processamento: classificação dos poros e análises micromorfológicas

Em imagens 3D segmentadas, os poros são definidos como aglomerados de *voxels* correspondentes ao espaço poroso, limitados pelas fronteiras com a matriz do solo (Figura 3.3). Assim, para a caracterização 3D dos poros das imagens analisadas foram obtidas informações como número, volume, localização (coordenadas x,y,z), área de superfície e eixos principais (maior, intermediário e menor) de cada poro. O *plugin* utilizado, implementado no programa *ImageJ*, atribui uma identificação numérica para cada poro (valores de 1 até 65.536), gerando uma imagem de 16 bits (HECK, 2009; JEFFERIES et al., 2014; RASBAND, 2007).

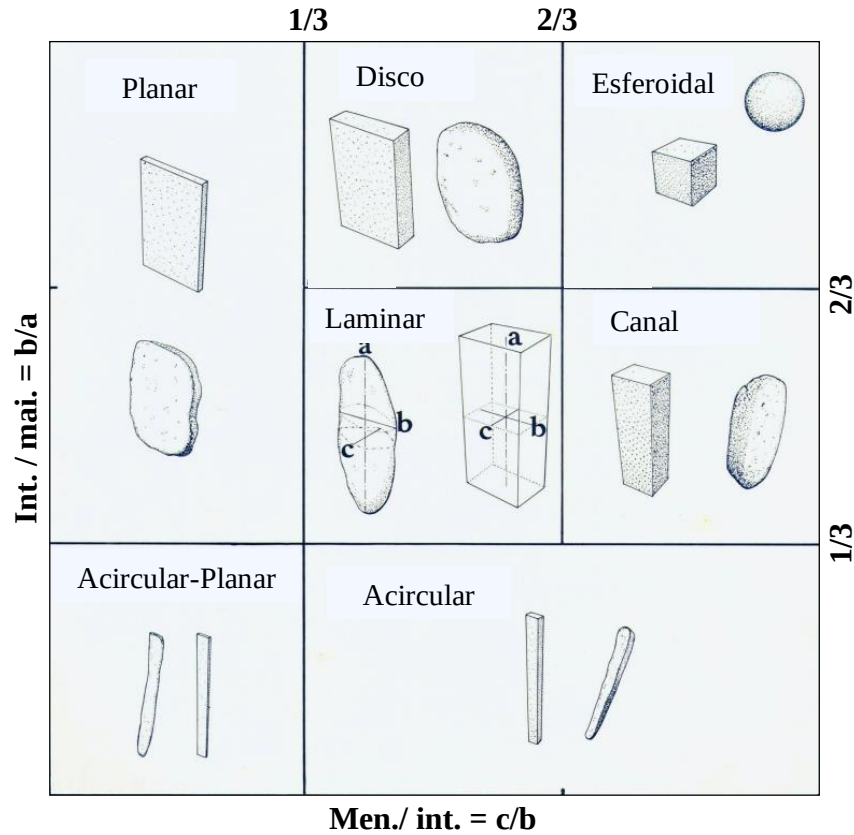
Figura 3.3: Exemplo de configuração de três macroporos detectados a partir de imagens de μ TC. Cada aglomerado de *voxels* consecutivos, referentes ao espaço poroso do solo, é identificado como um macroporo independente.



Fonte: A autora.

Os poros para os quais foi possível determinar os três eixos foram classificados de acordo com a proposta feita primeiramente por Zingg, em 1935, e modificada por Brewer, em 1964. A terminologia adotada foi a sugerida por Bullock et al. (1985). Para isso, foram calculadas as razões entre os eixos intermediário e maior (int./mai.) e menor e intermediário (men./int.), para classificar os poros como tendo formato Esferoidal (Es.), Canal (Ca.), Discóide (Di.), Laminar (La.), Planar (Pl.), Acircular (Ac.) e Acircular-Planar (AP) (Figura 3.4). Os poros para os quais não foi possível determinar ao menos um dos eixos não foram classificados (denominados poros NC).

Figura 3.4: Formato de um objeto a partir de seus eixos principais: maior (mai.), menor (men.) e intermediário (int.) (BULLOCK et al., 1985).



Fonte: Adaptado de Bullock et al. (1985).

3.2.5. Análise dos dados

A conversão de unidades de um volume V qualquer em *voxels* na imagem de microtomografia, em uma determinada resolução espacial (δr), é dada por:

$$V = N_{voxels} (\delta r)^3, \quad (3.2)$$

em que N_{voxels} corresponde ao número de *voxels* de V .

Nesse estudo, devido à resolução de reconstrução das imagens de μ TC (60 μ m), apenas poros com raio maior ou igual a 30 μ m foram detectados e analisados, os quais fazem parte da macroporosidade (MAP) do solo (EMBRAPA, 1997):

$$MAP(\%) = \frac{V_p}{V_t} 100, \quad (3.3)$$

onde V_p é o volume de *voxels* correspondentes ao espaço poroso e V_t é o volume total da amostra, dado pela soma do volume de todos os *voxels* da imagem.

O número de macroporos ($NMAP$) foi calculado para cada amostra, bem como seus valores médios ($\overline{NMAP}$). O $NMAP$ corresponde aos macroporos não conexos contidos no volume de imagem analisado (Figura 3.3). Os macroporos foram também classificados em

diferentes intervalos de tamanho para a análise da distribuição da *MAP* e do *NMAP* para cada classe: 0-0,001; 0,001-0,01; 0,01-0,1; 0,1-1; 1-10; 10-100; 100-1000 e >1000 mm³.

As análises quanto à morfologia dos macroporos foram realizadas para aqueles com volume maior que 8 e menor que 15×10^4 voxels (JEFFERIES, 2014). Para poros ≤ 8 voxels, na maioria das vezes o programa não consegue determinar o valor dos eixos, devido ao arranjo dos voxels que o formam. Os poros $\geq 15 \times 10^4$ voxels apresentam várias ramificações, seu formato é totalmente irregular e, geralmente, se estendem de uma extremidade à outra da amostra.

As análises estatísticas foram realizadas com auxílio do programa *OriginPro* (ORIGINLAB CORPORATION, 2006). A pressuposição de normalidade dos resíduos foi verificada por meio do teste de Shapiro-Wilk (SHAPIRO; WILK, 1965). Atendida a pressuposição, aplicou-se aos dados a análise descritiva [média ($n=6$), desvio padrão (σ) e coeficiente de variação (CV)] e o teste t-Student ($p \leq 0,05$) para comparação de médias (MONTGOMERY et al., 2006). Foram comparados os resultados de *MAP* entre os métodos (μ TC e mesa de tensão) e entre os manejos. Para os dados de *NMAP* a comparação foi feita apenas entre os sistemas de manejos.

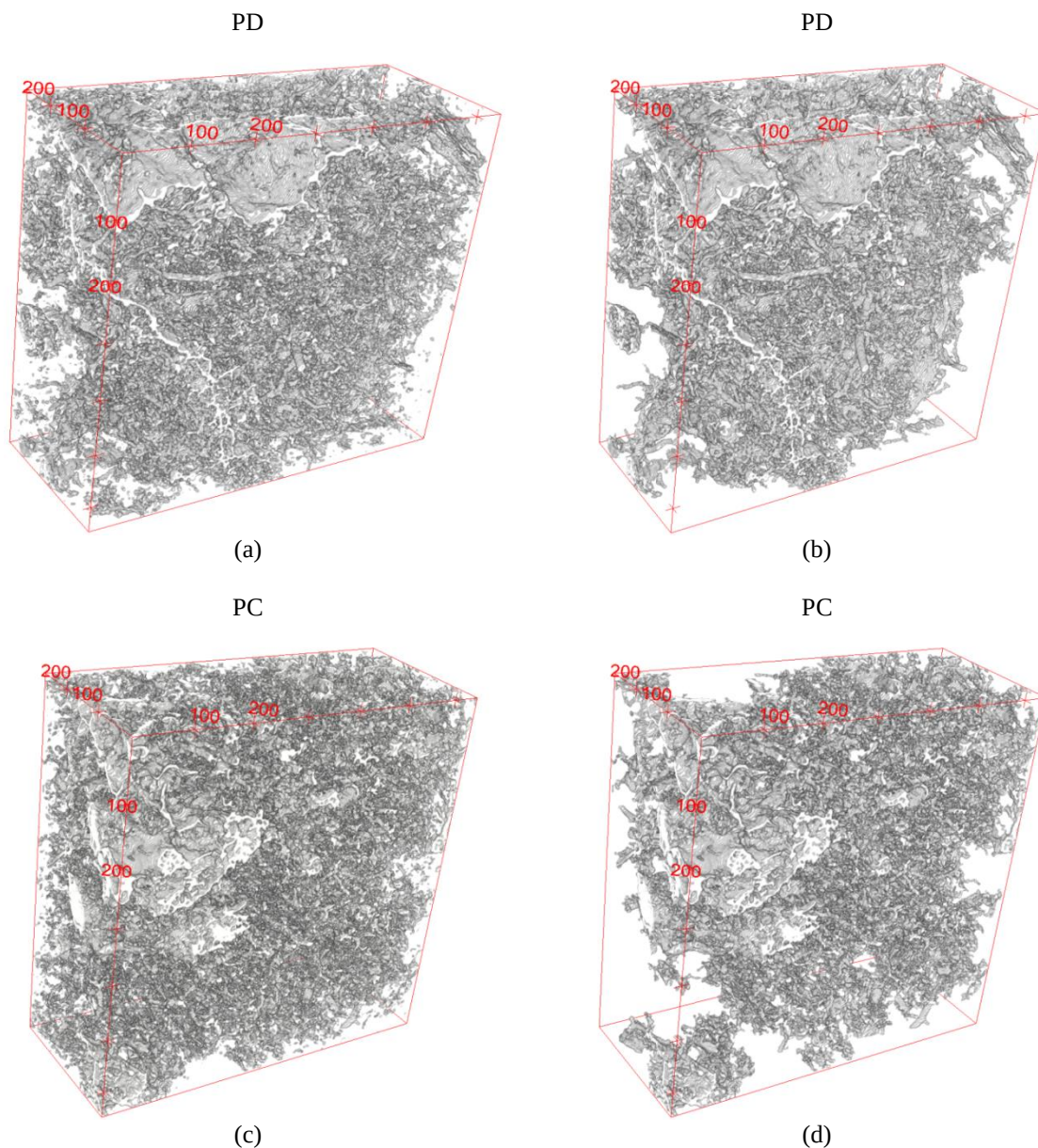
3.3. Resultados e discussão

3.3.1. Macroporosidade e número de macroporos

As imagens de μ TC revelaram um sistema macroporoso complexo que compõe a estrutura interna das amostras de solo analisadas, para ambos os sistemas de manejo (Figura 3.5). Todas as amostras apresentaram um grande macroporo predominante, com ramificações que percorrem o volume de amostra do topo à base, e em diferentes direções. Também foi detectado um grande número de macroporos menores e não interligados.

Tais configurações de macroporos foram previamente detectadas por Jefferies (2014); Passoni et al. (2015); Quinton et al. (2009) e Rezanezhad et al. (2009). Pode-se ressaltar a importância da presença desses macroporos bem ramificados no solo, principalmente no que se refere ao escoamento preferencial, uma vez que os poros menores e não interligados oferecem um caminho mais tortuoso e menor contribuição para o fluxo de solutos a baixos potenciais (REZANEZHAD et al., 2009).

Figura 3.5: Imagens de μ TC renderizadas mostrando o emaranhado de todos os macroporos (a,c) e apenas do macroporo predominante (b,d) da fatia central até o topo de uma amostra (275 fatias) sob sistema de manejo de Plantio Direto (PD) e Plantio Convencional (PC), na resolução espacial de 60 μ m. Os tons de cinza representam os macroporos em diferentes profundidades dentro do volume de imagem. Os valores em vermelho indicam a escala das imagens em termos do número de voxels.



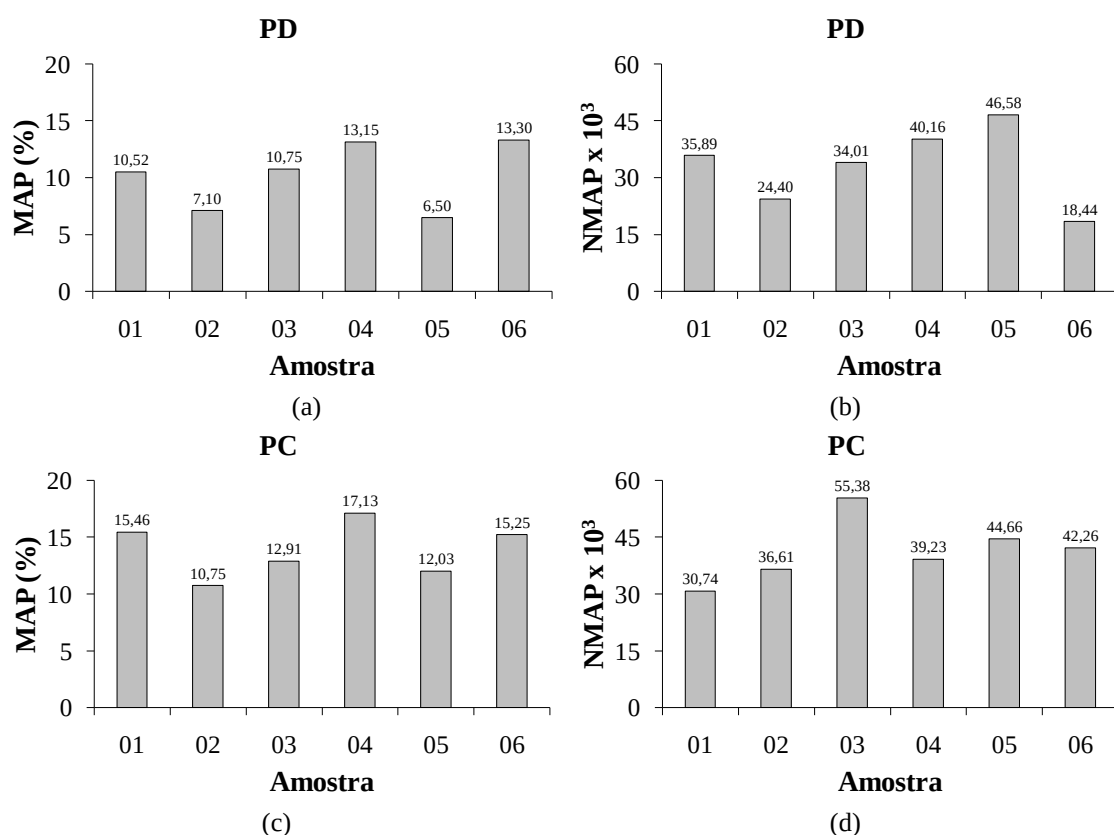
Fonte: A autora.

Na Figura 3.6 são apresentados os resultados de *MAP* e *NMAP* para as amostras de PD (Figura 3.6a,b) e PC (Figura 3.6c,d). Para o PD, o menor valor de *MAP* observado foi de 6,50% (Am 05) e o máximo foi de 13,30% (Am 06) (Figura 3.6a). No que se refere ao *NMAP* (Figura 3.6b), as amostras 06 e 05 foram as que apresentaram o valor menor ($18,44 \times 10^3$) e o maior ($46,58 \times 10^3$), respectivamente. A partir desses dados pode-se observar que a Am 05 foi a amostra que apresentou a menor *MAP* e o maior *NMAP*. Este resultado indica que esta

amostra apresenta o maior número de macroporos não interligados, porém, a totalidade do volume dos mesmos é inferior à das demais amostras. A Am 06 apresentou comportamento inverso, ou seja, maior volume de macroporos interligados, o que causou redução na contagem do *NMAP*. As demais amostras apresentaram comportamento regular, com maiores valores de *MAP* para maiores *NMAP* e vice-versa.

Para o PC, o valor mínimo de *MAP* observado entre as amostras foi de 10,75% (Am 02) e o máximo foi de 17,13% (Am 04) (Figura 3.6c). Essas duas amostras apresentaram valores intermediários de *NMAP*. As amostras 01 e 03 foram as que apresentaram os valores mínimo ($30,73 \times 10^3$) e máximo ($55,38 \times 10^3$) de *NMAP* para este sistema de manejo (Figura 3.6d). Com isso, pode-se verificar que os resultados de *MAP* e *NMAP* obtidos a partir da análise de imagens 3D de μ TC, para as amostras de PC e PD, não indicaram padrões de regularidade entre estes dois atributos, ou seja, o número de macroporos não tem relação direta com a macroporosidade das amostras (PIRES et al., 2008).

Figura 3.6: Macroporosidade (*MAP*) e número total de macroporos (*NMAP*) para as amostras sob os sistemas de manejo de Plantio Direto (PD) e Plantio Convencional (PC).

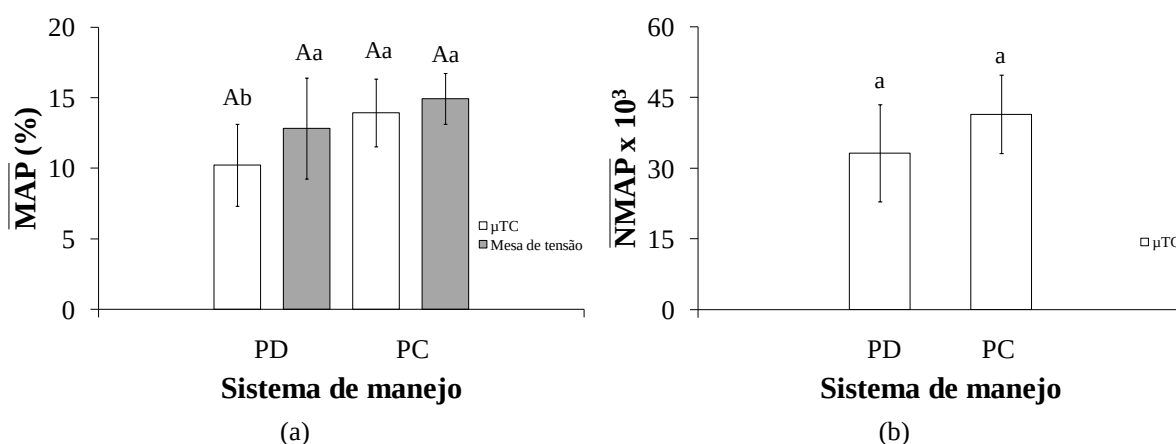


Fonte: A autora.

Na média, a *MAP* obtida para o sistema de manejo PD ($\overline{MAP}=10,22\%$) foi inferior à do PC ($\overline{MAP}=13,92\%$) (Figura 3.7a). Adicionalmente, os resultados de σ e CV indicaram uma

maior variabilidade entre as amostras de solo sob PD, quando comparadas às de PC (PD: $\sigma=2,9$; $CV=28,36\%$; PC: $\sigma=2,41$; $CV=17,32\%$). Similaridades foram observadas para os resultados de $\overline{NMAP}$ (Figura 3.7b). Enquanto o PD apresentou $\overline{NMAP}=33,25 \times 10^3$ ($\sigma=10,30 \times 10^3$; $CV=30,99\%$), para o PC foi obtido um valor de $\overline{NMAP}=41,48 \times 10^3$ ($\sigma=8,34 \times 10^3$; $CV=20,11\%$). Esta maior variabilidade para o PD era esperada, uma vez que o revolvimento do solo sob PC tende a homogeneizar o mesmo (MARCOLAN; ANGHINONI, 2006).

Figura 3.7: (a) Macroporosidade média ($\overline{MAP}$) e (b) número de macroporos médio ($\overline{NMAP}$) para os sistemas de manejo de Plantio Direto (PD) e Plantio Convencional (PC). A $\overline{MAP}$ para o raio de poro equivalente de 30 μm foi determinada via μTC e mesa de tensão, enquanto o $\overline{NMAP}$ foi determinado apenas via μTC .



Fonte: A autora.

Nota: Médias seguidas de mesma letra maiúscula e minúscula não apresentam diferença significativa entre técnicas (μTC e mesa de tensão) e sistemas de manejo (PD e PC), pelo teste t-Student ($p \leq 0,05$).

Apesar do PD ter apresentado $\overline{MAP}$ e $\overline{NMAP}$ inferiores aos observados para o PC, foi constatada uma diferença significativa entre manejos apenas para os resultados de $\overline{MAP}$ ($p \leq 0,05$).

Os resultados obtidos via mesa de tensão também indicaram uma maior $\overline{MAP}$ para o PC (PD: $\overline{MAP}=12,81\%$; $\sigma=3,59$; $CV=27,98\%$; PC: $\overline{MAP}=14,93\%$; $\sigma=1,8$; $CV=12,07\%$). Estes não apresentaram diferença significativa quando comparados aos obtidos via μTC para cada sistema de manejo. Tal concordância entre os métodos é importante para assegurar a qualidade das imagens, bem como das etapas de pré-processamento e processamento, uma vez que o método da mesa de tensão é tido como tradicional para medida indireta da macroporosidade do solo. No entanto, ao contrário da μTC que detectou diferença entre os manejos, os valores de $\overline{MAP}$ medidos utilizando a mesa de tensão não diferiram significativamente entre si ($p \leq 0,05$). Este resultado provavelmente está associado ao fato de

terem sido utilizadas amostras distintas para análise pelos dois métodos, bem como os processos de coleta não foram semelhantes (Item 3.2.2).

A influência dos diferentes sistemas de manejo no solo é foco de muitos estudos encontrados na literatura. Tal interesse se dá porque as alterações dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo têm implicação direta na produtividade das culturas (SILVA; SILVA; FERREIRA, 2005; VOS; KOOISTRA, 1994).

No que se refere à macroporosidade da camada superficial do solo sob PD e PC, objeto de estudo do presente trabalho, resultados semelhantes aos obtidos já foram previamente observados para este mesmo tipo de solo (BORKOWSKI, 2009; CARVALHO; FIGUEIREDO; COSTA, 1999; FERREIRA, 2008; RODRIGUES et al., 2011; SANTOS, 2008).

Ao analisar a permeabilidade ao ar para o mesmo solo do presente estudo, Rodrigues et al. (2011) também observaram maiores valores de *MAP* na camada de 0-0,10 m sob PC ($\overline{MAP}$ =24,7%), quando comparado ao PD ($\overline{MAP}$ =17,3%). No entanto, o PD apresentou o maior volume de poros pequenos, pois assegurou maior conteúdo de água no intervalo de potenciais mátricos avaliados (-2 a -100 kPa). Esse fato é importante, uma vez que garante a disponibilidade de água para as plantas (RODRIGUES et al., 2011).

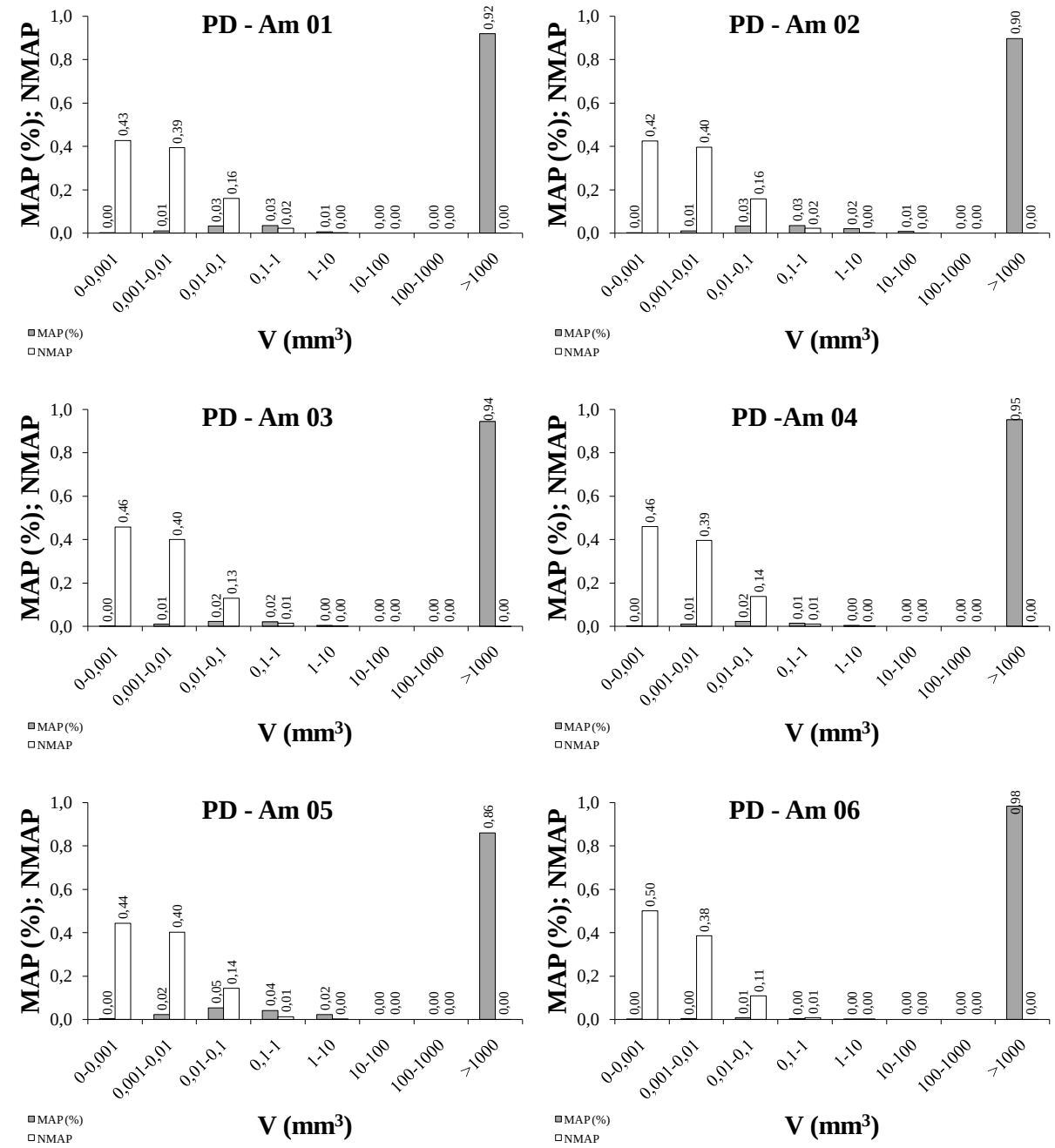
O processo de revolvimento do solo realizado para a prática do PC promove a quebra dos agregados, aumentando a sua macroporosidade. No entanto, este processo deixa o solo exposto, suscetível aos diversos processos climáticos (ar, sol, chuva, vento etc.). Um dos efeitos causados por esta exposição é a rápida degeneração dos atributos físicos da camada superficial, causada pela ação direta das gotas de chuva. Além disso, os frequentes ciclos de umedecimento e secamento podem gerar uma camada de encrostamento na superfície do solo (CARVALHO; FIGUEIREDO; COSTA, 1999; PAGLIAI; VIGNOZI; PELLEGRINI, 2004; PIRES et al., 2003).

Uma vez que no PD a superfície do solo é mantida protegida pelos restos de cultura, tais efeitos são evitados ou, ao menos, amenizados. No entanto, devido ao tráfego de implementos agrícolas, este causa uma maior compactação na camada superficial do solo. Trabalhos disponíveis na literatura relatam que a camada de maior impedimento ao crescimento radicular está localizada entre 0,08 e 0,15 m de profundidade, gerando o efeito denominado “pé-de-plantio direto” (REICHERT; SUZUKI; REINERT, 2007).

3.3.2. Distribuição da *MAP* e do *NMAP* por intervalo de volume de macroporo

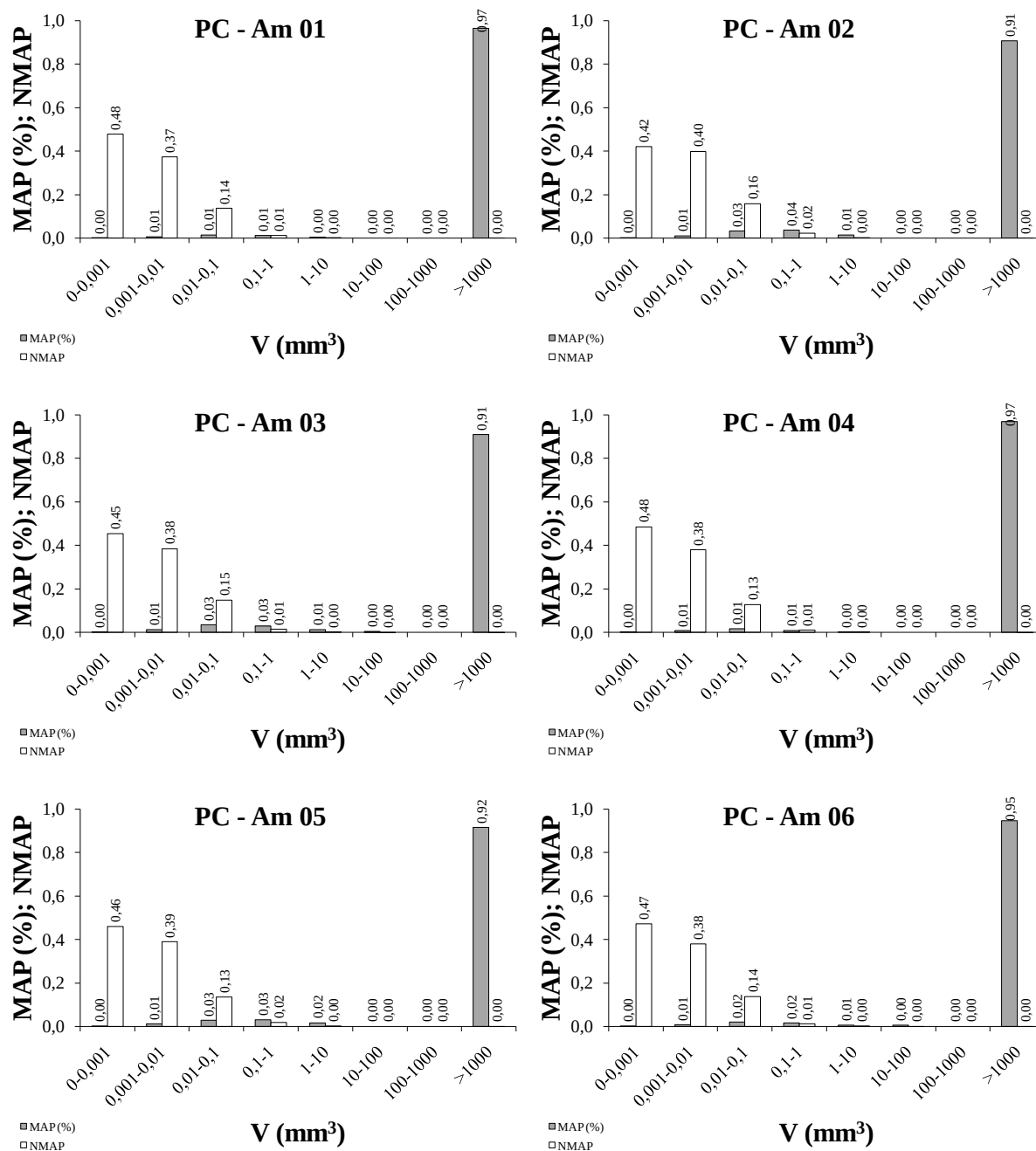
Os gráficos de distribuição da *MAP* e do *NMAP* por intervalo de volume de macroporo para as amostras de PD (Figura 3.8) mostram que, para as 6 amostras analisadas, 42-50% do *NMAP* apresentaram volume de 0-0,001 mm³; 38-40%, volume de 0,001-0,01 mm³ e 11-16%, volume de 0,01-0,1 mm³. Os demais intervalos de volume de macroporo apresentaram contribuição desprezível para o *NMAP*. Para o PC (Figura 3.9), a distribuição desses mesmos atributos, por intervalo de volume de macroporos, mostrou um comportamento similar: 42-48% do *NMAP* apresentaram volume de 0-0,001 mm³; 37-40%, volume de 0,001-0,01 mm³ e 13-16%, volume de 0,01-0,1 mm³. Esses resultados indicam que por mais que os resultados de *MAP* e *NMAP* tenham apresentado alta variabilidade (Figura 3.6), a distribuição destes atributos por volume de macroporos é similar entre amostras e entre os sistemas de manejo estudados (as barras de desvio padrão da Figura 3.10 confirmam a similaridade deste comportamento entre as amostras de um mesmo sistema de manejo).

Figura 3.8: Distribuição normalizada da macroporosidade (MAP) e do número de macroporos (NMAP) por intervalo de volume de macroporos para as amostras sob o sistema de manejo de plantio direto (PD).



Fonte: A autora.

Figura 3.9: Distribuição normalizada da macroporosidade (*MAP*) e do número de macroporos (*NMAP*) por intervalo de volume de macroporos para as amostras sob o sistema de manejo de plantio convencional (PC).

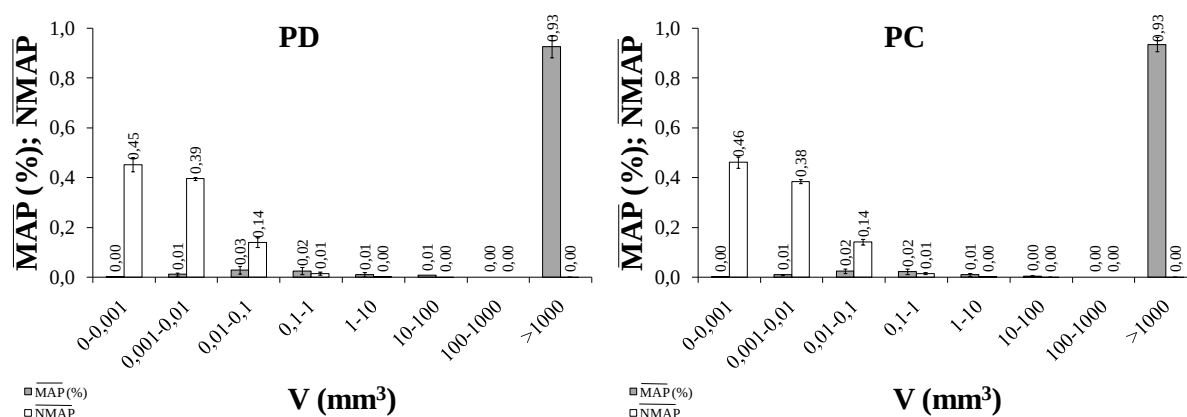


Fonte: A autora.

A *MAP* conectada das amostras de PD e PC variou de 86-98% (Figura 3.8) e de 91-97% (Figura 3.9), respectivamente. Essa é a contribuição para a *MAP* proveniente de um único macroporo com volume maior que 1000 mm³, o qual corresponde ao macroporo predominante citado no Item 3.3.1. Na média, tanto para o PD quanto para o PC, 93% da macroporosidade detectada via μ TC está conectada (Figura 3.10). Este fato é importante porque irá influenciar na condutividade hidráulica, aeração e desenvolvimento do sistema

radicular das plantas (HILLEL, 1998; JURY; HORTON, 2004). O restante da *MAP* (2-14% para o PD e 3-9% para o PC) se refere à contribuição dos macroporos com volume inferior a 1000 mm^3 . Estes macroporos, apesar de aparecerem em grande número, apresentam baixa contribuição para a *MAP* do volume total da amostra.

Figura 3.10: Distribuição normalizada da macroporosidade média ($\overline{MAP}$) e número de macroporos médio ($\overline{NMAP}$) por intervalo de volume de macroporos para os sistemas de manejo de Plantio Direto (PD) e Plantio Convencional (PC), obtidos a partir de imagens de μTC com volume total de $39 \times 39 \times 33 \text{ mm}^3$ e resolução espacial de $60 \mu\text{m}$.



Fonte: A autora.

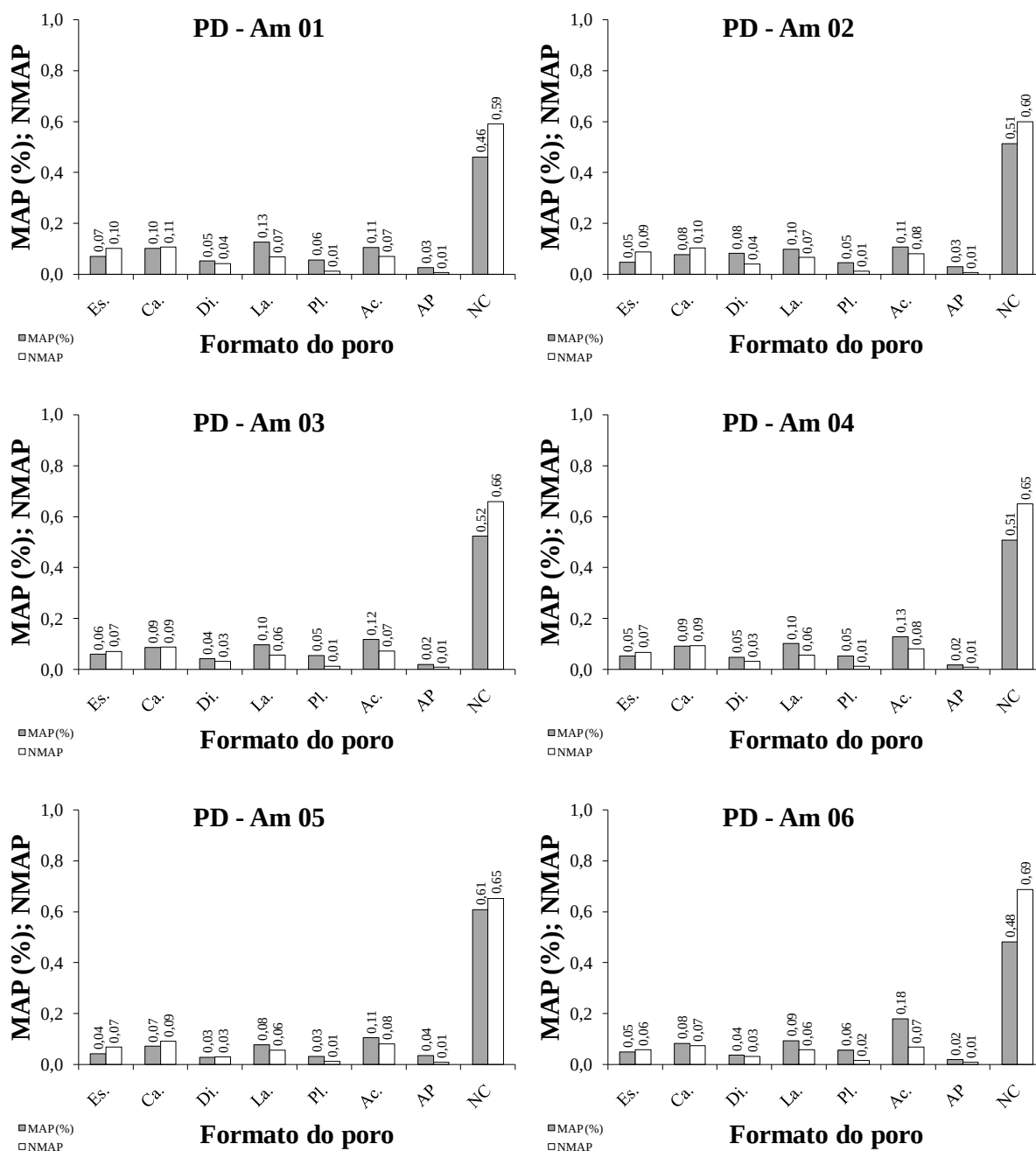
3.3.3. Distribuição da *MAP* e *NMAP* por formato de macroporo

Para os macroporos com volume de $0,002-32,4 \text{ mm}^3$, foi possível classificar quanto ao formato 31-41% do *NMAP* para os dois sistemas de manejo. Esta porcentagem do *NMAP* corresponde à *MAP* de 39-54% para o PD (Figura 3.11) e de 39-49% para o PC (Figura 3.12). A complexidade da forma dos macroporos, como por exemplo, os mostrados nas Figuras 3.3 e 3.5, justificam a alta contagem de macroporos não classificados. Esse fato está relacionado a características como tortuosidade e às ramificações de cada poro. O cálculo dos eixos do melhor elipsóide ajustado aos poros é realizado com base na distância entre *voxels*. Assim, dependendo de como esses *voxels* estão dispostos, muitas vezes o tamanho destes eixos não pode ser determinado pelos métodos computacionais utilizados.

Os formatos de macroporo encontrados em menor quantidade para todas as amostras de PD e PC foram do tipo Pl. e AP. (1-2% do *NMAP*). Os formatos de macroporo que apresentaram a maior contribuição ao *NMAP* para o PD foram Es. e Ca. (9-11%) para Am 01 e Am 02; Es., Ca. e Ac. (7-9%) para Am 03, 04 e 05; Ca. e Ac. (7%) para Am 06 (Figura

3.11). Para o PC, os resultados foram: Es. e Ca. (7-10%) para Am 02,03 e 04 e Es., Ca. e Ac. (7-9%) para Am 01, 05 e 06 (Figura 3.12).

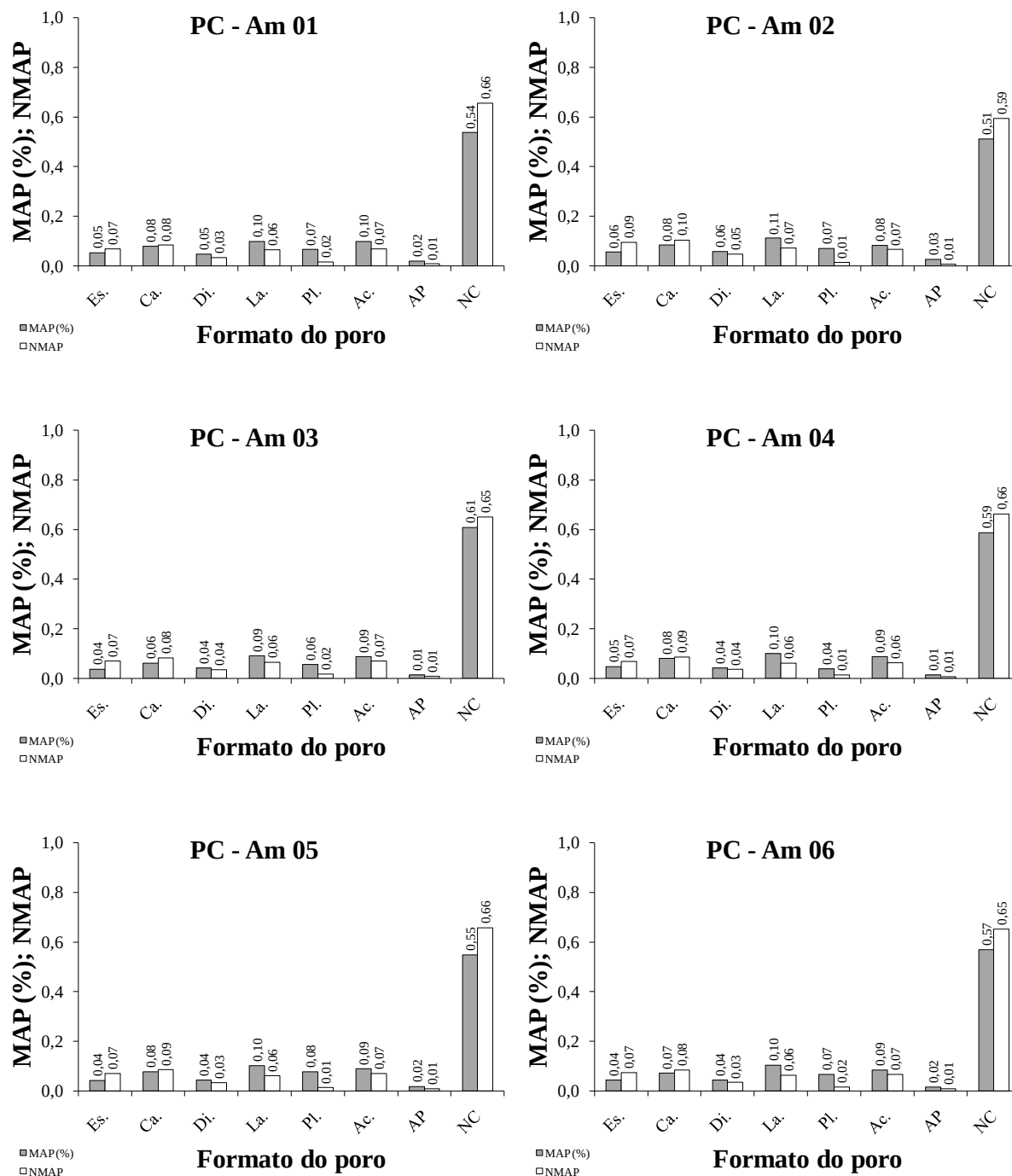
Figura 3.11: Distribuição normalizada da macroporosidade (*MAP*) e do número de macroporos (*NMAP*) por formato de macroporo para as amostras sob o sistema de manejo de plantio direto (PD).



Fonte: A autora.

Nota: Esferoidal (Es.), Canal (Ca.), Disco (Di.), Laminar (La.), Planar (Pl.), Acircular (Ac.), Acicular-Planar (Ap) e “Não Classificados” (NC).

Figura 3.12: Distribuição normalizada da macroporosidade (MAP) e do número de macroporos ($NMAP$) por formato de macroporo para as amostras sob o sistema de manejo de plantio convencional (PC).



Fonte: A autora.

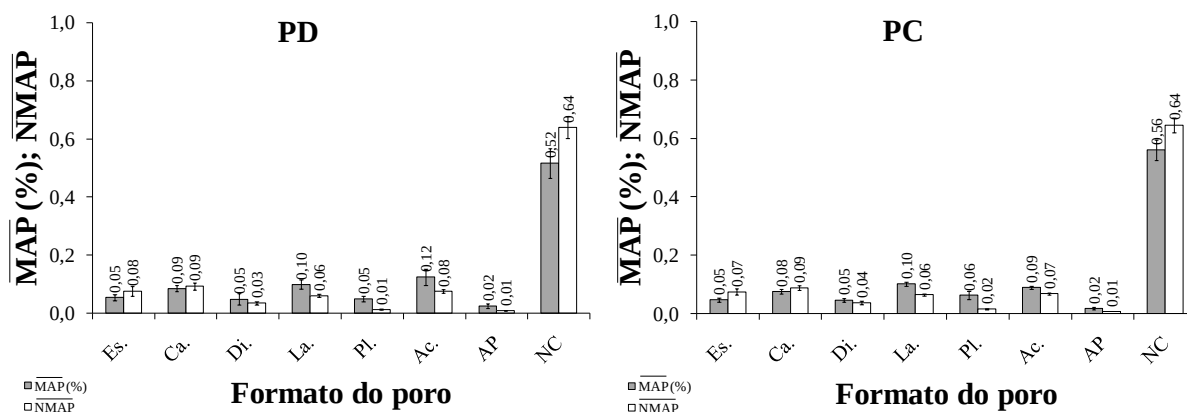
Nota: Esferoidal (Es.), Canal (Ca.), Disco (Di.), Laminar (La.), Planar (Pl.), Acircular (Ac.), Acicular-Planar (Ap.) e “Não Classificados” (NC).

Na Figura 3.13 são apresentadas as contribuições de $\overline{MAP}$ e $\overline{NMAP}$ em função do formato de macroporos, na qual 36% do $\overline{NMAP}$ foi classificado para ambos os sistemas de manejo. O formato de poros predominante foi o Ca. e as menores contribuições foram de Pl. e AP.

Carducci et al. (2014b) avaliaram a configuração espacial e micromorfológica do espaço poroso de um Latossolo Vermelho distrófico muito argiloso, tratado com gesso (Latossolo gipsítico), e outro Latossolo Vermelho Amarelo caulínítico (Latossolo caulínítico), em lavoura cafeeira. Utilizando imagens 3D de μ TC, o maior número e volume de macroporos foi encontrado para o Latossolo gipsítico. No entanto, altas porcentagens de poros do tipo Ac. e Ca. ocorreram ao longo do perfil de ambos os solos. Poros do tipo Es. também foram observados em alta porcentagem para o Latossolo gipsítico, e do tipo La. para o caulínítico.

A ocorrência das várias formas de poros está associada ao tipo de solo estudado, bem como aos tratamentos aos quais foi submetido. Em especial, a presença dos poros do tipo Ca. em alta quantidade pode ser um indicativo da qualidade do solo, uma vez que estes geralmente são associados à atividade biológica de organismos vivos do solo e de raízes (bioporos) (CARDUCCI et al., 2014b; GENRO JUNIOR; REINERT; REICHERT, 2004; LIMA et al., 2005).

Figura 3.13: Distribuição normalizada da macroporosidade média ($\overline{MAP}$) e do número de macroporos médio ($\overline{NMAP}$) por formato de macroporo para os sistemas de manejo de Plantio Direto (PD) e Plantio Convencional (PC), obtidos a partir de imagens de tomografia com volume de $39 \times 39 \times 33 \text{ mm}^3$ e resolução espacial de $60 \mu\text{m}$.



Fonte: A autora.

Nota: Esferoidal (Es.), Canal (Ca.), Disco (Di.), Laminar (La.), Planar (Pl.), Acircular (Ac.), Acicular-Planar (AP) e "Não Classificados" (NC).

Conclusões

As imagens de μ TC possibilitaram a visualização e a quantificação do sistema macroporoso do solo. Foi possível identificar e caracterizar um grande macroporo predominante em todas as amostras, com ramificações que se estendem pelo volume como um todo. Os resultados de $\overline{MAP}$ para os sistemas de manejo (PD e PC), obtidos via μ TC, não apresentaram diferença

significativa quando comparados aos obtidos pelo método tradicional da mesa de tensão ($p \leq 0,05$). Esse resultado evidencia a qualidade do processo de segmentação das imagens de microtomografia, o qual é importante na obtenção de resultados representativos de *MAP*. Os maiores valores de $\overline{MAP}$ e $\overline{NMAP}$ foram obtidos para o PC. No entanto, a distribuição de *MAP* e *NMAP* por volume e morfologia dos poros foi similar para ambos os manejos. Os poros do tipo Canal foram os mais abundantes, enquanto os do tipo Planar e Acircular-Planar foram detectados em menor quantidade.

Referências

- AULER, A. C. et al. Soil physico-hydrical properties resulting from the management in Integrated Production Systems. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, n. 5, p. 976–989, 2014.
- BECKERS, E. et al. X-ray microtomography: A porosity-based thresholding method to improve soil pore network characterization? **Geoderma**, v. 219-220, p. 145–154, maio 2014.
- BERALDO, J. M. G.; SCANNAVINO JUNIOR, F. DE A.; CRUVINEL, P. E. Application of x-ray computed tomography in the evaluation of soil porosity in soil management systems. **Engenharia Agrícola**, v. 34, n. 6, p. 1162–1174, dez. 2014.
- BERTOL, I. et al. Physical properties of an haplumbrepts as affected by soil management. **Ciência Rural**, v. 30, n. 1, p. 91–95, 2000.
- BETIOLI JÚNIOR, E. et al. Intervalo hídrico ótimo e grau de compactação de um latossolo vermelho após 30 anos sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 3, p. 971–982, jun. 2012.
- BORKOWSKI, A. K. **Análise de Curvas de Retenção e de Distribuição de Poros de um Latossolo Vermelho Distrófico Submetido aos Sistemas de Plantio Convencional e Direto**. Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2009.
- BRONICK, C. J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, v. 124, n. 1-2, p. 3–22, jan. 2005.
- BULLOCK, N. P. et al. **Handbook for soil thin section description**. 1. ed. England: Waine Research, 1985.
- CARDUCCI, C. E. et al. Spatial variability of pores in Oxidic Latosol under a conservation management system with different gypsum doses. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 38, n. 5, p. 445–460, 2014a.
- CARDUCCI, C. E. et al. Scaling of pores in 3D images of Latosols (Oxisols) with contrasting mineralogy under a conservation management system. **Soil Research**, v. 52, n. 3, p. 231, 1 abr. 2014b.

CARVALHO, E. J. M.; FIGUEIREDO, M. DE S.; COSTA, L. M. DA. Physico-hydric behavior of a Red Yellow Cambic Podzolic soil terrace phase under different management system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 2, p. 257–265, fev. 1999.

CÁSSARO, F. A. M. et al. Characterization of a Brazilian clayey soil submitted to conventional and no-tillage management practices using pore size distribution analysis. **Soil and Tillage Research**, v. 111, n. 2, p. 175–179, 2011.

CASTRO, S. S. et al. Micromorfologia do solo: Bases e aplicações. In: CURI, N. et al. (Eds.). **. Tópicos em ciência do solo III**. 1. ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. p. 107–164.

DAL FERRO, N. et al. Soil macro- and microstructure as affected by different tillage systems and their effects on maize root growth. **Soil and Tillage Research**, v. 140, p. 55–65, jul. 2014.

DAVEIGA, M. et al. Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems. **Soil and Tillage Research**, v. 92, n. 1-2, p. 104–113, jan. 2007.

DOWUONA, G. N. N.; TAINA, I. A.; HECK, R. J. Porosity Analysis of Two Acrisols by X-Ray Computed Microtomography. **Soil Science**, v. 174, n. 11, p. 583–593, nov. 2009.

EIJKELKAMP. **Sandbox: Operating Instructions**, 2007.

ELLIOT, T. R.; HECK, R. J. A comparison of 2D vs. 3D thresholding of X-ray CT imagery. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 87, n. 4, p. 405–412, 18 ago. 2007.

EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA - CNPS, 1997.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 3. ed. Brasília: EMBRAPA, 2013.

FERREIRA, S. T. **Avaliação da relação entre a condutividade hidráulica do solo saturado com parâmetros físicos de um latossolo vermelho distrófico submetido a dois diferentes manejos**. Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2008.

FERRERAS, L. . et al. Effect of no-tillage on some soil physical properties of a structural degraded Petrocalcic Paleudoll of the southern “Pampa” of Argentina. **Soil and Tillage Research**, v. 54, n. 1-2, p. 31–39, mar. 2000.

GE HEALTHCARE. **GE Healthcare eXplore Locus User Guide**, 2005.

GE HEALTHCARE. **GEHC MicroView**, 2006. Disponível em: <<http://gehc-microview.software.informer.com/>>

GENRO JUNIOR, S. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um latossolo argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 3, p. 477–484, jun. 2004.

GLĄB, T.; ŚCIGALSKA, B.; LABUZ, B. Effect of crop rotations with triticale ($\times$ Triticosecale Wittm.) on soil pore characteristics. **Geoderma**, v. 202-203, p. 1–7, jul. 2013.

GONÇALVES, D. **Caracterização mineralógica por difração de raios X e o Método de Rietveld da fração argila de um Latossolo Vermelho distrófico em três manejos diferentes**. Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2008.

HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**, v. 82, n. 2, p. 121–145, jun. 2005.

HECK, R. J. X-ray Computed Tomography of Soil. In: RIBEIRO, M. R. et al. (Eds.). **Tópicos em Ciência do Solo**. 6. ed. Viçosa: SBCS, 2009. p. 31–70.

HILLEL, D. **Environmental Soil Physics: Fundamentals, Applications, and Environmental Considerations**. London: Academic Press, 1998.

IAPAR. **Cartas climáticas do Paraná: classificação climática – segundo Köppen**. Londrina: IAPAR, 2009.

JEFFERIES, D. A. **X-ray Computed Micro-Tomography Indices of Soil Microstructure within a Tree-Based Intercropping System**. University of Guelph, 2014.

JEFFERIES, D. A. et al. Characterizing soil surface structure in a temperate tree-based intercropping system using X-ray computed tomography. **Agroforestry Systems**, v. 88, n. 4, p. 645–656, 10 maio 2014.

JURY, W. A.; HORTON, R. C. N. **Soil physics**. 6th. ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley, 2004.

KAK, A. C.; SLANEY, M. **Principles of Computerized Tomographic Imaging**. New York: IEEE Press, 1999.

KATUWAL, S. et al. Linking air and water transport in intact soils to macropore characteristics inferred from X-ray computed tomography. **Geoderma**, v. 237-238, p. 9–20, jan. 2015.

KLUTE, A. Water Retention: Laboratory Methods. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of Soil Analysis: Part 1—Physical and Mineralogical Methods**. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America Book Series, 1986. p. 635–662.

KOOISTRA, M. J. **The future of soil micromorphology** (L. A. Douglas, Ed.) Soil micromorphology: a basic and applied science. **Anais...** San Antonio: Elsevier Science Publishers B.V., 1990.

LAL, R.; SHUKLA, M. K. **Principles of Soil Physics**. New York: CRC Press, 2004.

LIMA, H. V. DE et al. Tráfego de máquinas agrícolas e alterações de bioporos em área sob pomar de laranja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 5, p. 677–684, out. 2005.

MARCOLAN, A. L.; ANGHINONI, I. Atributos físicos de um Argissolo e rendimento de

culturas em função do revolvimento do solo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 1, p. 163–170, 2006.

MONTGOMERY, D. C. et al. **Probabilidade e estatística na engenharia**. 4. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2006.

MUNKHOLM, L. J.; HECK, R. J.; DEEN, B. Long-term rotation and tillage effects on soil structure and crop yield. **Soil and Tillage Research**, v. 127, p. 85–91, mar. 2013.

ORIGINLAB CORPORATION. **OriginPro**Northampton, MA, 2006.

PAGENKEMPER, S. K. et al. Effects of Root-Induced Biopores on Pore Space Architecture Investigated with Industrial X-Ray Computed Tomography. In: ANDERSON, S. H.; HOPMANS, J. W. (Eds.). . **Soil–Water–Root Processes: Advances in Tomography and Imaging**. SSSA Special Publication. Madison: Soil Science Society of America, 2013. p. 69–96.

PAGLIAI, M.; VIGNOZI, N.; PELLEGRINI, S. Soil structure and the effect of management practices. **Soil and Tillage Research**, v. 79, p. 131–143, 2004.

PASSONI, S. et al. Three dimensional characterization of soil macroporosity by X-ray microtomography. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 448–457, 2015.

PEDROTTI, A.; JUNIOR, A. V. M. **Avanços em Ciência do solo: a física do solo na produção agrícola e qualidade ambiental**. 1. ed. São Cristóvão: UFS, FAPITEC-SE, 2009.

PIRES, L. F. et al. Gamma-ray-computed tomography to investigate compaction on sewage-sludge-treated soil. **Applied Radiation and Isotopes**, v. 59, n. 1, p. 17–25, 2003.

PIRES, L. F. et al. Micromorphological analysis to characterize structure modifications of soil samples submitted to wetting and drying cycles. **Catena**, v. 72, p. 297–304, 2008.

PIRES, L. F. et al. Twenty-five years of computed tomography in soil physics: A literature review of the Brazilian contribution. **Soil and Tillage Research**, v. 110, n. 2, p. 197–210, 2010.

PIRES, L. F. et al. Soil Pore Characterization Using Free Software and a Portable Optical Microscope. **Pedosphere**, v. 23, n. 4, p. 503–510, 2013.

QUINTON, W. L. et al. Measuring physical and hydraulic properties of peat from X-ray tomography. **Geoderma**, v. 153, n. 1-2, p. 269–277, out. 2009.

RAB, M. A. et al. Evaluation of X-ray computed tomography for quantifying macroporosity of loamy pasture soils. **Geoderma**, v. 213, p. 460–470, 2014.

RASBAND, W. **ImageJ**BethesdaU.S. National Institutes of Health, , 2007. Disponível em: <<http://rsb.info.nih.gov/ij/index.html>>

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; REICHERT, J. M. (Eds.). . **Tópicos em ciência do solo**. 5. ed. Viçosa:

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 49–134.

REZANEZHAD, F. et al. Examining the effect of pore size distribution and shape on flow through unsaturated peat using computed tomography. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 13, n. 10, p. 1993–2002, 28 out. 2009.

RODRIGUES, S. et al. Permeabilidade ao ar em Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira De Ciencia Do Soloo Solo**, v. 35, n. 1, p. 105–114, 2011.

SANTOS, R. DOS. **Propriedades de retenção e condução de água em solos, sob condições de campo e em forma de agregados, submetidos aos plantios convencional e direto**. Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2008.

SCHLÜTER, S.; WELLER, U.; VOGEL, H.-J. Segmentation of X-ray microtomography images of soil using gradient masks. **Computers & Geosciences**, v. 36, n. 10, p. 1246–1251, out. 2010.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples). **Biometrika**, v. 52, n. 3/4, p. 591–611, 1965.

SILVA, R. R. DA; SILVA, M. L. N.; FERREIRA, M. M. Physical properties as indicators of soil quality on different management systems at the alto Rio Grande, state of Minas Gerais, Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 29, n. 4, p. 719–730, ago. 2005.

STEFANIUK, D.; TANKIEWICZ, M.; STRÓŻYK, J. X-Ray Microtomography (μ CT) as a Useful Tool for Visualization and Interpretation of Shear Strength Test Results. **Studia Geotechnica et Mechanica**, v. 36, n. 4, p. 47–55, 28 jan. 2015.

TAINA, I. A. et al. Micromorphological and X-ray μ CT study of Orthic Humic Gleysols under different management conditions. **Geoderma**, v. 158, n. 3-4, p. 110–119, set. 2010.

TARQUIS, A. M. et al. Pore network complexity and thresholding of 3D soil images. **Ecological Complexity**, v. 6, n. 3, p. 230–239, set. 2009.

TORMENA, C. A. et al. Influence of different tillage systems in physical properties of a dystrophic Red Latosol. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 8, n. 1, p. 65–71, abr. 2004.

VEPRASKAS, M. J.; WILSON, M. A. Soil Micromorphology: Concepts, Techniques, and Applications. In: ULERY, A. L.; DREES, L. R. (Eds.). . **Methods of Soil Analysis: Mineralogical methods. Part 5**. Madison: Soil Science Society of America, 2008. p. 191–226.

VOS, E. C.; KOOISTRA, M. J. The effect of soil structure differences in a silt loam soil under various farm management systems on soil physical properties and simulated land qualities. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 51, n. 1-2, p. 227–238, nov. 1994.

4. Volume elementar representativo de atributos micromorfológicos do solo via microtomografia de raios X: Parte 1. Macroporosidade e número de macroporos

Resumo

Os estudos sobre o tamanho de amostra necessário para medidas representativas de atributos físicos do solo são importantes, uma vez que, por se tratar de um meio poroso complexo, tais atributos apresentam dependência com o tamanho da amostra. Neste trabalho, imagens de microtomografia de raios X foram utilizadas em estudos do volume elementar representativo (*VER*) da macroporosidade (*MAP*) e do número de macroporos (*NMAP*) de amostras de um Latossolo Vermelho, submetido aos sistemas de manejo de plantio direto (PD) e plantio convencional (PC). Foram estudadas imagens de seis amostras de cada manejo, com resolução espacial de 60 μm ($V \approx 50.193 \text{ mm}^3$). Para as análises de *VER* foram selecionados dez subvolumes de forma centralizada - em posições concêntricas a partir do centro da amostra - e aleatória (com 3 repetições), variando de $\approx 0,40$ a $\approx 36.591 \text{ mm}^3$. A análise 3D dos macroporos do solo foi executada utilizando o programa *ImageJ*. A partir dos resultados de *MAP* e *NMAP*, os seguintes critérios foram adotados para a definição do *VER*: (i) diferença relativa entre o valor do atributo medido em um determinado subvolume e o obtido para o volume total da amostra (referência) não superior a 10%; (ii) que pelo menos três subvolumes consecutivos não apresentem diferença entre si nos valores de *MAP* ou *NMAP*, utilizando o critério de variação do Item (i). Os resultados obtidos indicaram uma maior variabilidade na *MAP* e *NMAP* para os menores subvolumes, sendo que a forma aleatória de seleção resultou nas maiores flutuações. Para o PD, 67 e 50% das amostras atingiram o *VER* para a *MAP* até o volume de $\approx 10.841 \text{ mm}^3$ e de $\approx 17.216 \text{ mm}^3$ para as formas de seleção centralizada e aleatória, respectivamente. Para o PC, 67% das amostras atingiram o *VER* para ambas as formas de seleção até o volume $\approx 17.216 \text{ mm}^3$. Assim, é possível utilizar amostras com tamanho igual ou superior a $\approx 17.216 \text{ mm}^3$, para que sejam obtidas medidas representativas da *MAP* para o PD e PC. Quanto ao *NMAP*, este apresentou uma relação linear com o aumento do volume de amostra, não havendo indício de estabilização. No entanto, análises mostraram que para a razão entre *NMAP* e o volume de amostra (*NMAP* específico, $NMAP_e$) é possível a identificação de um *VER*. Para ambos os sistemas de manejo aqui estudados, assim como para medidas da *MAP*, amostras com tamanho igual ou superior a $\approx 17.216 \text{ mm}^3$ fornecem medidas representativas deste atributo físico.

Representative elementary volume of soil micromorphological attributes via X-ray microtomography: Part 1. macroporosity and number of macropores

Abstract

Studies regarding the sample size necessary for representative measurements of soil attributes are important since, in the case of this complex porous system, such attributes depend on the sample size. In this investigation, microtomographic images were used in studies of representative elementary volume (*REV*) for macroporosity (*MAP*) and number of macropores (*NMAP*) of samples from a Rhodic Ferralsol, under no-till (NT) and conventional till (CT) systems. Images of six samples from each management, at 60 μm spatial resolution ($V \approx 50,193 \text{ mm}^3$) were studied. For *REV* analyzes, ten subvolumes were selected centrally - in concentric positions starting at the center of the samples - and randomly (3 repetitions), ranging from ≈ 0.40 to $\approx 36,591 \text{ mm}^3$. The 3D analysis of soil macropores was performed using *ImageJ* software. From the results of *MAP* and *NMAP*, the following criteria were adopted to define the *REV*: (i) relative deviation between the measured property value in a particular subvolume and the obtained value for the total sample volume (reference) not exceeding 10%; (ii) that at least three consecutive subvolumes show no difference in *MAP* or *NMAP* values, using variation criterion of Item (i). The results presented higher variability in *MAP* and *NMAP* for smaller subvolumes and random selection method. For the NT, 67 and 50% of the samples reached the *REV* for *MAP* up to the volumes of $\approx 10,841 \text{ mm}^3$ and $\approx 17,216 \text{ mm}^3$ for centralized and random methods of subvolumes selection, respectively. For CT, 67% of the samples reached *REV* for both selection methods up to the volume of $\approx 17,216 \text{ mm}^3$. This makes it possible to use samples with sizes equal or greater than $\approx 17,216 \text{ mm}^3$ in order that representative measurements of *MAP* are obtained for NT and CT. Concerning *NMAP*, it showed a linear relationship with the increasing sample volume with no tendency of stabilization. However, analyzes have shown the possibility of the identification of *REV* for the ratio between *NMAP* and sample volume (here called specific *NMAP*, $NMAP_e$). For the management systems here studied, similar to *MAP* evaluations, samples with size $\geq \approx 17,216 \text{ mm}^3$ give representative measurements of this attribute.

4.1. Introdução

É de conhecimento dos físicos do solo que a microtomografia computadorizada (μ TC) é uma técnica eficaz para estudos da estrutura de meios porosos complexos. Os avanços na geometria dos equipamentos (gerações), no tratamento e processamento das imagens permitem que sejam obtidos resultados cada vez mais detalhados e representativos da estrutura do solo (HELLIWELL et al., 2013; PIRES et al., 2010).

A possibilidade de análise de diferentes atributos físicos do solo irá depender da resolução e também do tamanho (área ou volume) das imagens obtidas (HECK, 2009; RAB et al., 2014). Por se tratar de um meio poroso complexo, os atributos do solo apresentam dependência com o tamanho da amostra (HILLEL, 1998; JURY; HORTON, 2004). Nesse sentido, análises do tamanho representativo de amostras são uma iniciativa importante para a melhoria da definição de atributos que representem o solo nas áreas experimentais de estudo (BAVEYE et al., 2002; BORGES; PIRES; COSTA, 2014; VANDENBYGAART; PROTZ, 1999).

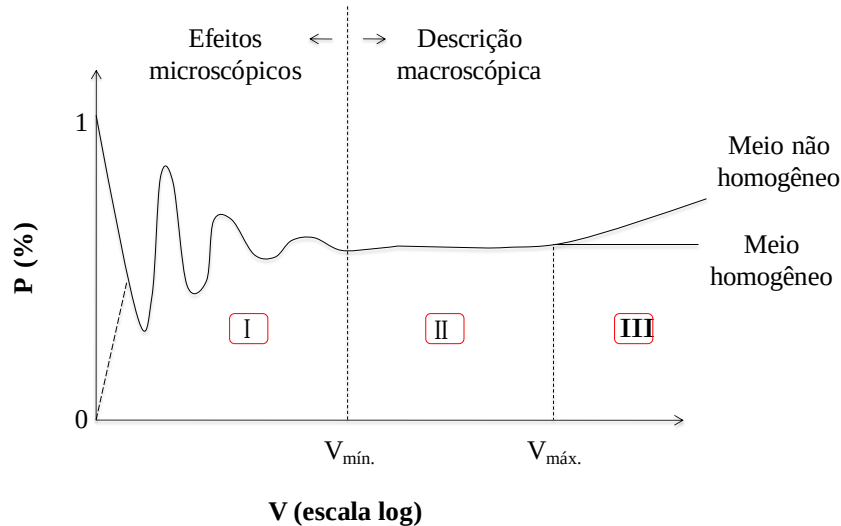
O conceito de tamanho elementar representativo foi introduzido em mecânica dos meios contínuos por Jacob Bear em 1972, como uma ferramenta a ser empregada para descrever o escoamento de solutos em meios porosos, por meio de simulações computacionais. A abordagem trata da definição do tamanho mínimo de uma amostra, necessário para fornecer medidas que representem o todo (BEAR; CHENG, 2010; MIYAZAKI, 2005).

A definição desses tamanhos representativos, que pode ser referente a volumes, áreas ou comprimentos elementares representativos (*VER*, *AER* e *CER*), é comumente realizada selecionando-se tamanhos consecutivos em torno de um ponto central na imagem da amostra. Construções adjacentes dentro da mesma imagem, centralizadas em pontos diferentes, também podem ser utilizadas. Os tamanhos de amostra que fornecerem resultados com pequena variação são então definidos como sendo adequados para medidas representativas do atributo de interesse (Figura 4.1) (COSTANZA-ROBINSON; ESTABROOK; FOUHEY, 2011; RAZAVI; MUHUNTHAN; HATTAMLEH, 2007).

A região I da Figura 4.1 exemplifica variações em medidas da porosidade (P) em função do volume (V) da amostra devido à heterogeneidade do meio na escala microscópica. Abaixo de um determinado volume mínimo ($V_{\min.}$) são observadas altas amplitudes de flutuação nas medidas de P . Isto ocorre quando as dimensões de V aproximam-se daquelas de um único poro ou partícula. Se V estiver localizado dentro de um poro, P terá seu valor

máximo (100%). Da mesma forma, se V estiver em uma região da matriz sólida do meio, teremos $P=0\%$.

Figura 4.1: Representação esquemática da definição do volume elementar representativo (VER) em medidas de porosidade (P). $V_{mín.}$ e $V_{máx.}$ correspondem, respectivamente, aos volumes mínimo e máximo que podem fornecer resultados representativos de P para meios porosos não homogêneos.



Fonte: Adaptado de Bear e Cheng (2010).

Para volumes maiores que $V_{mín.}$ obtém-se uma região de estabilização (*plateau*) dos valores de P (região II). Esta região corresponde à faixa dos tamanhos representativos, ou seja, o VER é obtido entre o domínio dos efeitos microscópicos e o da heterogeneidade macroscópica do meio (região III) (BEAR, 1988). Para meios porosos homogêneos, o *plateau* observado após $V_{mín.}$ se mantém em toda a escala da descrição macroscópica. No entanto, para meios porosos não homogêneos, como o solo, o mesmo não ocorre. Neste caso, existe um intervalo de volumes (entre $V_{mín.}$ e $V_{máx.}$) dentro do qual o VER pode ser definido. Tal fato é explicado pela heterogeneidade macroscópica de meios porosos não homogêneos (BEAR; CHENG, 2010).

É importante destacar que cada meio poroso possui características intrínsecas e, portanto, um tamanho representativo para um determinado atributo de um meio pode ser diferente para o mesmo atributo em outro meio poroso (ASANO; UCHIDA, 2010; BARTOLI et al., 2005; LI et al., 2009; MÜLLER; SIEGESMUND; BLUM, 2010). Da mesma forma, diferentes atributos podem exigir diferentes tamanhos de amostra a fim de que sejam obtidas medidas representativas das mesmas (BAVEYE et al., 2002; BORGES; PIRES, 2012; FERREIRA; BORGES; PIRES, 2015).

Apesar de ser reconhecida a necessidade de utilização de amostras com tamanho representativo, as pesquisas sobre tamanhos elementares representativos, disponíveis até o momento para meios não homogêneos, como é o caso do solo, são escassas. Isto ocorre principalmente quando se trata de estudos do *VER*, devido à necessidade de imagens 3D. Além disso, não são encontradas na literatura análises a partir de subvolumes ou subáreas selecionadas de maneira aleatória no interior do volume total da imagem. Tais análises permitiriam aplicar ferramentas estatísticas, para verificar a variabilidade associada às medidas, no que se refere às diferentes posições dos subvolumes. Com isso, seria possível também verificar a influência da variabilidade da amostra na definição do seu tamanho representativo.

A presente investigação conta com imagens de microtomografia de raios X, com volume total de $39 \times 39 \times 33 \text{ mm}^3$ e resolução espacial de $60 \text{ }\mu\text{m}$. Essas imagens são provenientes de amostras de um Latossolo vermelho de textura argilosa, submetido aos sistemas de manejo de Plantio direto (PD) e Plantio convencional (PC). Os objetivos foram: 1) investigar o comportamento da macroporosidade (*MAP*) e do número de macroporos (*NMAP*) em função dos subvolumes selecionados; 2) verificar a possibilidade de definir um *VER* para medidas da *MAP* e *NMAP* do solo; 3) avaliar a influência da forma de seleção dos subvolumes (aleatória e centralizada) na definição de um *VER*; 4) analisar o efeito do sistema de manejo do solo sobre os resultados de *VER* obtidos.

4.2. Material e métodos

Os estudos apresentados na sequência foram conduzidos nas imagens de μTC das amostras de solo cujo procedimento de coleta, obtenção, tratamento e processamento foram descritos na seção “Material e métodos” do Capítulo 3.

4.2.1. Seleção dos tamanhos e processo de recorte dos subvolumes

Para as análises de *VER*, dentro do volume total (*VT*) da imagem de cada amostra ($650 \times 650 \times 550 \text{ voxels} = 39 \times 39 \times 33 \text{ mm}^3$), foram selecionados 10 subvolumes variando de $0,40$ a $36.590,70 \text{ mm}^3$ (Tabela 4.1). Por tratar-se de imagens 3D em formato de paralelepípedos (eixos $x=y=650$ e $z=550 \text{ voxels}$), a seleção dos subvolumes foi feita de maneira a ser possível crescer os três eixos na mesma proporção, de acordo com a Equação 4.1:

$$\frac{a}{b} = \frac{650}{550} \therefore b = \frac{11}{13}a, \quad (4.1)$$

onde $x = y = a$ e $z = b$.

Tabela 4.1: Tamanho de cada subvolume selecionado nas imagens de μ TC para as análises de VER.

Subvolume	x (mm)	y (mm)	z (mm)	V (mm ³)	Subvolume	x (mm)	y (mm)	z (mm)	V (mm ³)
1	0,78	0,78	0,66	0,40	6	19,50	19,50	16,50	6.274,13
2	3,90	3,90	3,30	50,19	7	23,40	23,40	19,80	10.841,69
3	7,80	7,80	6,60	401,54	8	27,30	27,30	23,10	17.216,20
4	11,70	11,70	9,90	1.355,21	9	31,20	31,20	26,40	25.698,82
5	15,60	15,60	13,20	3.212,35	10	35,10	35,10	29,70	36.590,70

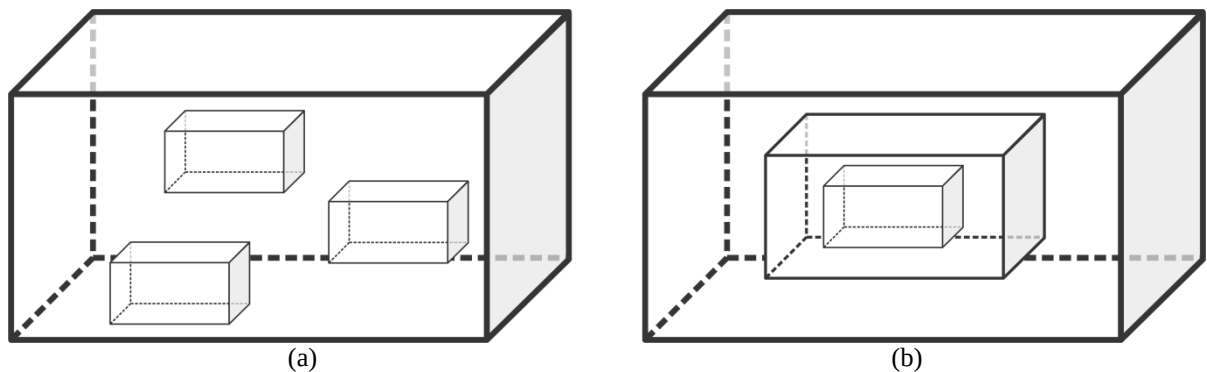
Fonte: A autora.

A seleção dos subvolumes nas imagens de μ TC foi feita de duas maneiras:

- 1) Centralizada: subvolumes concêntricos selecionados a partir do centro das imagens (Figura 4.2a);
- 2) Aleatória: subvolumes selecionados em posições aleatórias dentro das imagens (Figura 4.2b). Para cada tamanho de subvolume foram realizadas três repetições.

Com a finalidade de se automatizar o processo de seleção e recorte dos subvolumes, foi desenvolvido um programa em linguagem Java, o qual se encontra descrito no Anexo 1. Este programa possibilitou que os subvolumes fossem recortados com precisão dentro do volume total da imagem, em coordenadas aleatórias ou previamente especificadas.

Figura 4.2: Esquema de seleção dos subvolumes em posições (a) centralizadas e (b) aleatórias. Na forma de seleção aleatória, cada tamanho de subvolume foi selecionado em três posições independentes.



Fonte: A autora.

4.2.2. Análise dos dados

A análise 3D dos macroporos do solo foi executada para cada um dos subvolumes utilizando o programa *ImageJ* (RASBAND, 2007). A partir da planilha de resultados obtida foram calculados os valores de *MAP* e *NMAP*. A *MAP* corresponde à razão entre o volume de macroporos contido em cada um dos subvolumes analisados e o volume de imagem dos mesmos (Tabela 4.1). O *NMAP* corresponde ao número total de macroporos não interligados contidos nos respectivos subvolumes.

Foram construídos gráficos de *MAP* e de *NMAP* em função do volume de imagem para ambos os sistemas de manejo estudados (plantio direto, PD e plantio convencional, PC). Para os subvolumes aleatórios, os valores de *MAP* e *NMAP* adotados correspondem à média das três repetições. Para estudar o comportamento desses resultados, foram calculados os desvios relativos (*DR*) entre os valores desses atributos para cada subvolume (*MAP_i* ou *NMAP_i*) e o valor obtido para o volume total da imagem (*MAP_{VT}* ou *NMAP_{VT}*), como apresentado nas equações abaixo:

$$DR(\%) = \left(\frac{MAP_{VT} - MAP_i}{MAP_{VT}} \right) \cdot 100 \quad \text{e} \quad DR(\%) = \left(\frac{NMAP_{VT} - NMAP_i}{NMAP_{VT}} \right) \cdot 100 \quad (4.2)$$

Estes desvios relativos foram adotados como valores de referência. Os critérios para a definição do *VER* para as medidas de *MAP* e *NMAP* foram estabelecidos conforme a metodologia proposta por Vandenbygaart e Protz (1999):

- (i) *DR* não superior a 10% de acordo com a Equação (4.2);
- (ii) Ao menos três subvolumes consecutivos não devem diferir entre si nos valores de *MAP* ou *NMAP*, utilizando o critério de variação do Item (i).

4.3. Resultados e discussão

4.3.1. Macroporosidade (*MAP*)

Os gráficos de *MAP* em função do volume de amostra, para PD e PC, são apresentados nas Figuras 4.3 e 4.4, respectivamente. A partir desses resultados pode-se observar uma maior variabilidade nos valores de *MAP* obtidos para os subvolumes iniciais, ou seja, aqueles que apresentam menor tamanho. Ademais, as maiores amplitudes de flutuação

da *MAP* ocorreram para os valores obtidos a partir dos subvolumes selecionados de forma aleatória, quando comparados aos obtidos para aqueles selecionados de forma centralizada. Tais flutuações variam de amostra para amostra e não apresentam um comportamento padrão.

A influência da forma de seleção dos tamanhos de amostras para análises do volume, área ou comprimento representativo é relatada na literatura em diferentes trabalhos (BAVEYE et al., 2002, COSTANZA-ROBINSON; ESTABROOK; FOUHEY, 2011, FERREIRA; BORGES; PIRES, 2015; VANDENBYGAART; PROTZ, 1999). No entanto, até o momento não foram encontrados estudos que abordem a forma aleatória de seleção da posição dos subvolumes no interior das amostras.

Quando essas posições são selecionadas de maneira randômica, todas as regiões da amostra têm a mesma probabilidade de ocorrência. Com isso, os subvolumes podem ser selecionados em regiões que apresentem características similares, ou então em regiões extremamente diferentes umas das outras, gerando alta variabilidade nas medidas. As barras de erro associadas às medidas para a forma de seleção aleatória evidenciam este fato (Figura 4.3 e 4.4).

Para exemplificar, a seleção pode ocorrer em uma região que contenha um número muito maior de *voxels* correspondentes a poros do que à matriz do solo, ou vice-versa, gerando valores de *MAP* que não representam a amostra como um todo. À medida que o tamanho do subvolume é aumentado, tanto regiões de alta como de baixa *MAP* são contabilizadas e, com isso, os resultados de *MAP* tendem a um *plateau*. Quando o tamanho do subvolume se aproxima do volume total da imagem, por mais que a posição de seleção seja aleatória, este subvolume engloba regiões que também são contabilizadas nos demais.

Para o PD (Figura 4.3), os maiores valores de *MAP* foram obtidos para Am 01 (29%) e Am 03 (35%) para as formas de seleção aleatória e centralizada, respectivamente. Ambos os casos foram registrados para o menor subvolume analisado ($0,40 \text{ mm}^3$). O mínimo valor de *MAP* observado foi 0% (Am 02, Am 04, Am 05 e Am 06). Esses valores foram obtidos para algumas amostras para a forma de seleção aleatória (Am 05 e Am 06), centralizada (Am 04) ou para ambas (Am 02). Para os casos de $MAP=0\%$ e forma aleatória de seleção, este resultado indica que as três regiões nas quais foram selecionados esses subvolumes apresentaram nenhuma ou uma porcentagem muito baixa de *voxels* correspondentes a poros, de tal forma que $\overline{MAP} \approx 0\%$.

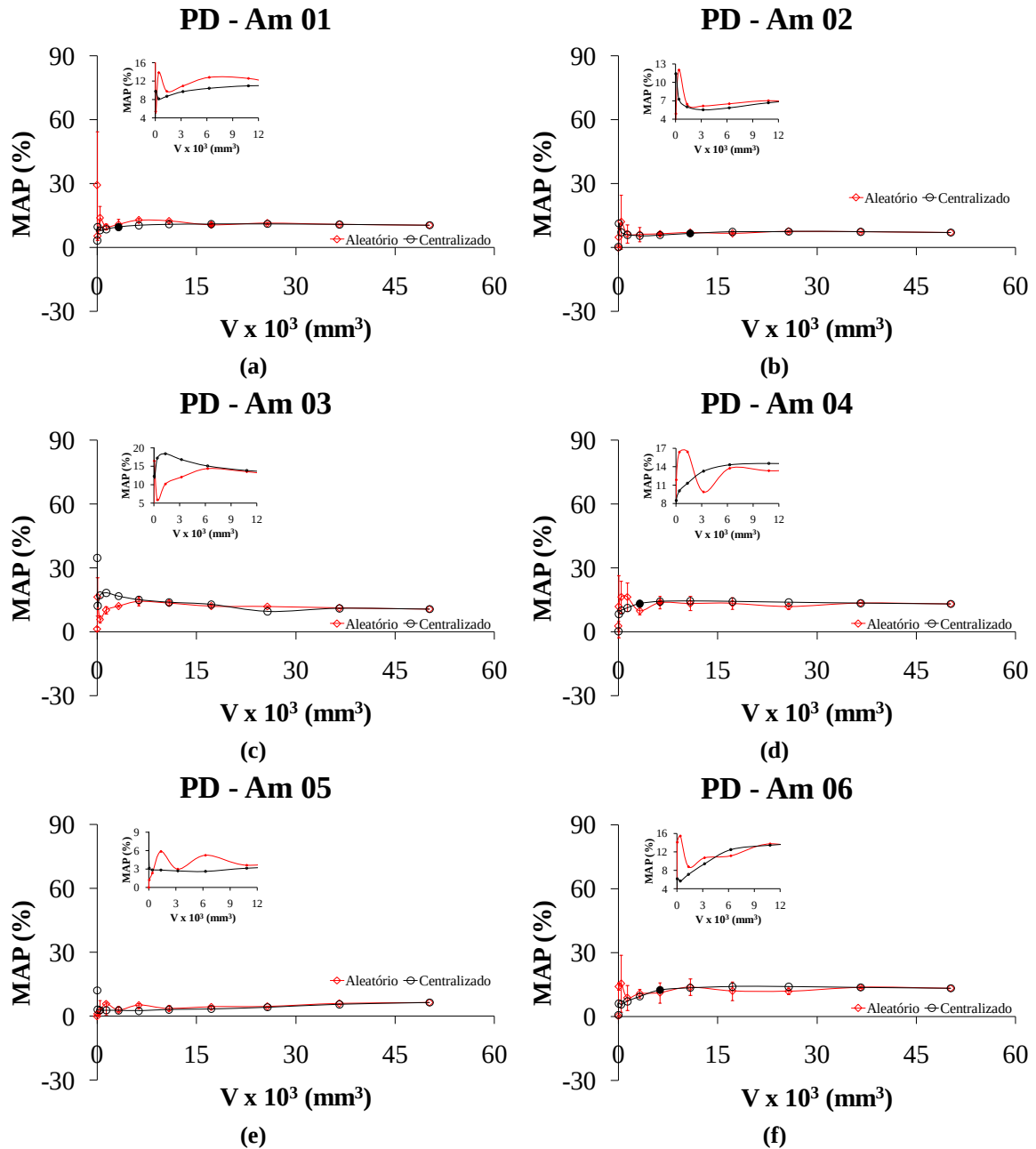
As amostras 02, 04 e 06 apresentaram valores de máximo e mínimo similares para ambas as formas de seleção. Para as amostras 02 e 04 este fato pode estar relacionado a uma maior homogeneidade na estrutura interna das mesmas, devido à rápida estabilização dos

valores de *MAP* a 10% de variação em relação ao valor de referência (Am 02: alcance do *VER* no 6º subvolume analisado para a forma de seleção aleatória, e no 7º subvolume para a seleção centralizada; Am 04: *VER* no 6º subvolume para a seleção aleatória e no 5º para a centralizada). Para a Am 06 o *VER* foi atingido apenas para a forma de seleção centralizada (6º subvolume). Para as amostras 03 e 05, o *VER* não foi atingido para nenhuma das formas de seleção. Na Am 03, os valores de *MAP* decresceram com o volume, enquanto que para a Am 05 eles continuaram aumentando até o volume total da amostra.

Para o PC (Figura 4.4), os maiores valores de *MAP* foram obtidos para Am 01 (53%) e Am 04 (46%), novamente no menor subvolume analisado e para a forma centralizada e aleatória de seleção, respectivamente. Valores de *MAP* de 0% foram observados para as amostras 04 e 06, na forma centralizada de seleção. As amostras 02, 05 e 06 apresentaram valores de máximo e mínimo similares entre as duas formas de seleção. As amostras 02 e 05 atingiram o *VER* para as duas formas de seleção, sendo que para a seleção centralizada a Am 02 foi a amostra que primeiramente atingiu o *VER*, dentre todas as amostras do PD e PC. A Am 06 não atingiu o *VER* para nenhuma das formas de seleção. No entanto, esta apresentou uma região isolada de estabilização nos valores de *MAP* entre o 4º e o 7º subvolumes (1.355,21 a 10.841,69 mm³) e forma aleatória de seleção. Para a Am 04 também foi observada uma região de estabilização isolada entre o 2º e o 4º subvolumes (50,19 a 1.355,21 mm³), também para a forma aleatória de seleção.

Os diferentes valores de *VER* obtidos para uma mesma amostra de acordo com diferentes formas de seleção dos subvolumes (centralizada ou aleatória), podem ser explicados pela heterogeneidade intrínseca das amostras. Neste aspecto, vale ressaltar as vantagens do uso da técnica de μ TC, uma vez que a partir de imagens 3D é possível estudar a estrutura interna das amostras por meio da visualização e quantificação das características de cada uma destas (MOONEY et al., 2011; ROGASIK et al., 2014; TIPPKÖTTER et al., 2009).

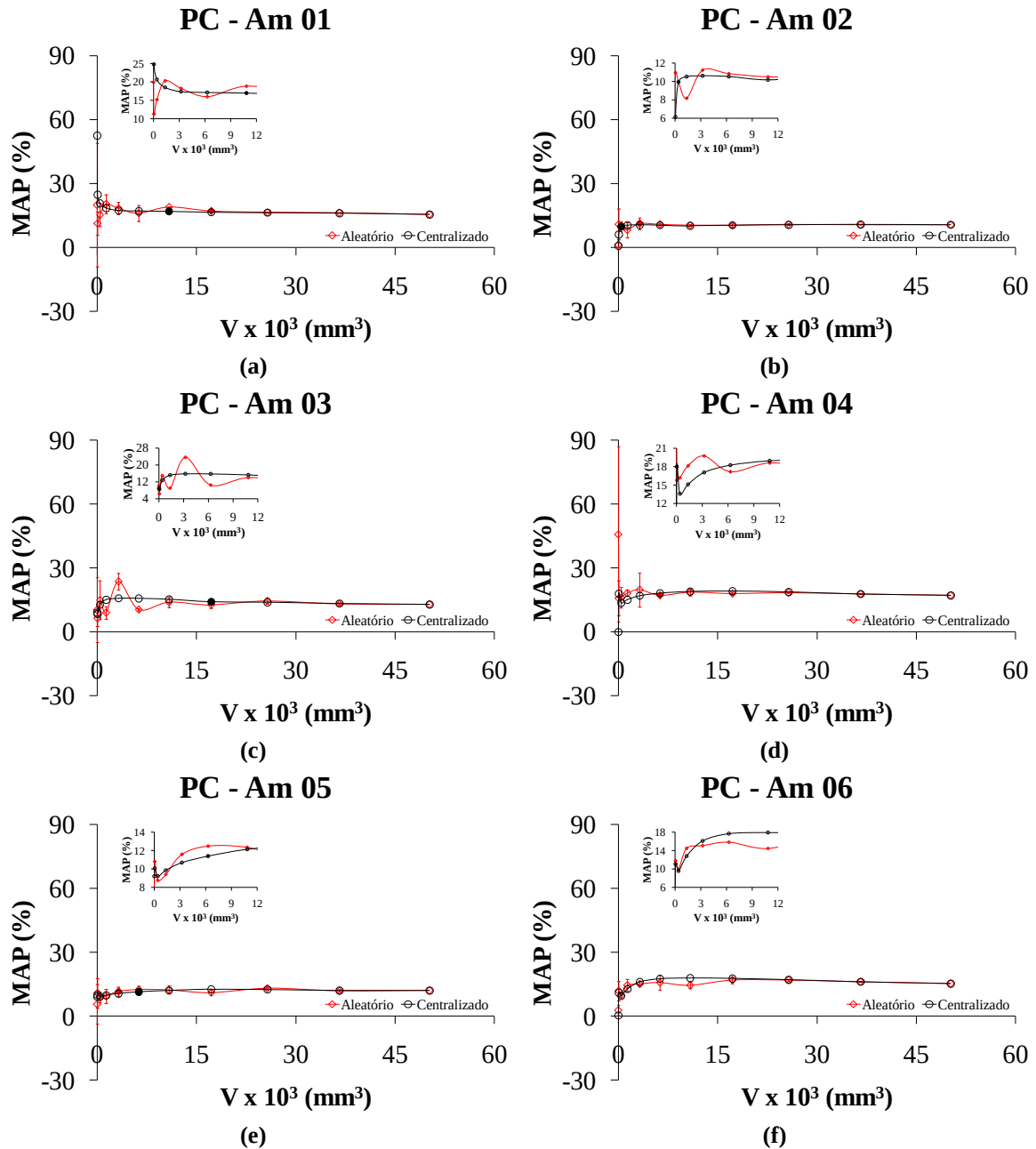
Figura4.3: Gráficos de macroporosidade (*MAP*) por volume (*V*) de amostras sob plantio direto (PD). O marcador preenchido indica o *VER* para cada amostra (Am 01, Am 02, ..., Am 06) e forma de seleção dos subvolumes (aleatória ou centralizada). Os gráficos em escala reduzida representam uma ampliação da região correspondente aos menores subvolumes analisados.



Fonte: A autora.

Nota: Para a forma de seleção aleatória (curva em vermelho) são apresentadas as barras de desvio padrão, correspondentes às três repetições realizadas.

Figura 4.4: Gráficos de macroporosidade (*MAP*) por volume (*V*) de amostras sob plantio convencional (PC). O marcador preenchido indica o *VER* para cada amostra (Am 01, Am 02, ..., Am 06) e forma de seleção dos subvolumes (aleatória ou centralizada). Os gráficos em escala reduzida representam uma ampliação da região correspondente aos menores subvolumes analisados.



Fonte: A autora.

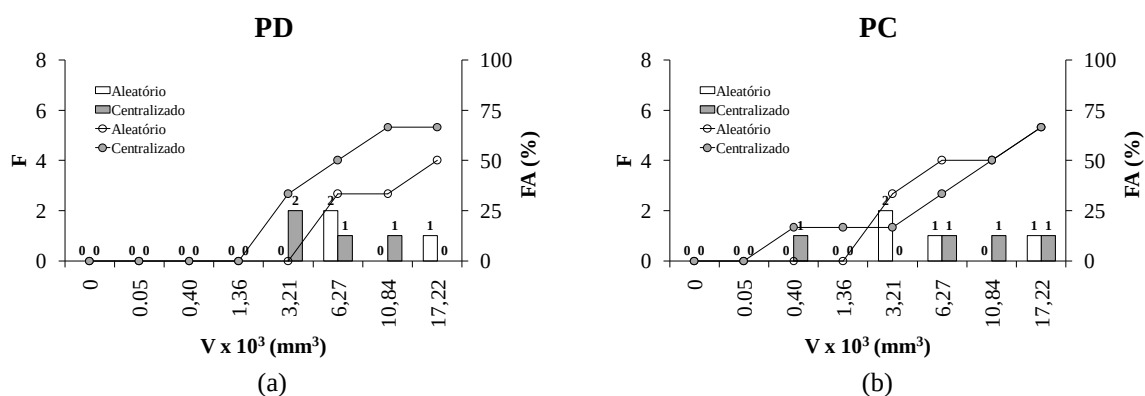
Nota: Para a forma de seleção aleatória (curva em vermelho) são apresentadas as barras de desvio padrão, correspondentes às três repetições realizadas.

Para o PD, um total de três e quatro amostras atingiram o *VER* para as formas aleatória e centralizada de seleção, o que corresponde a 50 e 67% das amostras analisadas, respectivamente (Figura 4.5a). Para a seleção centralizada, as amostras 01 e 04 atingiram o *VER* no 5º subvolume e, as amostras 02 e 06, no 6º e 7º subvolumes, respectivamente (Figura 4.3). Com isso, o maior volume necessário para que essas quatro amostras atingissem

o *VER* foi 10.841,69 mm³ (7º subvolume). Para a seleção aleatória, o *VER* das amostras 02 e 04 ocorreu no 6º subvolume, enquanto que para Am 01, este ocorreu no 8º subvolume (Figura 4.3). Com isso, o maior volume necessário para o *VER* destas amostras foi 17.216,20 mm³. Para as demais combinações de amostras e formas de seleção, não foram observados indícios de estabilização dos resultados de *MAP*.

Para o PC, 67% das amostras atingiram o *VER* para ambas as formas de seleção (Figura 4.5b). O maior número de amostras que atingiram o *VER* ocorreu no 5º subvolume e forma aleatória de seleção. O volume mínimo necessário para o *VER* foi o 3º (Am 02) e o 5º (Am 02 e Am 05), para as formas de seleção centralizada e aleatória, respectivamente. O maior subvolume necessário, para as amostras que atingiram o *VER*, foi o 8º (17.216,20 mm³) para ambos os esquemas de seleção (Figura 4.4).

Figura 4.5: Gráficos de frequência (F) e frequência acumulada (FA) por volume representando o número de amostras que atingiram o volume elementar representativo (*VER*) nas formas de seleção de subvolumes centralizada e aleatória. PD e PC representam os plantios direto e convencional, respectivamente.



Fonte: A autora.

Para o PD, o *VER* foi atingido por uma parcela menor de amostras para a forma de seleção aleatória em comparação à forma de seleção centralizada e também em comparação ao PC para ambas as formas de seleção. Esse fato pode estar associado à maior variabilidade espacial característica de solos sob PD, uma vez que o revolvimento do solo sob PC tende a homogeneizá-lo (MARCOLAN; ANGHINONI, 2006). No entanto, é importante notar que nem sempre o *VER* foi alcançado para uma mesma amostra nas duas formas de seleção. Por exemplo, para o PD a Am 06 alcançou o *VER* apenas para seleção centralizada (Figura 4.3f) e, para o PC, as amostras 03 e 04 atingiram o *VER* para as formas de seleção centralizada e aleatória, respectivamente (Figura 4.4c, d).

Considerando que a *MAP* é um atributo físico que apresenta alta variabilidade espacial (CARTER, 1995; OBALUM et al., 2013; SOUZA; MARQUES JÚNIOR;

PEREIRA, 2009), pode-se dizer que uma porcentagem relativamente alta das amostras atingiu a estabilização. Para ambos os sistemas de manejo e formas de seleção, o volume máximo necessário para o *VER* foi 17.216,20 mm³. Com isso é possível utilizar amostras com tamanho igual ou superior a este, para que sejam obtidas medidas representativas da *MAP* para o solo submetido aos dois sistemas de manejo estudados.

A importância desse resultado consiste primeiramente na possibilidade de que se possa garantir a representatividade das medidas de *MAP* realizadas nessas amostras. Em segundo lugar, sabendo-se que o processamento de imagens 3D requer um sistema computacional robusto, quanto mais “leves” forem estas imagens, mais rápido será o processamento das mesmas. Neste caso em específico, o *VER* é aproximadamente três vezes menor que o volume total da imagem.

No entanto, é importante observar que cada meio poroso possui características intrínsecas. Assim, um tamanho representativo de um determinado atributo de um meio, provavelmente será diferente para o mesmo atributo em outro meio poroso. Da mesma forma, é importante observar que cada atributo também apresenta diferentes variabilidades espaciais no solo. Por exemplo, em Jury e Horton (2004) são dados os intervalos dos coeficientes de variação (CV) da porosidade (*P*) e da densidade do solo (ρ_s). Para *P*, o intervalo é de 7-11%, enquanto que para ρ_s , é de 3-26%. A partir destas informações, pode-se observar que o intervalo do CV de ρ_s é maior, no entanto seu limite inferior é menor que o limite inferior de *P*.

4.3.2. Número de macroporos (*NMAP*)

Nas Figura 4.6 e 4.7 são apresentados gráficos de *NMAP*, em função dos subvolumes analisados e formas de seleção centralizada e aleatória, para as amostras de PD e PC, respectivamente. Os gráficos em escala reduzida representam uma ampliação da região correspondente aos menores subvolumes analisados.

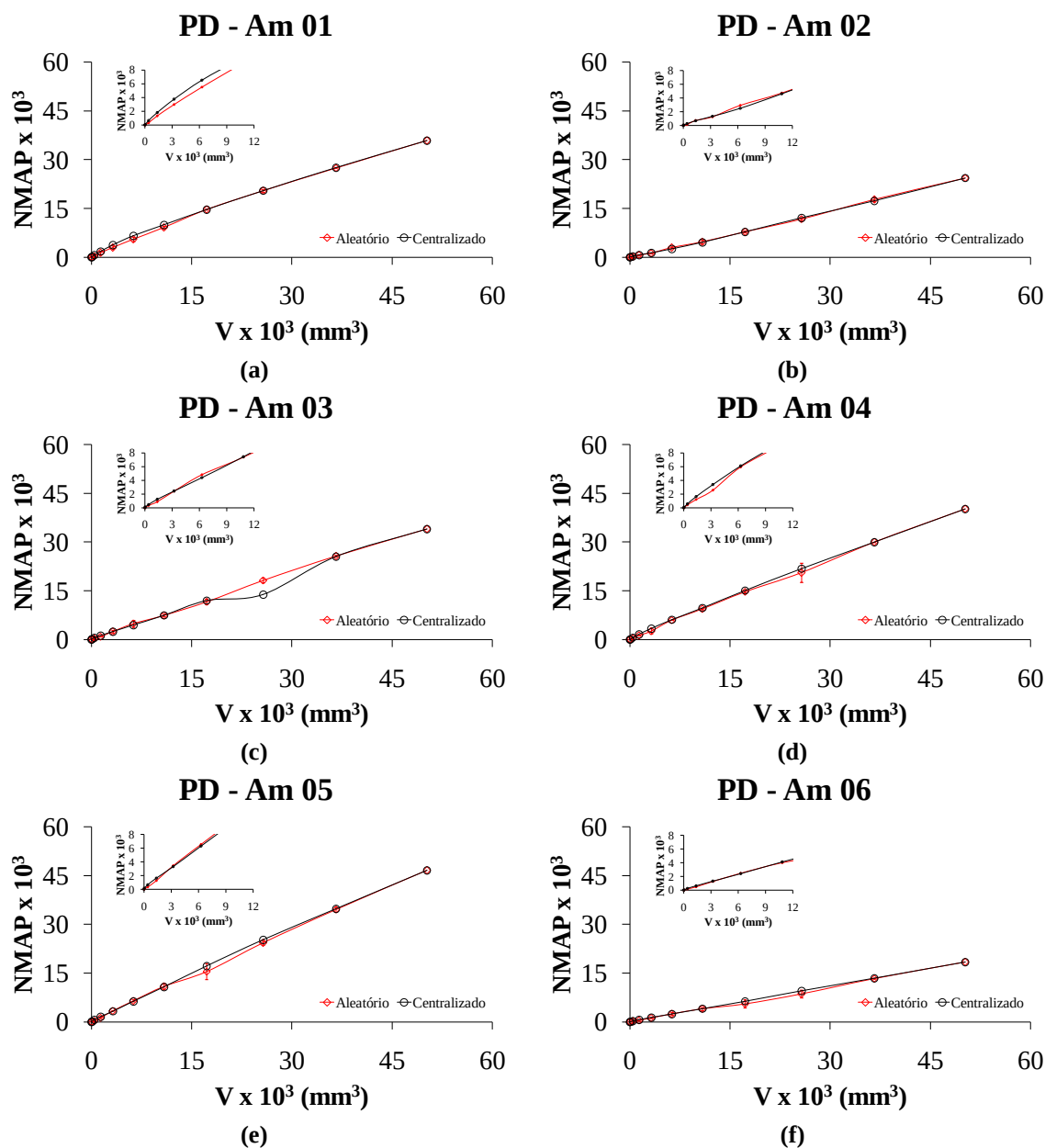
De forma geral, assim como para a *MAP*, as maiores flutuações nos resultados de *NMAP* foram observadas para os menores subvolumes e forma aleatória de seleção. No entanto, algumas regiões isoladas de pequenas flutuações, para os maiores subvolumes, ocorreram para as amostras 03-06 para o PD e 03-05 para o PC.

Para o PD (Figura 4.6), a Am 03 apresentou uma redução evidente na taxa de aumento no valor de *NMAP* no 9º subvolume (25.698,82 mm³) e forma centralizada de seleção. Esta flutuação gerou também um decréscimo na *MAP* para este mesmo subvolume e

forma de seleção, o qual pode ser observado no gráfico de *MAP* para essa amostra (Figura 4.3). As regiões de flutuação observadas para as amostras 04 (9º subvolume), 05 e 06 (8º e 9º subvolumes), ocorreram para a forma aleatória de seleção, reduzindo os valores de *NMAP*. Os efeitos dessas flutuações também tiveram reflexo na medida da *MAP* desses mesmos subvolumes (Figura 4.3). Para as amostras 04 e 06, essas reduções estão relacionadas à redução também da *MAP*. No entanto, para a Am 05, no 8º subvolume, foi observado o aumento na *MAP* com a redução do *NMAP*.

Para o PC (Figura 4.7), nas amostras 03 e 05 foi observado um acréscimo (8º subvolume) e posterior redução (9º subvolume) na taxa de aumento da *NMAP*, os quais causaram o efeito contrário nos resultados de *MAP* (Figura 4.4). Mais precisamente, menores valores de *MAP* para o 8º subvolume, e maiores valores para o 9º subvolume. Por sua vez, para a Am 04, a redução na taxa de aumento do *NMAP* resultou em um menor valor de *MAP*. Esse resultado pode ser explicado pela subdivisão, principalmente dos poros que apresentam maior volume e ramificações, quando diferentes subvolumes são selecionados na amostra. Com isso, um único poro pode ser subdividido e contabilizado como mais de um poro com menor volume. Essas flutuações, que tem reflexo nos resultados de *MAP*, podem ser responsáveis pelo não alcance do *VER* de algumas das amostras.

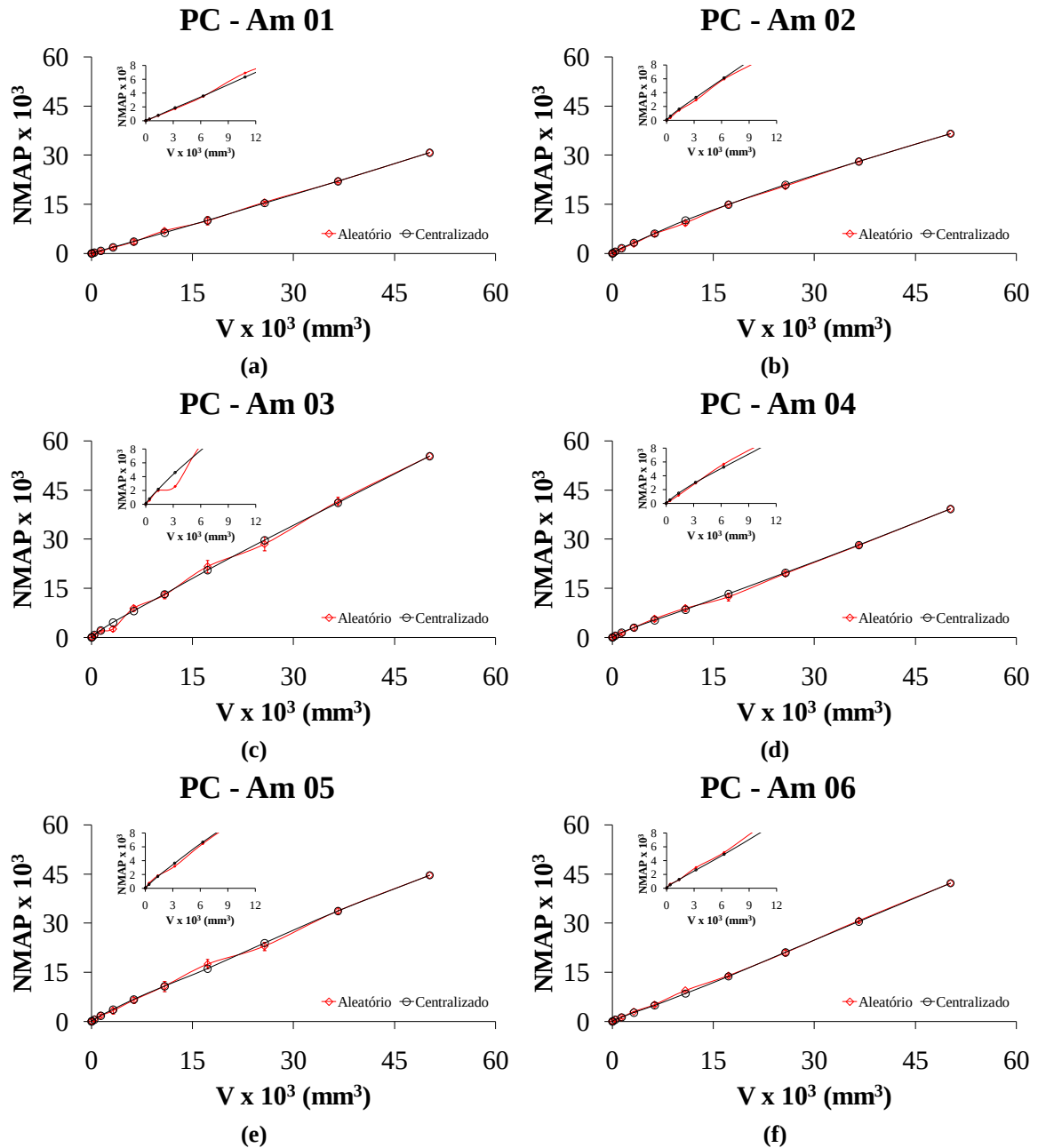
Figura 4.6: Gráficos do número de macroporos ($NMAP$) por volume (V) das amostras (Am 01, Am 02, ..., Am 06) sob plantio direto (PD). Os subvolumes foram selecionados de forma aleatória e centralizada. Os gráficos em escala reduzida representam uma ampliação da região correspondente aos menores subvolumes analisados.



Fonte: A autora.

Nota: Para a forma de seleção aleatória (curva em vermelho) são apresentadas as barras de desvio padrão, correspondentes às três repetições realizadas.

Figura 4.7: Gráficos do número de macroporos ($NMAP$) por volume (V) das amostras (Am 01, Am 02, ..., Am 06) sob plantio convencional (PC). Os subvolumes foram selecionados de forma aleatória e centralizada. Os gráficos em escala reduzida representam uma ampliação da região correspondente aos menores subvolumes analisados.



Fonte: A autora.

Nota: Para a forma de seleção aleatória (curva em vermelho) são apresentadas as barras de desvio padrão, correspondentes às três repetições realizadas.

Foram realizados ajustes lineares nos resultados de $NMAP$ para as formas de seleção aleatória e centralizada, para todas as amostras analisadas. Para ambos os solos, observou-se que as equações de ajuste de uma mesma amostra exibiram resultados similares, com os valores de coeficiente angular (α) apresentando diferença a partir da 2ª casa decimal (Tabela

4.2). Este resultado indica a similaridade nos resultados de *NMAP* obtidos a partir dessas duas formas de seleção.

Por este motivo, foi possível calcular o $\overline{NMAP}$ entre a seleção aleatória e centralizada e realizar apenas um ajuste linear para estes resultados (Figura 4.8). Os altos valores de coeficiente de determinação (R^2) obtidos em todos os ajustes comprovaram a hipótese da relação de linearidade para o *NMAP* em função do volume de amostra. Ou seja, maiores volumes de amostra exibiram um maior *NMAP*.

Tabela 4.2: Parâmetros matemáticos do ajuste linear para os gráficos apresentados nas Figuras 4.6-4.8, para as formas de seleção aleatória e centralizada.

		Aleatória		Centralizada		Média	
		α	R^2	α	R^2	α	R^2
PD	Am 01	0,727	0,995	0,719	0,994	0,723	0,995
	Am 02	0,483	0,998	0,482	0,998	0,483	0,999
	Am 03	0,684	0,999	0,664	0,990	0,674	0,997
	Am 04	0,802	0,999	0,801	0,998	0,801	0,999
	Am 05	0,930	0,999	0,935	0,999	0,932	0,999
	Am 06	0,361	0,997	0,365	0,999	0,363	0,999
PC	Am 01	0,610	0,999	0,609	0,999	0,609	0,999
	Am 02	0,741	0,995	0,737	0,994	0,739	0,995
	Am 03	1,111	0,997	1,103	0,999	1,107	0,998
	Am 04	0,771	0,999	0,769	0,998	0,770	0,999
	Am 05	0,893	0,997	0,894	0,999	0,893	0,998
	Am 06	0,835	0,999	0,837	0,999	0,836	0,999

Fonte: A autora.

Nota: α é o coeficiente angular da reta de ajuste ($NMAP = \alpha V$) e R^2 é coeficiente de determinação.

Os resultados de α indicam a variação do *NMAP* em função do intervalo de volume de amostra analisado. Para o PD, a taxa de aumento mais pronunciada foi observada para a Am 05 ($\alpha=0,932$) e, a menos pronunciada, para a Am 06 ($\alpha=0,363$). Estes resultados estão de acordo com o maior e menor valor de *NMAP* observados para o volume total destas amostras, conforme previamente discutido no Capítulo 3. Para a Am 05, o aumento progressivo no *NMAP* também gerou maiores valores de *MAP* até os maiores subvolumes analisados, para ambas as formas de seleção. Com isso, não foram observados indícios de *VER* para a *MAP* desta amostra. Para a Am 06, o *VER* para as medidas de *MAP* foi atingido para forma de seleção centralizada, no 6º subvolume (Figura4.3).

Para o PC, o menor e o maior valor de α foi observado para as amostras 01 e 03, respectivamente. Para estas amostras, o *VER* para a *MAP* apenas não foi atingido para a Am 03 segundo a forma de seleção aleatória. A forma de seleção centralizada, por sua vez,

forneceu um *VER* de maior tamanho para a Am 03 em comparação com a Am 01, evidenciando novamente a influência do parâmetro α na definição do *VER* para a *MAP*. Assim como para o PD, estes resultados também estão de acordo com os previamente obtidos e discutidos no Capítulo 3 para esse mesmo sistema de manejo.

Como os valores de coeficiente angular apresentados na Tabela 4.2, para as 6 amostras de cada sistema de manejo, são relativamente próximos, foi obtida uma equação geral, a partir da média de todos os dados, para cada subvolume. Desta forma, o número de macroporos em função do volume de amostra para cada um dos sistemas de manejo pode ser calculado por:

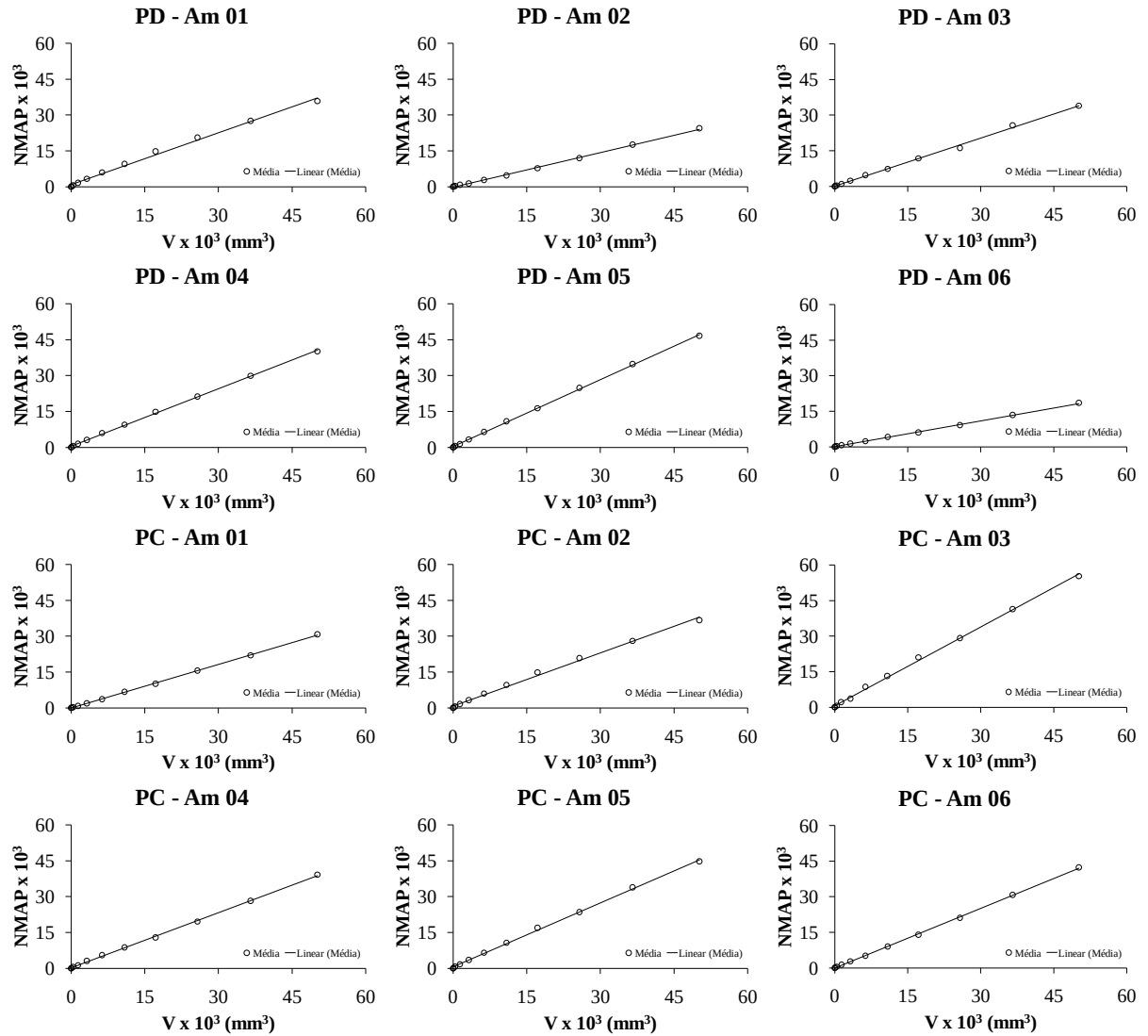
$$\text{PD: } NMAP = 0,663V \quad (4.3)$$

$$\text{PC: } NMAP = 0,826V \quad (4.4)$$

A partir da relação linear entre *NMAP* e *V*, pode-se concluir que não há indício de um *VER* para medidas do *NMAP* até o volume máximo de amostra analisado neste trabalho (50.193,00 mm³), para ambos os sistemas de manejo avaliados. Por se tratar de um atributo físico que é cumulativo (ou seja, seu o valor é a soma do número de ocorrências de poros em cada volume analisado), espera-se que o aumento do mesmo seja gradativo com o aumento do volume da amostra. No entanto, apenas a realização de estudos com amostras de maior tamanho poderiam confirmar este pressuposto. Além disso, seria interessante realizar esta análise em diferentes escalas do meio poroso (imagens com maior e menor resolução espacial).

Esses resultados ressaltam a importância da análise de tamanhos representativos para cada atributo de interesse. Esse enfoque foi abordado em trabalhos disponíveis na literatura como, por exemplo, os de Al-Raoush e Papadopoulos (2010), Baveye et al. (2002), Borges, Pires e Pereira (2012), Ferreira, Borges e Pires (2015), Pedrotti et al. (2003) e Vandenbygaart e Protz (1999). Al-Raoush e Papadopoulos (2010) concluíram que o *VER* para porosidade do meio analisado não poderia ser usado para realização de medidas representativas dos demais atributos de interesse. Isto porque os outros atributos exigiam um tamanho maior para que medidas representativas pudessem ser realizadas. Sendo assim, a utilização de um mesmo tamanho representativo, para medidas de diferentes atributos, irá depender se este inclui o tamanho mínimo necessário para que sejam obtidas medidas representativas de cada um dos atributos analisados.

Figura 4.8: Gráficos do número de macroporos médio ($\overline{NMAP}$) por volume (V) das amostras (Am 01, Am 02, ..., Am 06) sob plantio direto (PD) e plantio convencional (PC) e respectivos ajustes lineares. O $\overline{NMAP}$ corresponde à média dos resultados obtidos para as duas formas de seleção de subvolumes (aleatória e centralizada).



Fonte: A autora.

Uma vez observada a linearidade dos resultados de $NMAP$ em função do volume de amostra, foi calculado o número de macroporos específico ($NMAP_e$) de cada subvolume (V), conforme equação abaixo:

$$NMAP_e = \frac{NMAP}{V}. \quad (4.5)$$

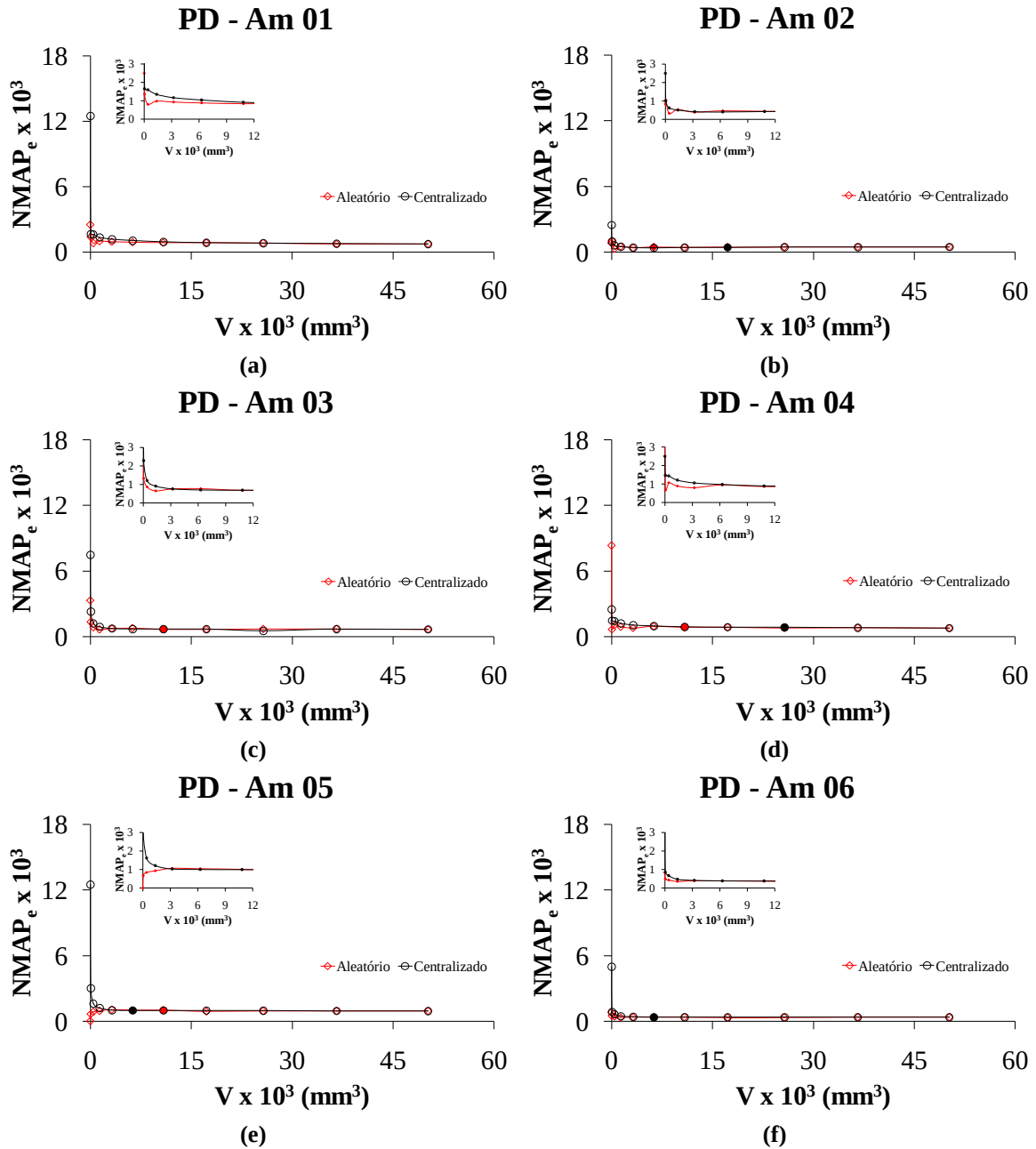
Os resultados de $NMAP_e$ em função do volume de amostra (Figuras 4.9 e 4.10) indicaram estabilização para os maiores subvolumes, para ambos os sistemas de manejo analisados. A partir de estudos de VER observou-se que, para o PD, quatro amostras atingiram

o *VER* tanto para a forma aleatória quanto para a forma centralizada de seleção, o que corresponde a 67% das amostras analisadas (Figura 4.9). Para a seleção centralizada, as amostras 02 e 04 atingiram o *VER* no 8º subvolume e, as amostras 05 e 06, no 6º subvolume (marcadores preenchidos da Figura 4.9). Com isso, o maior volume necessário para que essas quatro amostras atingissem o *VER* foi 17.216,20 mm³ (8º subvolume). Para a seleção aleatória, o *VER* da amostra 02 ocorreu no 6º subvolume, enquanto que para Am 03-05, este ocorreu no 7º subvolume. Ou seja, o maior volume necessário para o *VER* destas amostras para ambas as formas de seleção foi 17.216,20 mm³. Para as demais combinações de amostras e formas de seleção, não foram observados indícios de estabilização dos resultados de *NMAP_e*.

Para o PC, 50 e 83% das amostras atingiram o *VER* para as formas aleatória e centralizada de seleção (Figura 4.10). O volume mínimo necessário para o *VER* foi o 6º (Am 01 e Am 06) e o 3º (Am 01) para as formas de seleção aleatória e centralizada, respectivamente. O maior subvolume necessário, para as amostras que atingiram o *VER*, foi o 8º (17.216,20 mm³) para a forma centralizada de seleção (Am 05, Figura 4.10e).

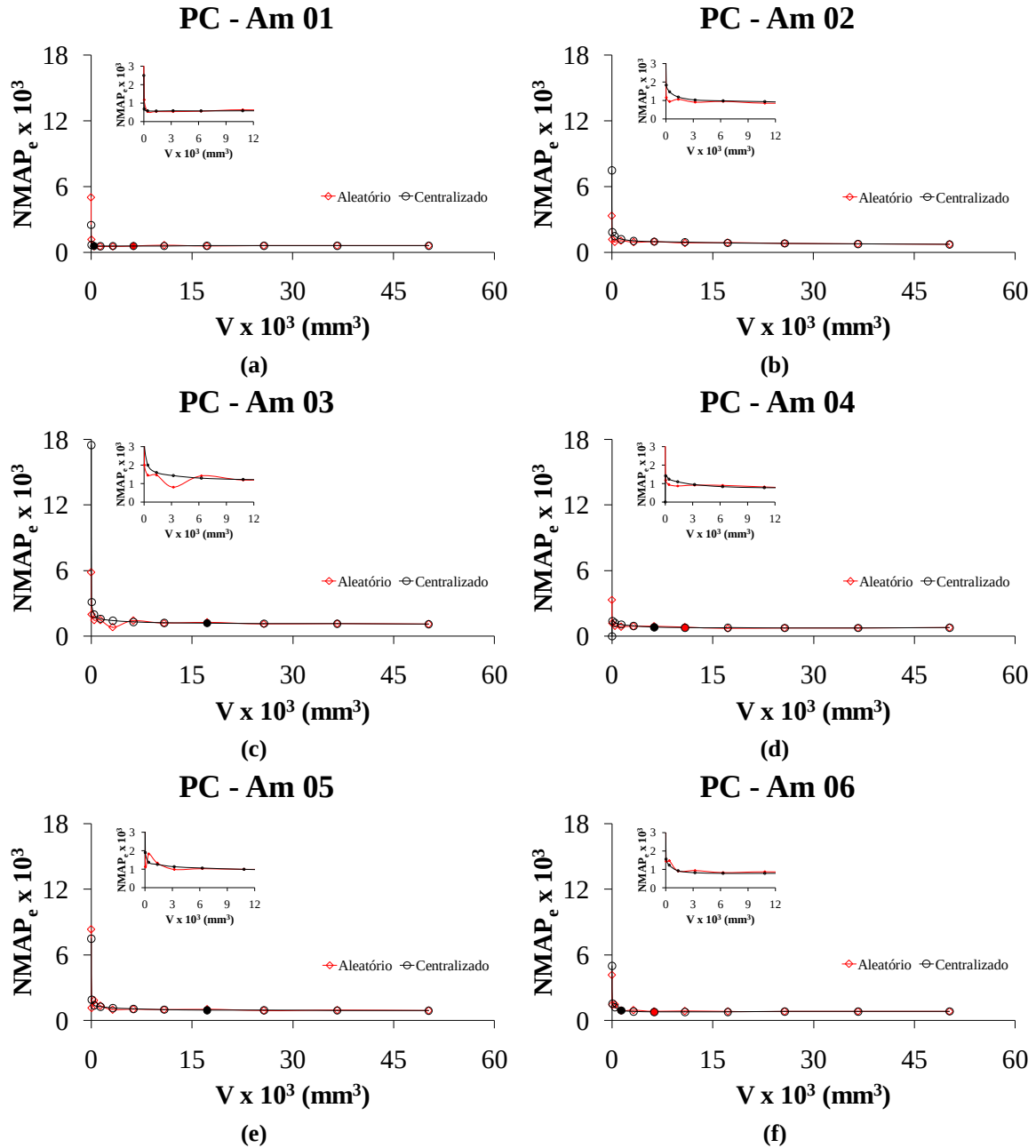
Tendo observado que para ambos os sistemas de manejo e formas de seleção ocorreu estabilização nos resultados de *NMAP_e*, é possível identificar um *VER* de 17.216,20 mm³ para medidas representativas deste atributo físico.

Figura 4.9: Gráficos do número de macroporos específico ($NMAP_e$) por volume (V) das amostras sob plantio direto (PD). O marcador preenchido indica o VER para cada amostra (Am 01, Am 02, ..., Am 06) e forma de seleção dos subvolumes (aleatória ou centralizada). Os gráficos em escala reduzida representam uma ampliação da região correspondente aos menores subvolumes analisados.



Fonte: A autora.

Figura 4.10: Gráficos do número de macroporos específico ($NMAP_e$) por volume (V) das amostras sob plantio convencional (PC). O marcador preenchido indica o VER para cada amostra (Am 01, Am 02, ..., Am 06) e forma de seleção dos subvolumes (aleatória ou centralizada). Os gráficos em escala reduzida representam uma ampliação da região correspondente aos menores subvolumes analisados.



Fonte: A autora.

Conclusões

Os resultados de MAP e $NMAP$ em função do volume de amostra apresentaram uma maior variabilidade para os menores subvolumes. As maiores amplitudes de flutuação da MAP ocorreram para os valores obtidos a partir dos subvolumes selecionados de forma aleatória, quando comparados aos obtidos para aqueles selecionados a partir do centro das imagens.

Essas flutuações variaram de amostra para amostra e não apresentaram um comportamento padrão. Para o PD, 67 e 50% das amostras atingiram o *VER* para a *MAP* até o volume de $\approx 10.840 \text{ mm}^3$ e de $\approx 17.216 \text{ mm}^3$ para as formas de seleção centralizada e aleatória, respectivamente. Para o PC, 67% das amostras atingiram o *VER* para ambas as formas de seleção até o volume $\approx 17.216 \text{ mm}^3$. Com isso é possível utilizar amostras com tamanho igual ou superior a este, para que sejam obtidas medidas representativas da *MAP* para o Latossolo Vermelho submetido aos dois sistemas de manejo estudados. No que se refere às análises de *VER* para o *NMAP*, uma relação linear foi observada entre os valores de *NMAP* por intervalo de volume de amostra, não sendo possível observar indícios de um *VER* para medidas do *NMAP* até o volume máximo de amostra analisado ($50.193,00 \text{ mm}^3$), para ambos os sistemas de manejo. No entanto, análises mostraram que a razão entre *NMAP* e volume de amostra (*NMAP* específico, *NMAP_e*) apresentou estabilização, possibilitando a identificação de um *VER* de $17.216,20 \text{ mm}^3$ pra medidas representativas deste atributo físico.

Referências

- AL-RAOUSH, R.; PAPADOPOULOS, A. Representative elementary volume analysis of porous media using X-ray computed tomography. **Powder Technology**, v. 200, n. 1-2, p. 69–77, 2010.
- ASANO, Y.; UCHIDA, T. Is representative elementary area defined by a simple mixing of variable small streams in headwater catchments? **Hydrological Processes**, v. 24, n. 5, p. 666–671, 28 fev. 2010.
- BARTOLI, F. et al. A multiscale study of silty soil structure. **European Journal of Soil Science**, v. 56, n. 2, p. 207–223, 2005.
- BAVEYE, P. et al. Effect of sampling volume on the measurement of soil physical properties: simulation with x-ray tomography data. **Measurement Science and Technology**, v. 13, n. 5, p. 775 – 784, 2002.
- BEAR, J. **Dynamics of fluids in porous media**. New York: Dover Publications, 1988.
- BEAR, J.; CHENG, A. H.-D. **Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport (Theory and Applications of Transport in Porous Media)**. Springer, 2010.
- BORGES, J. A. R.; PIRES, L. F. Representative elementary area (REA) in soil bulk density measurements through gamma ray computed tomography. **Soil and Tillage Research**, v. 123, p. 43–49, jul. 2012.
- BORGES, J. A. R.; PIRES, L. F.; COSTA, J. C. Representative Elementary Length to Measure Soil Mass Attenuation Coefficient. **The Scientific World Journal**, v. 2014, p. 9, 2014.

BORGES, J. A. R.; PIRES, L. F.; PEREIRA, A. B. Computed Tomography to Estimate the Representative Elementary Area for Soil Porosity Measurements. **The Scientific World Journal**, v. 2012, p. 10, jan. 2012.

CARTER, M. R. Spatial variability of soil porosity under reduced tillage in a Humo-Ferric Podzol. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 75, n. 1, p. 149–152, 19 fev. 1995.

COSTANZA-ROBINSON, M. S.; ESTABROOK, B. D.; FOUHEY, D. F. Representative elementary volume estimation for porosity, moisture saturation, and air-water interfacial areas in unsaturated porous media: Data quality implications. **Water Resources Research**, v. 47, n. 7, p. n/a–n/a, 8 jul. 2011.

FERREIRA, T. R.; BORGES, J. A. R.; PIRES, L. F. Representative elementary area for soil bulk density measurements of samples collected in volumetric rings by CT image analyses. **Soil and Tillage Research**, v. 152, p. 74–84, set. 2015.

HECK, R. J. X-ray Computed Tomography of Soil. In: RIBEIRO, M. R. et al. (Eds.). **Tópicos em Ciência do Solo**. 6. ed. Viçosa: SBCS, 2009. p. 31–70.

HELLIWELL, J. R. et al. Applications of X-ray computed tomography for examining biophysical interactions and structural development in soil systems: a review. **European Journal of Soil Science**, v. 64, n. 3, p. 279–297, 1 jun. 2013.

HILLEL, D. **Environmental Soil Physics: Fundamentals, Applications, and Environmental Considerations**. London: Academic Press, 1998.

JURY, W. A.; HORTON, R. C. N. **Soil physics**. 6th. ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley, 2004.

LI, J. H. et al. Permeability tensor and representative elementary volume of saturated cracked soil.(Report). **Canadian Geotechnical Journal**, 1 ago. 2009.

MARCOLAN, A. L.; ANGHINONI, I. Atributos físicos de um Argissolo e rendimento de culturas em função do revolvimento do solo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 1, p. 163–170, 2006.

MIYAZAKI, T. **Water Flow in Soils**. 2. ed. Boca Raton, Fl, USA: Taylor & Francis Group, 2005.

MOONEY, S. J. et al. Developing X-ray Computed Tomography to non-invasively image 3-D root systems architecture in soil. **Plant and Soil**, v. 352, n. 1-2, p. 1–22, 18 nov. 2011.

MÜLLER, C.; SIEGESMUND, S.; BLUM, P. Evaluation of the representative elementary volume (REV) of a fractured geothermal sandstone reservoir. **Environmental Earth Sciences**, v. 61, n. 8, p. 1713–1724, 2010.

OBALUM, S. E. et al. Spatial variability of uncultivated soils in derived savanna. **International Agrophysics**, v. 27, n. 1, 2013.

PEDROTTI, A. et al. Planosol soil sample size for computerized tomography measurement of

physical parameters. **Scientia Agricola**, v. 60, p. 735–740, 2003.

PIRES, L. F. et al. Twenty-five years of computed tomography in soil physics: A literature review of the Brazilian contribution. **Soil and Tillage Research**, v. 110, n. 2, p. 197–210, 2010.

RAB, M. A. et al. Evaluation of X-ray computed tomography for quantifying macroporosity of loamy pasture soils. **Geoderma**, v. 213, p. 460–470, 2014.

RASBAND, W. **ImageJ** Bethesda U.S. National Institutes of Health, , 2007. Disponível em: <<http://rsb.info.nih.gov/ij/index.html>>

RAZAVI, M. R.; MUHUNTHAN, B.; HATTAMLEH, O. Representative Elementary Volume Analysis of Sands Using X-Ray Computed Tomography. **Geotechnical Testing Journal**, v. 30, n. 3, p. 212–219, 2007.

ROGASIK, H. et al. Micro-scale dry bulk density variation around earthworm (*Lumbricus terrestris* L.) burrows based on X-ray computed tomography. **Geoderma**, v. 213, p. 471–477, 2014.

SOUZA, Z. M. DE; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T. Spatial variability of the physical and mineralogical properties of the soil from the areas with variation in landscape shapes. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 52, n. 2, p. 305–316, 1 abr. 2009.

TIPPKÖTTER, R. et al. Detection of soil water in macropores of undisturbed soil using microfocus X-ray tube computerized tomography (μ CT). **Soil and Tillage Research**, v. 105, n. 1, p. 12–20, set. 2009.

VANDENBYGAART, A. J.; PROTZ, R. The representative elementary area (REA) in studies of quantitative soil micromorphology. **Geoderma**, v. 89, n. 3-4, p. 333–346, maio 1999.

5. Volume elementar representativo de atributos micromorfológicos do solo via microtomografia de raios X: Parte 2. Tortuosidade e conectividade

Resumo

Nesta pesquisa, imagens de microtomografia de raios X foram utilizadas para o estudo do volume elementar representativo (*VER*) da tortuosidade (τ) e da conectividade (*C*) dos macroporos de um Latossolo Vermelho, submetido aos sistemas de manejo de plantio direto (PD) e plantio convencional (PC). Foi avaliada a estrutura interna de seis amostras de solo para cada manejo, a partir de imagens com resolução espacial de 60 μm . Para as análises de *VER* foram definidos dez subvolumes a partir do centro da amostra - em posições concêntricas - e selecionados em posições aleatórias (3 repetições), variando de $\approx 0,40$ a $\approx 36.591 \text{ mm}^3$, em um volume total de imagem de $\approx 39 \times 39 \times 33 \text{ mm}^3$. A estimativa do grau de conectividade dos macroporos foi realizada por meio de valores médios da característica de Euler-Poincaré ($\overline{CEP}$). Para a definição do *VER*, os seguintes critérios foram adotados: (i) diferença relativa entre o valor do atributo físico medido em um determinado subvolume e o obtido para o volume total da amostra (referência) não superior a 10%; (ii) que pelo menos três subvolumes consecutivos não apresentem diferença entre si nos valores de τ ou $\overline{CEP}$, utilizando o critério de variação do Item (i). Os resultados de τ e $\overline{CEP}$, em função do volume de amostra, apresentaram maior variabilidade para os menores subvolumes e forma aleatória de seleção. Para medidas da τ do solo sob os dois sistemas de manejo, considerando as diferentes direções, sentidos e formas de seleção dos subvolumes, o *VER* foi de 17.216,20 mm^3 . No entanto, para a $\overline{CEP}$ não foram observados indícios de estabilização em função do volume de amostra analisado.

Representative elementary volume of soil micromorphological attributes via X-ray microtomography: Parte 2. Tortuosidade e conectividade

Abstract

In this study, microtomographic images were used in evaluations of representative elementary volume (*REV*) for tortuosity (τ) and connectivity (*C*) of macropores from a Rhodic Ferralsol under no-till (NT) and conventional till (CT) systems. The pore space of six samples of each management system were evaluated from microtomographic images with spatial resolution of

60 μm . For *REV* analyzes, ten subvolumes were selected centrally - in concentric positions starting at the center of the samples - and randomly (3 repetitions), ranging from ≈ 0.40 to $\approx 36,591 \text{ mm}^3$, within a total image volume of $\approx 39 \times 39 \times 33 \text{ mm}^3$. The *C* degree was estimated based on the Euler-Poincaré characteristic ($\overline{EPC}$). To define the *REV*, the following criteria were adopted: (i) relative deviation between the measured property value in a particular subvolume and the obtained value for the total sample volume (reference) not exceeding 10%; (ii) that at least three consecutive subvolumes show no difference in τ or $\overline{EPC}$ values, using the variation criterion of Item (i). The results of τ and $\overline{EPC}$ as a function of the sample volume presented higher variability for the smaller subvolumes and random selection method. For soil τ measurements under the two management systems, considering the different directions, ways and selection methods of subvolumes, the *REV* was $17,216.20 \text{ mm}^3$. However, for $\overline{EPC}$, it was not observed evidence of stabilization up to the maximum analyzed sample volume in this study.

5.1. Introdução

O manejo adequado do solo é fundamental para a produção agrícola sustentável e sem que ocorra um aumento expressivo da área cultivada. Neste sentido, a caracterização física e química do solo frente ao seu manejo é de suma importância para indicar se o mesmo apresenta condições favoráveis para o cultivo agrícola (PEDROTTI; JUNIOR, 2009). Em especial, o estudo dos macroporos do solo possibilita inferir quanto a atributos tais como infiltração e retenção da água no solo, bem como a avaliação do desenvolvimento dos sistemas radiculares (RAB et al., 2014). Muitas atributos do espaço poroso do solo podem ser determinadas por meio de métodos tradicionais de medida (BLAKE; HARTGE, 1986). No entanto, atributos importantes como tortuosidade (τ) e conectividade (*C*) podem ser obtidos a partir de imagens 3D de microtomografia de raios X (μTC) (DAL FERRO et al., 2014).

Uma vez que τ caracteriza a sinuosidade dos poros, ela pode ser definida como a razão entre o comprimento médio dos poros e o comprimento da amostra de solo. Portanto, τ é um parâmetro geométrico adimensional do meio poroso. Seu valor será sempre maior que 1 e pode exceder 2 (LAL; SHUKLA, 2004).

A conectividade (*C*) é um atributo geométrico que oferece informações sobre a distribuição do espaço poroso, uma vez que esta é uma medida do número de caminhos independentes entre dois pontos no espaço poroso e, logo, caracteriza o grau de interconexão dos poros (DULLIEN, 1992). Um índice que pode oferecer uma estimativa do grau de

conectividade é a característica de Euler-Poincaré (*CEP*). A *CEP* é invariante sob deformação ou sob mudança de escala do objeto (ROQUE; ARCARO; LANFREDI, 2012).

A tortuosidade e a conectividade dos poros estão diretamente relacionadas a processos de transporte de solutos e gases no solo, bem como influenciam no crescimento e desenvolvimento do sistema radicular. O caminho a ser percorrido para o transporte de solutos será mais irregular e sinuoso, quanto mais tortuosos forem os poros. Assim, a τ também está relacionada, por exemplo, à capacidade de determinada superfície do solo dificultar processos erosivos. Da mesma forma, o escoamento de fluidos será influenciado se os poros não estiverem bem conectados ou se alguns deles não forem acessíveis (BERTOL et al., 2006; LAL; SHUKLA, 2004).

Utilizando imagens 3D de microtomografia de raios X, com resolução espacial da ordem de micrômetros, a presente pesquisa foi realizada tendo em vista os seguintes objetivos: 1) caracterizar a tortuosidade e a conectividade do sistema macroporoso de um Latossolo Vermelho argiloso, submetido aos sistemas de manejo de plantio direto (PD) e plantio convencional (PC); 2) investigar o comportamento da τ e da C em função do volume da amostra; 3) verificar a possibilidade de definir um *VER* para medidas de τ e da C ; 4) avaliar a influência da forma de seleção dos subvolumes (aleatória e centralizada) na definição do *VER* para estes dois atributos; 5) analisar o efeito do sistema de manejo do solo sobre os resultados de *VER* obtidos.

5.2. Material e métodos

Os estudos apresentados na sequência foram conduzidos conforme os procedimentos descritos na seção “Material e métodos” dos Capítulos 3 (solo e imagens de μ TC) e 4 (Item 4.2.1: “Seleção dos tamanhos e processo de recorte dos subvolumes”). As análises de τ e C dos poros foram realizadas utilizando o programa *OsteoImage* (ROQUE et al., 2007), fundamentado na teoria que será brevemente descrita a seguir.

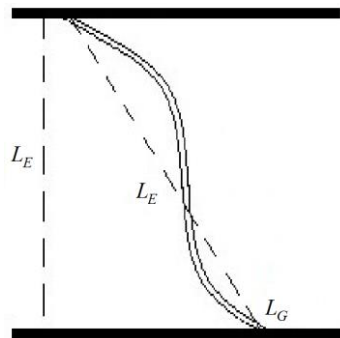
5.2.1. Medidas de tortuosidade (τ)

A partir de imagens de μ TC segmentadas, τ foi calculada por meio da técnica de reconstrução geodésica (RG), aplicando a seguinte equação:

$$\tau = \frac{L_G}{L_E}. \quad (5.1)$$

em que a distância Geodésica (L_G) é dada pelo comprimento do filamento e a distância Euclidiana (L_E) pode ser dada pelo comprimento em linha reta entre dois pontos que caracterizem a estrutura, ou entre dois planos paralelos que a englobem (Figura 5.1) (ROQUE; ARCARO; FREYTAG, 2011). No presente trabalho foi utilizada a distância Euclidiana entre dois planos paralelos.

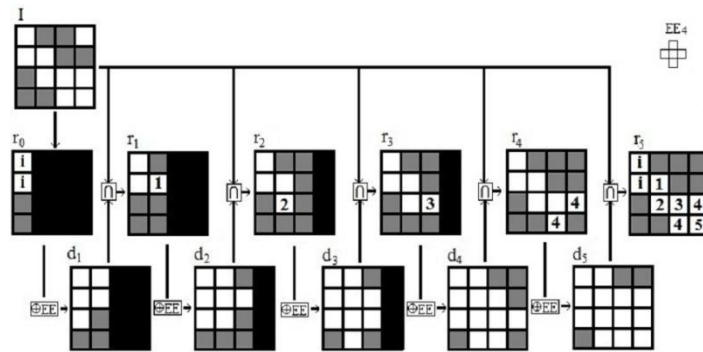
Figura 5.1: Distância geodésica (L_G) e distância Euclidiana (L_E), tomada entre planos ou entre pontos.



Fonte: Adaptado de Roque; Arcaro e Freytag (2011).

A RG reconstrói uma imagem *pixel* por *pixel*, crescendo na direção principal do poro. Assim, o número de reconstruções irá depender do quão sinuoso for o poro. Para imagens 2D, um elemento estruturante de 4 (EE₄) ou 8 (EE₈) vizinhos pode ser adotado. Por exemplo, considerando uma imagem I onde os poros são representados por *pixels* brancos e a matriz do solo por *pixels* pretos, e assumindo uma linha de varredura na coluna $x=0$ (sentido $x+$) e um elemento estruturante de 4 vizinhos, o algoritmo gera uma nova imagem (r_0) repetindo a primeira coluna com *pixels* brancos; r_0 é então dilatada gerando a imagem d_1 (Figura 5.2). Em seguida, r_0 e d_1 são interseccionadas (r_1). Este processo é repetido até que a imagem dilatada resulte em uma interseção nula com I. Neste processo, os *pixels* da imagem reconstruída assumirão valor 1 apenas se em ambas as imagens eles apresentarem esse mesmo valor. Os poros sem conexão com a linha inicial de varredura são ignorados pelo algoritmo.

Figura 5.2: Algoritmo de reconstrução geodésica (RG) para uma imagem bidimensional de 4×4 pixels e utilizando um elemento estruturante de 4 vizinhos (EE₄). O número da RG está indicado no interior de cada pixel.



Fonte: Arcaro (2013).

Em imagens 3D, o procedimento é o mesmo para o caso 2D, com a diferença de que a linha inicial de varredura corresponde agora a um plano varredor, que pode assumir os sentidos positivo e negativo de x, y e z, com 6, 18 ou 26 vizinhos. Também, da mesma forma, os poros não conectados ao plano inicial de varredura não são considerados.

Com este procedimento, são determinados os valores de L_E e L_G para cada *voxel*. Assim, para cada valor de L_E pode-se calcular a média de L_G $\langle L_G \rangle$. A partir do gráfico de $L_E \times \langle L_G \rangle$, a declividade da reta de ajuste fornece a estimativa da tortuosidade da estrutura investigada. Maiores detalhes podem ser encontrados em Arcaro (2013).

No presente trabalho foram obtidos valores de tortuosidade para as direções x, y e z, nos sentidos positivo e negativo, denotados por: τ_{x+} , τ_{x-} , τ_{y+} , τ_{y-} , τ_{z+} e τ_{z-} . A partir desses resultados, foram calculados os desvios de tortuosidade direcional (DTD_x , DTD_y e DTD_z) para cada uma das direções de análise, conforme metodologia descrita em Passoni (2013):

$$DTD = |\tau_+ - \tau_-|. \quad (5.2)$$

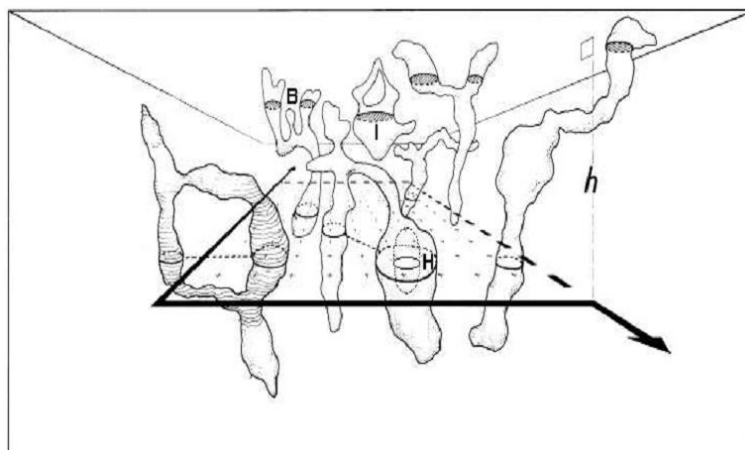
A estatística descritiva foi aplicada para a análise do conjunto de dados [média (n=6) e desvio padrão (σ)] (MONTGOMERY et al., 2006).

5.2.2. Determinação da Característica de Euler-Poincaré (CEP)

A CEP foi calculada para pares de imagens de μ TC paralelas e suficientemente próximas (disector), a partir das quais o comportamento geométrico-topológico dos poros no espaço entre elas possa ser inferido.

O algoritmo para estimativa da *CEP* consiste na varredura de uma estrutura 3D pelo disector. Os eventos topológicos de tangência de elementos convexos, côncavos e de sela que ocorrerem podem ser detectados pela comparação das seções planas do disector: 1) a tangência de elementos convexos ocorre quando uma forma termina ou começa entre os planos e aparece em apenas uma das imagens, o que caracteriza o surgimento de um objeto (N); 2) a tangência de elemento côncavo ocorre quando vazios dentro de um poro continuam, começam, terminam ou se ramificam, o que gera uma cavidade (H) e, 3) a tangência de elemento de sela ocorre quando uma forma se ramifica e intersecciona uma única vez um plano e duas ou mais o outro, causando uma ramificação (B) (Figura 5.3) (ARCARO, 2009).

Figura 5.3: Volume de uma estrutura amostrado pelo disector. h corresponde ao espaçamento entre as seções planas; I, aos eventos de ilha; B, às ramificações e H, às cavidades fechadas.



Fonte: Arcaro (2009).

Considerando as tangências de elementos convexos e côncavos como eventos positivos (+), e as de elementos de sela como negativos (-), a relação entre N, H e B é definida como a *CEP* da estrutura analisada:

$$CEP = N - B + H. \quad (5.3)$$

Para uma estrutura 3D, a *CEP* é definida pelo número de partes isoladas menos a conectividade, conforme a Equação 5.4:

$$CEP = N - C. \quad (5.4)$$

Sendo assim, valores elevados de *CEP* indicam que o sistema apresenta baixa conectividade, enquanto valores baixos indicam melhor conectividade (ROQUE; ARCARO;

LANFREDI, 2012). A soma dos valores de CEP em cada disector de uma amostra fornece uma aproximação do número de conexões redundantes na estrutura.

5.2.3. Análise dos dados

Foram obtidos resultados de τ e CEP para os dez subvolumes analisados (volumes de 0,40 a 36.590,70 mm³) (Capítulo 4, Item 4.2.1). A partir da planilha de resultados, foram calculados os valores médios da CEP ($\overline{CEP}$) para cada subvolume. τ foi obtida diretamente para cada subvolume, nas direções e sentido analisados.

Foram construídos gráficos de τ e de $\overline{CEP}$ em função do volume de imagem para os sistemas de manejo de plantio direto (PD) e plantio convencional (PC). Para os subvolumes aleatórios, os valores de τ e CEP correspondem à média de três repetições. Para estudar o comportamento destes resultados foram calculados os desvios relativos (DR), entre os valores destes atributos para cada subvolume (τ_i ou $\overline{CEP}_i$), e o valor obtido para o volume total da imagem (τ_{VT} ou $\overline{CEP}_{VT}$), o qual foi adotado como valor de referência:

$$DR(\%) = \left(\frac{\tau_{VT} - \tau_i}{\tau_{VT}} \right) \cdot 100 \quad \text{e} \quad DR(\%) = \left(\frac{\overline{CEP}_{VT} - \overline{CEP}_i}{\overline{CEP}_{VT}} \right) \cdot 100. \quad (5.5)$$

Os critérios para a definição do VER para as medidas de τ e $\overline{CEP}$ foram estabelecidos conforme a metodologia proposta por Vandenbygaart e Protz (1999):

- (i) DR não superior a 10% de acordo com a Equação 5.5;
- (ii) Ao menos três subvolumes consecutivos não devem diferir entre si nos valores de τ ou $\overline{CEP}$, utilizando o critério de variação do Item (i).

5.3. Resultados e discussão

5.3.1. Tortuosidade (τ)

Na Tabela 5.1 são apresentados os resultados de τ para os sistemas de manejo de PD e PC. Pode-se observar uma diferença sutil entre os resultados obtidos para as amostras de um mesmo sistema de manejo, bem como para a maioria das direções e sentidos dentro de uma mesma amostra (para o PD apenas a Am 04 apresentou $DTD_y=0$ e, para o PC, a Am 02 apresentou $DTD_z=0$).

É possível observar também que para o PD, 50% das amostras (Am 01, Am 04 e Am 05) apresentaram maior tortuosidade no sentido positivo da direção x (τ_{x+}). Para as amostras 02, 03 e 06 a maior tortuosidade ocorreu em τ_{y+} , τ_{x-} e τ_{z+} , respectivamente. Dentre todas as amostras de PD, a Am 05 apresentou o maior valor de tortuosidade ($\tau_{x+}=1,89$), enquanto o menor valor foi observado para a Am 06 ($\tau_{x-}=1,23$). As amostras 05 e 06 foram também as quais apresentaram, respectivamente, o maior e o menor valor médio de todas as direções e sentidos, com os maiores valores de σ (Am 05: $\bar{\tau}=1,64\pm0,19$; Am 06: $\bar{\tau}=1,36\pm0,11$).

Tabela 5.1: Tortuosidade horizontal ($x+$, $x-$, $y+$, $y-$) e vertical dos poros ($z+$, $z-$) para os sistemas de manejo de plantio direto (PD) e plantio convencional (PC). DTD indica o desvio da tortuosidade direcional entre ambos os sentidos (+ e -), para uma mesma direção.

Manejo	Amostra	τ_{x+}	τ_{x-}	DTD_x	τ_{y+}	τ_{y-}	DTD_y	τ_{z+}	τ_{z-}	DTD_z	$\bar{\tau}$	σ
PD	01	1,56	1,49	0,07	1,46	1,51	0,05	1,50	1,53	0,03	1,51	0,03
	02	1,51	1,53	0,02	1,64	1,59	0,05	1,54	1,61	0,07	1,57	0,05
	03	1,48	1,51	0,03	1,42	1,49	0,07	1,50	1,45	0,05	1,48	0,03
	04	1,54	1,40	0,14	1,50	1,50	0,00	1,42	1,44	0,02	1,47	0,05
	05	1,89	1,85	0,04	1,52	1,55	0,03	1,57	1,43	0,14	1,64	0,19
	06	1,26	1,23	0,03	1,36	1,38	0,02	1,51	1,44	0,07	1,36	0,11
PC	01	1,44	1,45	0,01	1,44	1,41	0,03	1,45	1,46	0,01	1,44	0,02
	02	1,48	1,53	0,05	1,58	1,68	0,10	1,68	1,68	0,00	1,61	0,09
	03	1,64	1,53	0,11	1,68	1,65	0,03	1,48	1,76	0,28	1,62	0,10
	04	1,48	1,47	0,01	1,37	1,39	0,02	1,44	1,45	0,01	1,43	0,04
	05	1,42	1,50	0,08	1,53	1,78	0,25	1,66	1,71	0,05	1,60	0,14
	06	1,50	1,37	0,13	1,39	1,41	0,02	1,47	1,45	0,02	1,43	0,05

Fonte: A autora.

Nota: $\bar{\tau}$: tortuosidade média de todas as direções e sentidos; σ : desvio padrão.

Comparando com os resultados apresentados para o PD no Capítulo 3 (Figura 3.6b), as amostras 05 e 06 foram justamente as quais apresentaram o maior e o menor $NMAP$, respectivamente. Com isso, para estas duas amostras é possível associar maiores valores de τ a maiores $NMAPs$, e vice-versa. No entanto, as demais amostras não seguiram um padrão específico, como o observado para estes dois casos extremos.

Com exceção das amostras 04 (DTD_x) e 05 (DTD_z), todos os DTDs apresentaram diferença apenas a partir da segunda casa decimal. Este resultado indica certa homogeneidade na distribuição dos poros das amostras, no que se refere à sinuosidade dos poros nas diferentes direções e sentidos. Os baixos valores de σ confirmam esta hipótese.

No PC, 50 % das amostras apresentaram maiores τ na direção z- (τ_{z-}) (Am 01, Am 02 e Am 03), sendo que a Am 02 apresentou o mesmo valor de τ_{y-} , τ_{z+} e τ_{z-} ($DTD_z=0$). As

amostras 04 e 06 apresentaram maiores τ em x^+ , enquanto que apenas para a Am 05 τ_{y-} foi maior. Ao comparar todas as amostras de PC, a maior tortuosidade foi de 1,78, a qual ocorreu para a Am 05 em y^- . A menor, coincidentemente com o PD, também ocorreu para a Am 06 em x^- ($\tau_{x-}=1,37$). No entanto, a Am 03 foi a qual apresentou o maior $\bar{\tau}$ (1,62), enquanto que as amostras 04 e 06 apresentaram o menor valor ($\bar{\tau}=1,43$). Os valores de σ para essas amostras também foram baixos, sendo que apenas para as amostras 03 e 05 foi observada diferença a partir da primeira casa decimal (Tabela 5.1).

Quando comparado aos resultados de *NMAP*, um comportamento similar ao observado para as amostras de PD que apresentaram valores extremos de $\bar{\tau}$, foi observado para o PC. A diferença foi que a amostra que apresentou o menor *NMAP* teve o segundo menor valor de $\bar{\tau}$ (Am 01). No entanto, para a Am 03 o padrão foi mantido (maior *NMAP* e τ).

Nas Figura 5.4 e 5.5 são apresentados os gráficos de τ em função do volume (V) para a Am 01 do PD e para a Am 03 do PC, para todas as direções e sentidos estudados. A decisão de apresentar os gráficos de apenas uma amostra para cada sistema de manejo foi devido ao grande número de gráficos gerados para cada um destes, uma vez que se tratam de seis gráficos para cada amostra (três direções e dois sentidos de análise). Essas amostras foram selecionadas por apresentarem os valores de *MAP* mais próximos ao da $\overline{MAP}$ de cada manejo.

Assim como nos gráficos de *MAP* em função do volume (V) (Capítulo 4), a maior variabilidade foi observada entre os valores de τ obtidos para os subvolumes que apresentam menor tamanho. Da mesma forma, estas variações não apresentaram um padrão específico e são mais pronunciadas para a forma aleatória de seleção, quando comparadas às obtidas para a forma centralizada.

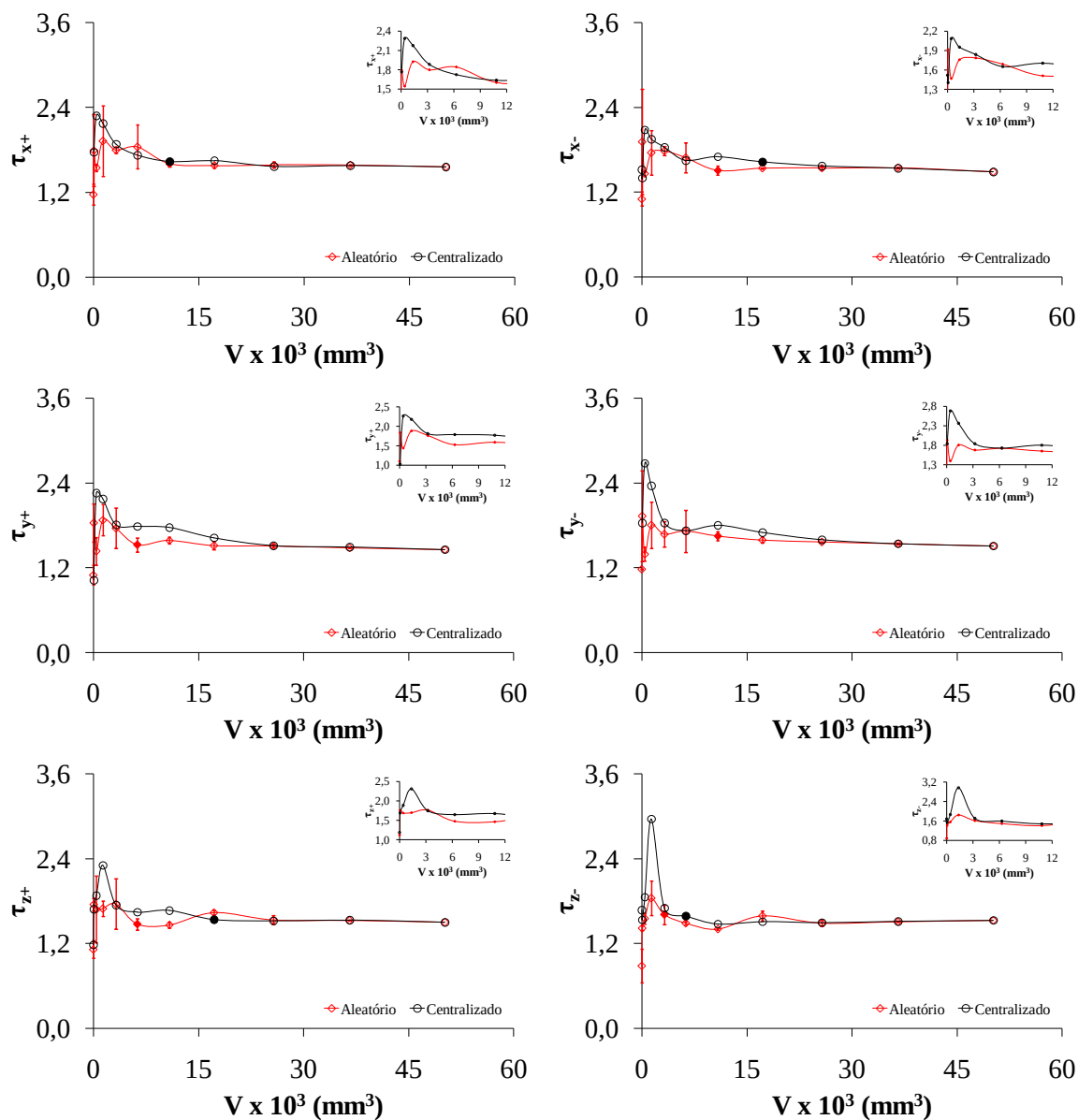
Para o PD, a Am 01 atingiu o *VER* no 7º subvolume analisado (10.841,69 mm³) para o sentido positivo da direção x e formas aleatória e centralizada de seleção (Figura 5.4). Para τ_{x-} , τ_{z+} e τ_{z-} , o *VER* também foi atingido para ambas as formas de seleção. No entanto, para esses casos, o subvolume necessário para o *VER* e forma aleatória de seleção sempre foi menor que aquele para a seleção centralizada (marcadores preenchidos mostrados na Figura 5.4). Para τ_{y+} e τ_{y-} o *VER* foi atingido apenas para a forma aleatória de seleção.

Para o PC, a Am 03 atingiu o *VER* para ambas as formas de seleção apenas para τ_{x-} e τ_{y-} (Figura 5.5). Ao contrário do observado para a Am 01 (PD), nestes dois casos o volume necessário para o *VER* foi menor para seleção aleatória, quando comparada à centralizada. Para as demais direções e sentidos, o *VER* foi atingido apenas para a seleção centralizada, no 6º (τ_{y+}) e 7º subvolumes (τ_{x+} , τ_{z+} e τ_{z-}). Esse fato indica uma maior variabilidade na tortuosidade desta amostra, para todas as direções e sentidos.

Como previamente comentado, a Am 03 foi selecionada devido a apresentar *MAP* mais próxima à $\overline{MAP}$. No entanto, essa é a amostra que apresenta o maior *NMAP*. Pode-se também observar, a partir dos gráficos da Figura 5.5, que a variabilidade nos valores de τ para todas as direções, sentidos e formas de seleção é maior quando comparada à Am 01 (PD) (Figura 5.4). No entanto, a variabilidade dos resultados da seleção aleatória é ainda mais pronunciada.

Em adição ao alto *NMAP* da Am 03 (PC), a variabilidade dos resultados de τ por V, obtidos a partir das diferentes formas de seleção, pode ser explicada pela possibilidade da forma aleatória de seleção englobar tanto regiões com distribuição mais homogênea de τ , como com distribuição discrepante das demais, uma vez que se trata da média de três medidas, realizadas em localizações randômicas na amostra. Por sua vez, a forma centralizada de seleção sempre engloba os menores subvolumes dentro dos maiores, ou seja, à medida que o tamanho de amostra cresce para esta forma de seleção, as regiões dos subvolumes menores sempre serão contabilizadas nos maiores. Com isso, para a Am 03 (PC) em especial, a grande diferença nos resultados de *VER* para τ em função da forma de seleção dos subvolumes, indica que a distribuição deste atributo não se dá de forma homogênea para diferentes regiões da amostra.

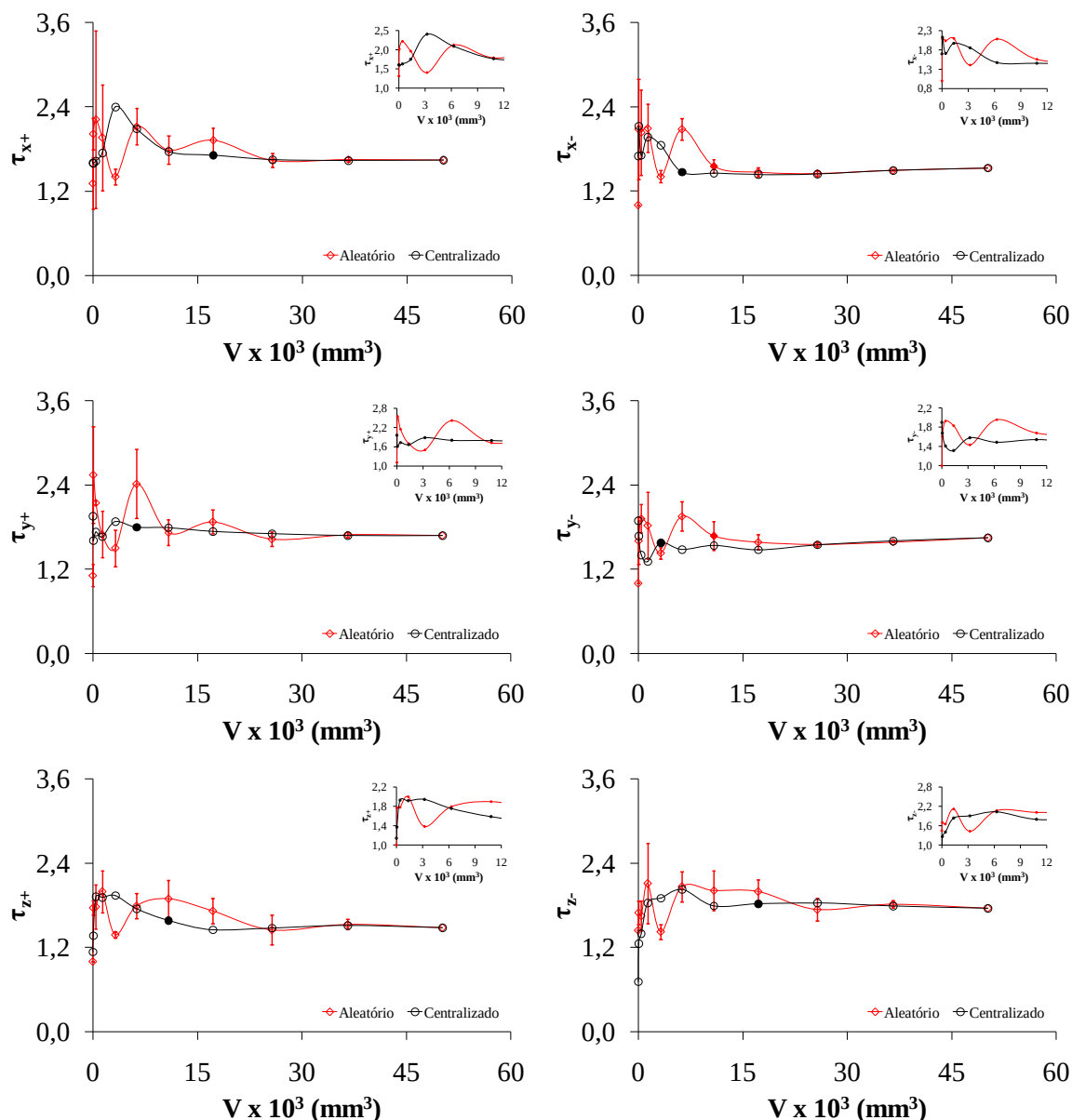
Figura 5.4: Gráficos de tortuosidade (τ) em função do volume (V) da Am 01 sob plantio direto (PD). O marcador preenchido indica o volume elementar representativo (VER) para cada direção e sentido de análise (x^+ , x^- , y^+ , y^- , z^+ , z^-), bem como para cada forma de seleção dos subvolumes (aleatória ou centralizada). Os gráficos em escala reduzida representam uma ampliação da região correspondente aos menores subvolumes analisados.



Fonte: A autora.

Nota: Para a forma de seleção aleatória (curva em vermelho) são apresentadas as barras de desvio padrão, correspondentes às três repetições realizadas.

Figura 5.5: Gráficos de tortuosidade (τ) em função do volume (V) da Am 03 sob plantio convencional (PC). O marcador preenchido indica o volume elementar representativo (VER) para cada direção e sentido de análise (x^+ , x^- , y^+ , y^- , z^+ , z^-), bem como para cada forma de seleção dos subvolumes (aleatória ou centralizada). Os gráficos em escala reduzida representam uma ampliação da região correspondente aos menores subvolumes analisados.



Fonte: A autora.

Nota: Para a forma de seleção aleatória (curva em vermelho) são apresentadas as barras de desvio padrão, correspondentes às três repetições realizadas.

O estudo do VER para todas as amostras sob PD (Figura 5.6) revelou que para τ_{x^+} , τ_{x^-} e τ_{z^-} , 83% das amostras alcançaram a estabilização para ambas as formas de seleção. Este resultado indica que a maioria das amostras apresenta maior homogeneidade nestas direções e sentidos, independentemente da região selecionada na amostra (centralizada ou em localizações aleatórias). Para τ_{y^+} e τ_{y^-} , 83% das amostras atingiram o VER para a forma aleatória de seleção. No entanto, apenas 50% das amostras atingiram para a seleção

centralizada, indicando que a τ do centro das amostras apresenta maior variabilidade em τ_{y+} e τ_{y-} , quando comparado a regiões localizadas aleatoriamente nas imagens. Para τ_{z+} , 67% das amostras atingiram o *VER* para ambas as formas de seleção.

O menor subvolume necessário para todas as amostras sob PD, que atingiram o *VER* para as formas de seleção centralizada e/ou aleatória, foram: 10.841,69 mm³ (τ_{x+} , τ_{y+} e τ_{y-}) e 17.216,20 mm³ (τ_{x-} , τ_{z+} e τ_{z-}). Ou seja, esses resultados indicam que, por exemplo, a estabilização em ambos os sentidos da direção y ocorre para todas as amostras que apresentaram um *VER* até um tamanho de subvolume menor (7º subvolume), quando comparado a ambos os sentidos da direção z (8º subvolume). Neste caso, τ em y+ e y- apresenta menor variabilidade quando comparada a τ em z+ e z-.

O sentido positivo da direção z (z+) corresponde à análise em profundidade da amostra, ou seja, do topo para a base (no caso do presente estudo, de 0,05 para 0,10 m de profundidade). Com isso, pode-se concluir que para z+, 67% das amostras apresentam estabilização nos valores de τ dos poros a 10% de variação, para volumes de amostra maiores ou iguais a 17.216,20 mm³.

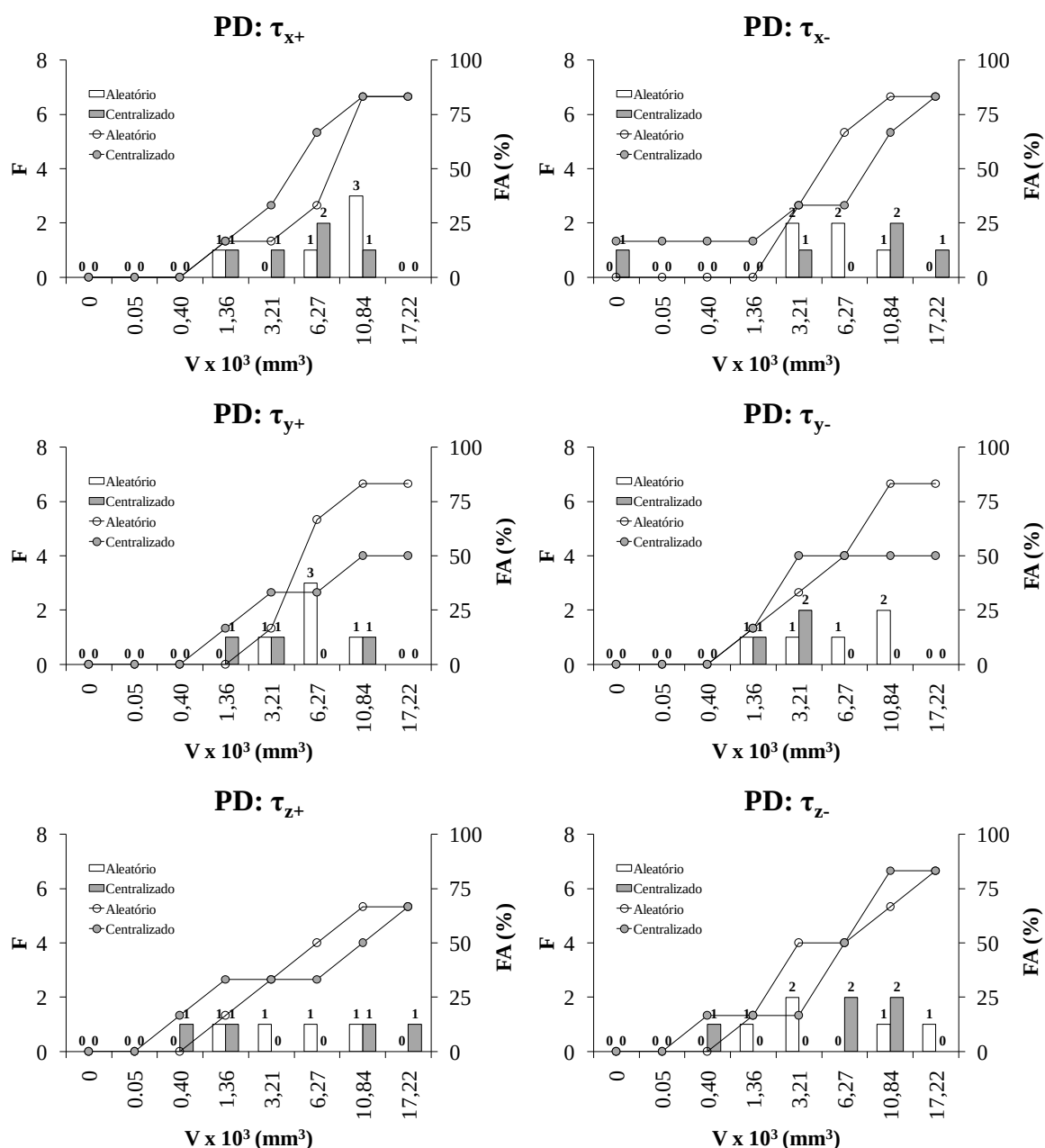
Para o PC (Figura 5.7), 100% das amostras atingiram o *VER* para τ_{x-} e τ_{y-} , para ambas as formas de seleção. Para τ_{z-} , apenas a Am 03 não atingiu o *VER* para a seleção aleatória; para τ_{x+} e τ_{z+} , 67 e 83 % das amostras atingiram o *VER* para a seleção aleatória e centralizada, respectivamente; para τ_{y+} , 83% das amostras atingiram o *VER* para ambas as formas de seleção. Esses resultados demonstram que a maioria das amostras sob PC apresentaram comportamento mais regular de τ , quando comparadas às de PD. Por exemplo, para τ_{z-} e seleção centralizada, todas as amostras atingiram o *VER* até o 6º subvolume (6.274,13 mm³).

Novamente, a maior regularidade dos resultados pode ser explicada pela homogeneização da estrutura do solo sob PC devido ao processo de revolvimento do mesmo, conforme discutido no Capítulo 3 (MARCOLAN; ANGHINONI, 2006). Assim como para τ , quando comparados os resultados de *VER* nas análises de *MAP*, foi observada uma maior regularidade nas amostras sob PC, para as duas formas de seleção. Isso ocorre, principalmente, pelo fato das amostras terem sido coletadas na camada superficial do solo. Essa camada é a mais afetada no manejo PC (ALVAREZ; STEINBACH, 2009; CRITTENDEN et al., 2015; SALEM et al., 2015).

No entanto, para os dois sistemas de manejo, considerando as diferentes direções, sentidos e formas de seleção dos subvolumes, o menor tamanho necessário para que todas as amostras que atingiram o *VER* para medidas de τ o fizessem, foi o 8º subvolume (17.216,20 mm³). Esse subvolume também foi o menor necessário para medidas representativas da *MAP*

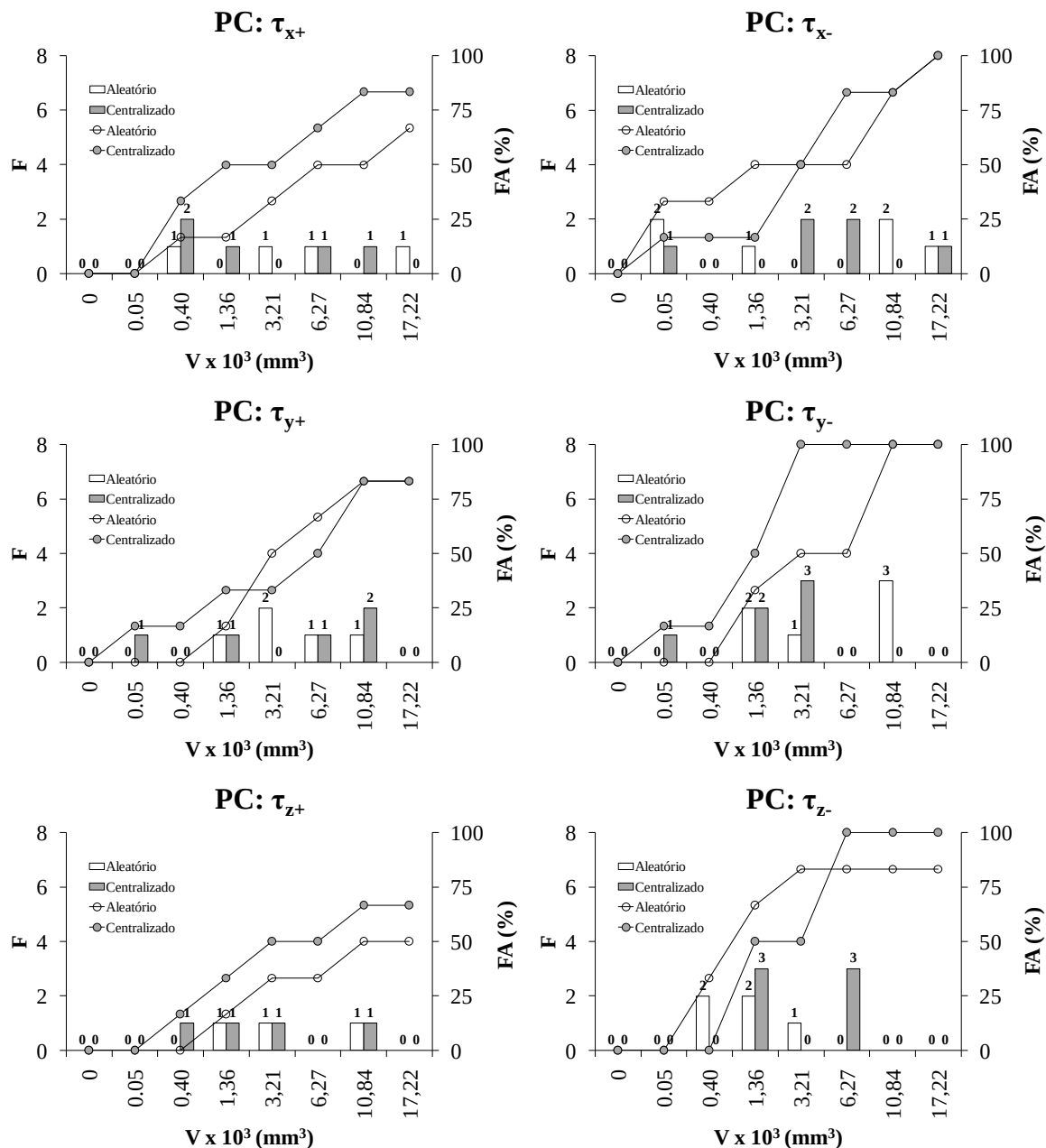
para PD e PC, simultaneamente. Com isso, é possível utilizar amostras com tamanho igual ou superior a este, para que sejam obtidas medidas representativas τ e MAP para o solo submetido aos dois sistemas de manejo estudados.

Figura 5.6: Gráficos de frequência (F) e frequência acumulada (FA) em função do volume representando o número de amostras que atingiram o volume elementar representativo (VER) para a tortuosidade (τ) em cada direção e sentido de análise (x^+ , x^- , y^+ , y^- , z^+ , z^-). Os resultados são apresentados para as formas de seleção de subvolumes centralizada e aleatória, para o sistema de manejo de plantio direto (PD).



Fonte: A autora.

Figura 5.7: Gráficos de frequência (F) e frequência acumulada (FA) em função do volume representando o número de amostras que atingiram o volume elementar representativo (VER) para a tortuosidade (τ) em cada direção e sentido de análise (x^+ , x^- , y^+ , y^- , z^+ , z^-). Os resultados são apresentados para as formas de seleção de subvolumes centralizada e aleatória, para o sistema de manejo de plantio convencional (PC).



Fonte: A autora.

5.3.2. Característica de Euler-Poincaré (CEP) e conectividade (C)

Os gráficos apresentados nas Figura 5.8 (PD) e 5.9 (PC) mostram que, para as duas formas de seleção, de uma forma geral foi observado um aumento progressivo nos valores de CEP em função do volume, para a maioria das amostras analisadas. Assim como para as

demais análises de *VER* apresentadas neste trabalho, a maior variabilidade nos resultados foi observada para os menores subvolumes e forma aleatória de seleção.

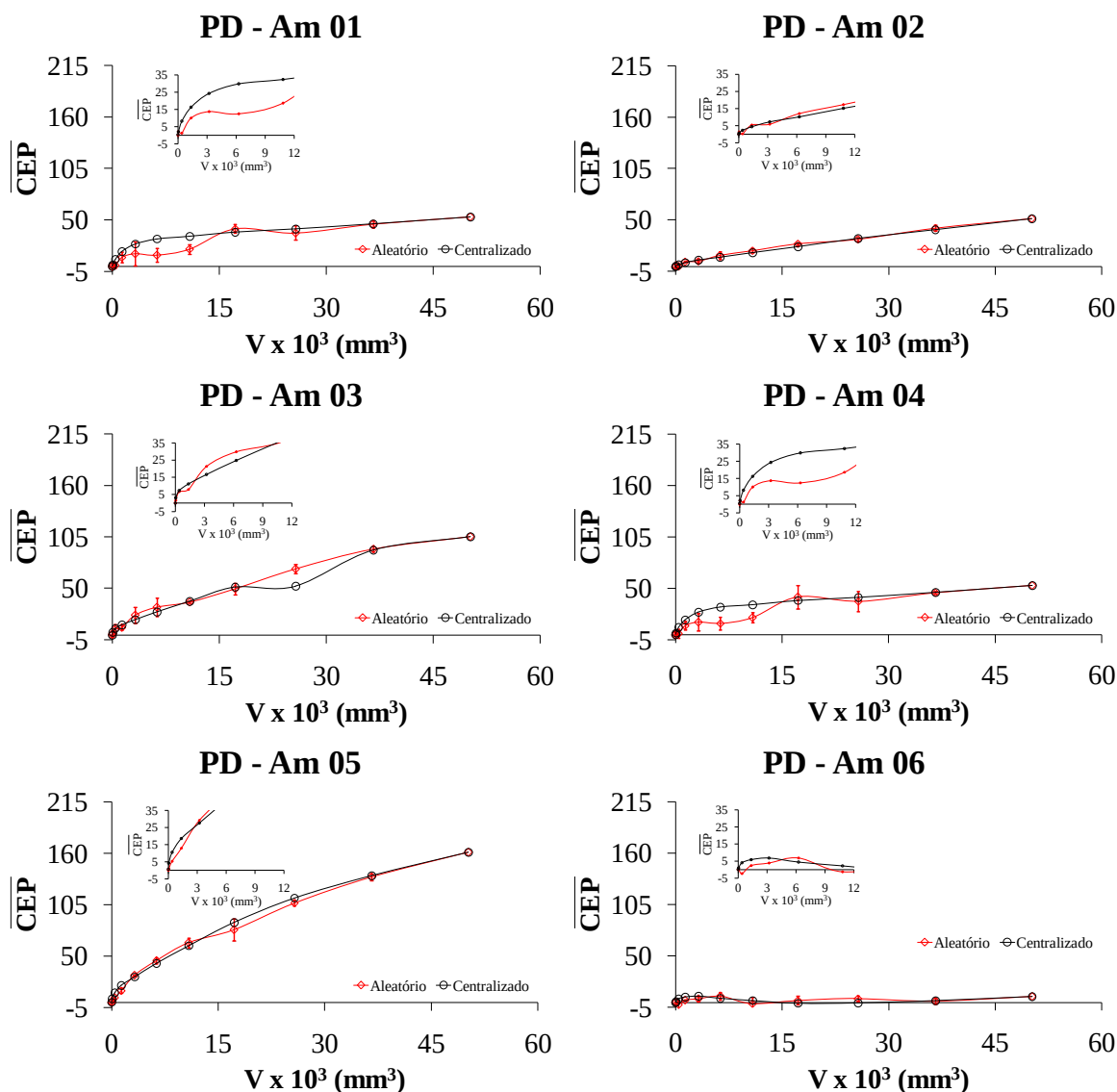
Esse aumento progressivo nos valores de *CEP* indica que, em média, a conectividade dos poros diminui para maiores volumes de amostra. Analisando os casos extremos, para o PD os maiores valores de *CEP* para o volume total da amostra foram observados para a Am 5 ($\overline{CEP} \approx 161$), indicando uma pior conectividade na estrutura porosa desta amostra, quando comparada às demais. As menores *CEP* ocorreram para a Am 06 ($\overline{CEP} \approx 6$) (relacionadas à maior conectividade). Para o PC, os maiores valores de *CEP* foram observados para as amostras 03-06, enquanto que os menores ocorreram para as amostras 01 e 02.

A maior conectividade observada para os menores subvolumes pode estar relacionada com o fato de que a região de seleção destes pode influenciar a *CEP* dependendo do tipo de solo e manejo. Caso o meio poroso apresente uma estrutura porosa com concentrações de poros em regiões específicas, a escolha dessa região com menores subvolumes irá fornecer menores valores de *CEP*. A escolha de maiores subvolumes irá, no entanto, englobar as áreas com maiores e menores concentrações de poros aumentando os valores de *CEP*.

É importante ressaltar que os resultados de conectividade aqui obtidos se referem à análise em profundidade na amostra (z^+). A partir desses, para a Am 05 (PD) fica evidente a relação inversa entre τ e *C*. A Am 06 apresentou valor de τ_{z^+} inferior ao observado para a Am 05, no entanto, este não corresponde ao mínimo valor observado entre todas as amostras de PD.

Assim como para as análises de *VER* para o *NMAP*, não foram observados indícios de estabilização da *CEP* em função do volume de amostra analisado.

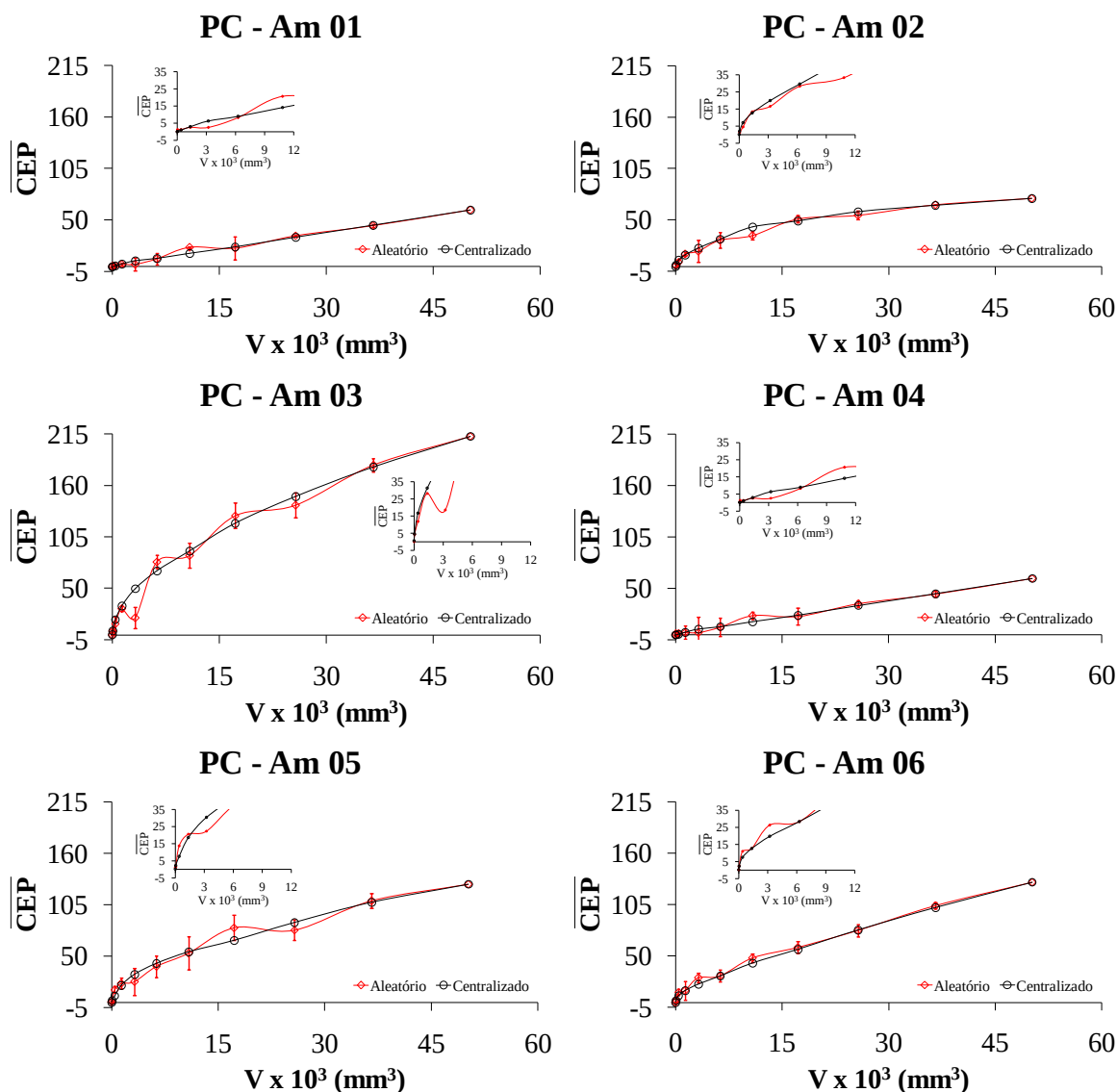
Figura 5.8: Gráficos da característica de Euler-Poincaré média ($\overline{CEP}$) em função do volume (V) das amostras (Am 01, Am 02, ..., Am 06) sob plantio direto (PD). Os subvolumes foram selecionados de forma aleatória e centralizada. Os gráficos em escala reduzida representam uma ampliação da região correspondente aos menores subvolumes analisados.



Fonte: A autora.

Nota: Para a forma de seleção aleatória (curva em vermelho) são apresentadas as barras de desvio padrão, correspondentes às três repetições realizadas.

Figura 5.9: Gráficos da característica de Euler-Poincaré média ($\overline{CEP}$) em função do volume (V) das amostras (Am 01, Am 02, ..., Am 06) sob plantio convencional (PC). Os subvolumes foram selecionados de forma aleatória e centralizada. Os gráficos em escala reduzida representam uma ampliação da região correspondente aos menores subvolumes analisados.



Fonte: A autora.

Nota: Para a forma de seleção aleatória (curva em vermelho) são apresentadas as barras de desvio padrão, correspondentes às três repetições realizadas.

As amostras sob PC (Figura 5.9) apresentaram na média maiores valores de $\overline{CEP}$, com o aumento dos subvolumes, em relação às amostras sob PD (Figura 5.8). Esse resultado indica que o sistema PC, que envolve o revolvimento do solo, causa a quebra dos seus agregados, afetando enormemente a conectividade dos poros. Assim, os poros intra-agregados são os mais afetados, uma vez que não há quebra dos mesmos quando sob PD (MEDEIROS et al., 2010; PETH et al., 2008). Os maiores valores de $\overline{NMAP}$ observados para

o PC em relação ao PD (Capítulo 3) são uma evidência da ruptura da estrutura do solo e do possível efeito deste nos valores de *CEP*.

Devido ao aumento progressivo dos valores de *CEP* em função do volume de amostra, observado em alguns casos, foram testados ajustes lineares, assim como realizado para o estudo do *VER* para o *NMAP* (Capítulo 4), no entanto, estes não foram satisfatórios. A hipótese de um *VER* para a *CEP* característica (*CEP* por volume) também não foi satisfeita.

Conclusões

Os resultados de τ e $\overline{CEP}$, em função do volume de amostra, apresentaram comportamento similar ao observado para os resultados de *MAP* e *NMAP* (Capítulo 4), no que se refere à maior variabilidade para os menores subvolumes e forma aleatória de seleção. Para medidas da tortuosidade dos macroporos do solo sob os dois sistemas de manejo, considerando as diferentes direções, sentidos e formas de seleção dos subvolumes, o menor tamanho necessário para que todas as amostras atingissem *VER*, foi de 17.216,20 mm³. Com isso, é possível utilizar amostras com tamanho igual ou superior a este, para que sejam obtidas medidas representativas da τ para o Latossolo Vermelho submetido aos dois sistemas de manejo em estudo. No entanto, para a $\overline{CEP}$, assim como para as análises de *VER* para o *NMAP*, não foram observados indícios de estabilização deste atributo em função do volume de amostra analisado.

Referências

- ALVAREZ, R.; STEINBACH, H. S. A review of the effects of tillage systems on some soil physical properties, water content, nitrate availability and crops yield in the Argentine Pampas. **Soil and Tillage Research**, v. 104, n. 1, p. 1–15, jun. 2009.
- ARCARO, K. **Característica de Euler-Poincaré para Estimar a Conectividade da Estrutura do Osso Trabecular**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009.
- ARCARO, K. **Caracterização geométrica e topológica da competência mecânica no estudo da estrutura trabecular**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.
- BERTOL, I. et al. Relações da rugosidade superficial do solo com o volume de chuva e com a estabilidade de agregados em água. **Revista Brasileira De Ciencia Do Solo**, v. 30, p. 543–55, 2006.
- BLAKE, G. R.; HARTGE, K. H. Bulk Density. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of Soil Analysis. Part 1: Physical and Mineralogical Methods**. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America Book Series, 1986. p. 443–460.

CRITTENDEN, S. J. et al. Soil physical quality in contrasting tillage systems in organic and conventional farming. **Soil and Tillage Research**, v. 154, p. 136–144, dez. 2015.

DAL FERRO, N. et al. Soil macro- and microstructure as affected by different tillage systems and their effects on maize root growth. **Soil and Tillage Research**, v. 140, p. 55–65, jul. 2014.

DULLIEN, F. A. L. **Porous Media: Fluid Transport and Pore Structure**. 2. ed. San Diego: Academic Press, 1992.

LAL, R.; SHUKLA, M. K. **Principles of Soil Physics**. New York: CRC Press, 2004.

MARCOLAN, A. L.; ANGHINONI, I. Atributos físicos de um Argissolo e rendimento de culturas em função do revolvimento do solo em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 1, p. 163–170, 2006.

MEDEIROS, J. C. et al. Linking physical quality and CO₂ emissions under long-term no-till and conventional-till in a subtropical soil in Brazil. **Plant and Soil**, v. 338, n. 1-2, p. 5–15, 20 maio 2010.

MONTGOMERY, D. C. et al. **Probabilidade e estatística na engenharia**. 4. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2006.

PASSONI, S. **Microtomografia de raios X na caracterização micromorfológica de solo submetido a diferentes manejos**. Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2013.

PEDROTTI, A.; JUNIOR, A. V. M. **Avanços em Ciência do solo: a física do solo na produção agrícola e qualidade ambiental**. 1. ed. São Cristóvão: UFS, FAPITEC-SE, 2009.

PETH, S. et al. Three-Dimensional Quantification of Intra-Aggregate Pore-Space Features using Synchrotron-Radiation-Based Microtomography. **Soil Science Society of America Journal**, v. 72, n. 4, p. 897, 1 jul. 2008.

RAB, M. A. et al. Evaluation of X-ray computed tomography for quantifying macroporosity of loamy pasture soils. **Geoderma**, v. 213, p. 460–470, 2014.

ROQUE, W.; ARCARO, K.; FREYTAG, I. **Tortuosidade da Rede do Osso Trabecular a partir da Reconstrução Geodésica de Imagens Binárias Tridimensionais** Workshop de Informática Médica: XXX Congresso da Sociedade Brasileira de Computação. **Anais...**Natal: SBC, 2011

ROQUE, W. L. et al. **Um sistema computacional baseado no processamento de imagens tomográficas para estudo da estrutura trabecular**. VII Workshop de Informática Médica. **Anais...**Porto de Galinhas: VII Workshop de Informática Médica, 2007

ROQUE, W. L.; ARCARO, K.; LANFREDI, R. B. Tortuosidade e conectividade da rede trabecular do rádio distal a partir de imagens microtomográficas (Trabecular network tortuosity and connectivity of distal radius from microtomographic images). **Brazilian Journal of Biomedical Engineering**, v. 28, n. 2, p. 116–123, 2012.

SALEM, H. M. et al. Short-term effects of four tillage practices on soil physical properties, soil water potential, and maize yield. **Geoderma**, v. 237-238, p. 60–70, jan. 2015.

VANDENBYGAART, A. J.; PROTZ, R. The representative elementary area (REA) in studies of quantitative soil micromorphology. **Geoderma**, v. 89, n. 3-4, p. 333–346, maio 1999.

Considerações finais

O conjunto de análises realizadas na presente pesquisa ratifica o potencial das técnicas de atenuação de raios gama e tomografia computadorizada para o estudo da estrutura do solo em diferentes escalas. Devido a possibilitar a visualização da estrutura interna das amostras, as imagens 2D de TC permitiram identificar o efeito do uso de diferentes valores de μ_{es} sobre a densidade do solo de amostras de um solo de textura argilosa. Esses resultados evidenciaram também a importância da utilização de amostras com tamanho representativo para análises com as fontes de ^{241}Am e ^{137}Cs .

As imagens 3D de μTC possibilitaram a caracterização micromorfológica dos macroporos do solo quanto aos atributos físicos de MAP , $NMAP$, τ e C (estimada a partir da característica de Euler-Poincaré), bem como estudar a distribuição do formato e do tamanho dos macroporos do solo. Devido à possibilidade de se trabalhar com diferentes tamanhos de subvolumes dentro do volume total de imagem da amostra, foi possível investigar o comportamento de alguns desses atributos em função do volume de amostra.

A comparação entre os resultados obtidos para as formas de seleção centralizada e aleatória dos subvolumes possibilitou avaliar a influência das mesmas nas análises de VER . Para medidas de MAP e τ foi possível identificar um VER para os dois solos estudados. No entanto, os atributos de $NMAP$ e CEP não apresentaram indícios de estabilização até o volume total de amostra analisado (50.193 mm^3).

Anexo

Software “REVAux”

Por meio de parceria firmada com Layon de Souza Onofre (Curso de Engenharia de Computação, Departamento de Informática, UEPG), na forma de Iniciação Científica desenvolvida no grupo de Física Aplicada a Solos e Ciências Ambientais (Departamento de Física, UEPG), foi desenvolvido um programa computacional em linguagem Java, com o objetivo de auxiliar no processo de recorte de subvolumes das imagens de TC para posteriores análises de VER.

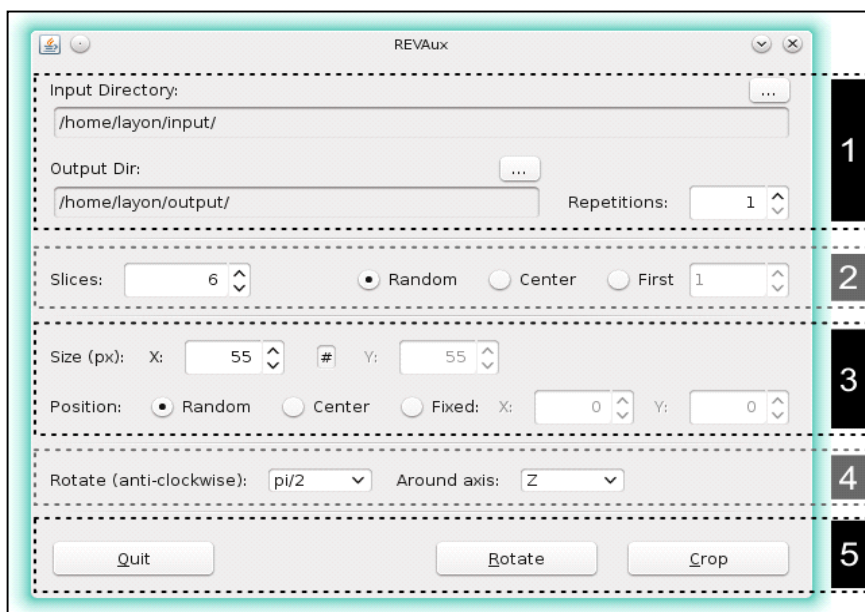
O nome escolhido para o programa foi o acrônimo “*REVAux*”, que une REV (do inglês, *Representative Elementary Volume*) com a abreviatura da palavra auxiliar, “*Aux*”, que representa a sua aplicação específica para a área de estudo. A principal função do programa é recortar uma série de imagens de forma aleatória ou em posições previamente especificadas, selecionando e definindo as posições e fatias. Uma função que permite rotacionar as imagens também foi implementada.

A função de aleatoriedade foi implementada usando a função *nextInt()*, pertencente à classe *Random*, que retorna um número pseudo-aleatório, distribuído uniformemente dentro de um intervalo determinado. A classe usa uma *seed* de 48 bits, que é modificada usando uma fórmula de congruência linear (KNUTH, 1997).

Para programar a função de rotação das imagens, cada fatia do conjunto de imagens de tomografia foi convertida em uma matriz 3D. A rotação das imagens foi implementada por meio das equações para rotação matricial da álgebra linear (STEINBRUCH; WINTERLE, 1990).

Nas Figuras 1 e 2 são apresentadas imagens mostrando o programa e as mensagens informativas ao usuário. Na Figura 1 é possível visualizar a divisão em blocos da interface. O bloco 1 serve para selecionar os diretórios de entrada e de saída. No bloco 2, o usuário informa o número de fatias que deseja recortar ou rotacionar e, para o recorte, pode-se selecionar a partir de qual fatia iniciar – aleatória, central ou a partir de um dado valor. O bloco 3 é usado para definir maiores detalhes sobre o recorte, como o tamanho deste e a partir de qual posição se deve iniciar o processo. O bloco 4 serve para a rotação, selecionando seu sentido e em que eixo serão giradas as imagens. Na parte inferior encontram-se os botões para as ações sair, rotacionar e recortar. O programa trata os dados de entrada para evitar erros e retorna uma mensagem para o usuário informando-o sobre o sucesso da operação.

Figura 1: Interface do programa *REVAux*.

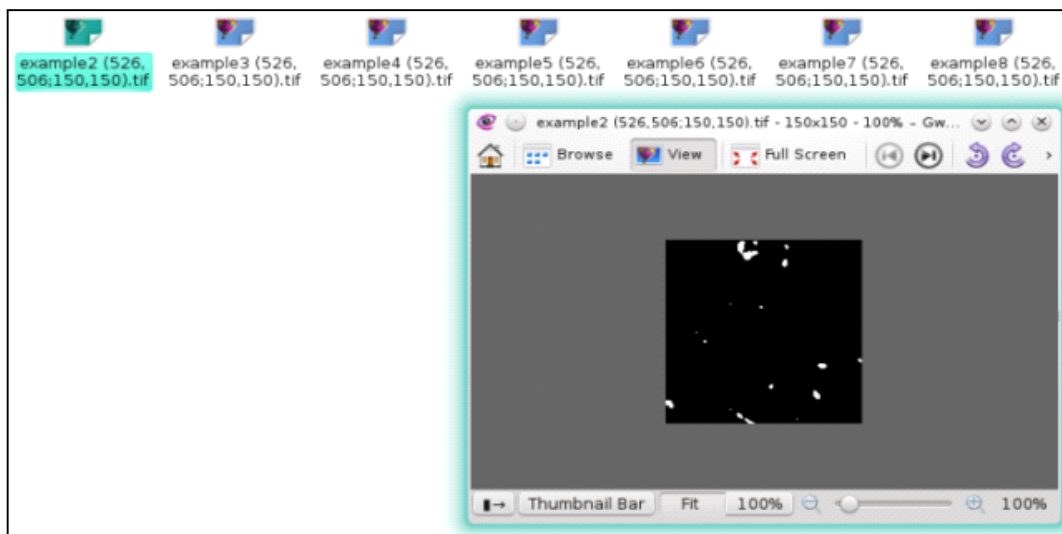


Fonte: Layon de Souza Onofre.

A Figura 2 mostra uma imagem que foi recortada juntamente com o nome de seu arquivo, que foi feito de forma a mostrar o ponto do recorte e o tamanho da imagem.

Para fins de teste de desempenho, foram realizados dez processos de recorte em 99 fatias, usando as opções aleatórias e com tamanho de recorte de 500x500 pixels. Realizando a média do tempo gasto apenas para o recorte, obtivemos um valor de 0,28 segundos. Levando em conta o tempo que o usuário pode gastar para configurar as opções, esse é um intervalo de tempo bastante pequeno quando comparado ao tempo necessário para realizar os recortes manualmente. As aplicações feitas até o momento demonstram que o programa *REVAux* foi desenvolvido com sucesso e encontra-se em perfeito funcionamento.

Figura 2: Arquivo do recorte.



Fonte: Layon de Souza Onofre.

Referências

KNUTH, D. **Art of Computer Programming, Volume 2: Seminumerical Algorithms**. 3. ed. Addison-Wesley Professional, 1997.

STEINBRUCH, A.; WINTERLE, P. **Introdução à álgebra linear**. McGraw-Hill Medical, 1990.