

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

EVERTON DE ANDRADE

MICROTOMOGRAFIA DE RAIOS X NA ANÁLISE DO VOLUME ELEMENTAR REPRESENTATIVO E DE MUDANÇAS NA REDE DE POROS EM FUNÇÃO DO MANEJO E CICLOS DE UMEDECIMENTO E SECAMENTO

PONTA GROSSA
2025

EVERTON DE ANDRADE

MICROTOMOGRAFIA DE RAIOS X NA ANÁLISE DO VOLUME ELEMENTAR REPRESENTATIVO E DE MUDANÇAS NA REDE DE POROS EM FUNÇÃO DO MANEJO E CICLOS DE UMEDECIMENTO E SECAMENTO

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 Doutor em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Pires

PONTA GROSSA
2025

Andrade, Everton de
Microtomografia de raios X na análise do volume elementar representativo e de mudanças na rede de poros em função do manejo e ciclos de umedecimento e secamento / Everton de Andrade. Ponta Grossa, 2025.
136 f.

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

Orientador: Prof. Dr. Luiz Fernando Pires.

1. Física do solo. 2. Tomografia computadorizada de raios-x. 3. Permeabilidade hidráulica. 4. Radiação síncrotron. 5. Manejo do solo. I. Pires, Luiz Fernando. II. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Física. III.T.

CDD: 631.41

TERMO DE APROVAÇÃO

EVERTON DE ANDRADE

MICROTOMOGRAFIA DE RAIOS X NA ANÁLISE DO VOLUME ELEMENTAR REPRESENTATIVO E DE MUDANÇAS NA REDE DE POROS EM FUNÇÃO DO MANEJO E CICLOS DE UMEDECIMENTO E SECAMENTO

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

Orientador -

Documento assinado digitalmente
 **LUIZ FERNANDO PIRES**
Data: 18/11/2025 18:31:03-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Luiz Fernando Pires – UEPG – Presidente

Documento assinado digitalmente
 **ANDRE CARLOS AULER**
Data: 15/11/2025 14:21:39-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. André Carlos Auler – UFPR – Titular

Documento assinado digitalmente
 **PAULO CESAR FACIN**
Data: 18/11/2025 16:00:05-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Paulo César Facin – UEPG – Titular

 Documento assinado digitalmente
FABIANO GILBERTO WOLF
Data: 17/11/2025 09:46:40-0300
CPF: ***.792.379-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Dr. Fabiano Gilberto Wolf – UFSC – Titular

Documento assinado digitalmente
 **RICARDO DE OLIVEIRA BORDONAL**
Data: 17/11/2025 10:17:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Ricardo de Oliveira Bordonal – LNBR/CNPEM –
Titular

Ponta Grossa, 14 de novembro de 2025

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer à minha esposa, Patrícia, e à minha filha, Ana Laura, pelo suporte, compreensão e carinho durante o caminho percorrido até aqui. Muitas “batalhas”, externas e internas, foram travadas, mas perseveramos juntos.

Agradeço, imensamente, ao professor Luis Fernando Pires, que fez muito mais do que me orientar durante o doutorado, sou grato por sua paciência, empatia e humanidade na condução de nossas atividades. De fato, faltam-me palavras para expressar a admiração e a inspiração, pessoal e profissional, que ele representa. Espero que o término deste doutorado seja apenas o início de uma parceria em trabalhos futuros.

Agradeço também à pesquisadora Talita Rosas Ferreira pelas grandes contribuições e pela parceria, servindo como ponte entre a UEPG e o CNPEM em parte da pesquisa realizada. Estendo meus agradecimentos aos professores e colegas do grupo FASCA, em especial ao colega José Valdirino Gaspareto pela parceria nos trabalhos realizados, e a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para minha formação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de doutorado, e ao Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM), pelo suporte fornecido.

“— *Foi tão fácil quanto parecia?*
— *Não senhor, não foi!*”

À Procura da Felicidade (2006)

RESUMO

Este trabalho de tese está basicamente fundamentado em dois eixos, o primeiro envolvendo a definição de volumes elementares representativos (VER) e o segundo, após a definição do VER, a caracterização da rede de poros de um latossolo vermelho sob diferentes sistemas de manejo e a análise dos efeitos de ciclos de umedecimento e secamento (U-S) em seu sistema poroso. Medidas do VER são fundamentais em física do solo, a fim de garantir que as propriedades avaliadas não apresentem variações em função das flutuações estatísticas devido à escala de medição, refletindo a heterogeneidade intrínseca da microestrutura do solo. Uma técnica que pode ser empregada com sucesso na análise do VER é a microtomografia de raios X (μ TC). Porém, algumas perguntas surgem na análise do VER e algumas delas motivaram esse trabalho de tese: 1) o VER sofre influência do manejo do solo para um mesmo tipo de solo?; 2) processos como ciclos de umedecimento e secamento afetam o VER?; 3) a escala de tamanhos de poros analisada influencia o VER?; 4) uma vez definido o VER, poros intra-agregados são afetados por processos como ciclos de U-S, independentemente do tipo de manejo a que o solo está submetido? A escolha da análise de poros intra-agregados nesse estudo foi devido a sua importância na proteção da matéria orgânica, retenção de água, atividade microbiana e estabilidade dos agregados. Os manejos estudados foram plantio convencional (PC), plantio direto (PD) e plantio cultivo mínimo (PM). O solo estudado foi um Latossolo Vermelho distrófico bastante empregado na agricultura no país. Os ciclos de U-S foram realizados utilizando o processo de ascensão capilar no umedecimento e mesa de tensão no secamento. Para o estudo do VER foram utilizados dois esquemas diferentes de seleção de subvolumes nomeados cubo e paralelepípedo e os sistemas PC, PM e PD. No estudo que avaliou a influência da resolução, foram utilizadas imagens tridimensionais (3D) com os seguintes tamanhos de voxels, 1,64 μ m, 5,25 μ m e 35 μ m. Os sistemas analisados nesse estudo foram o PC e PM. No estudo referente às mudanças na arquitetura dos poros de pequenos agregados (2-4 mm) em função dos ciclos de U-S foram analisadas amostras sob PD, PC e floresta secundária (F). No geral, as propriedades físicas avaliadas incluíram porosidade baseada em imagem (P), dimensão fractal (DF), grau de anisotropia (GA), conectividade (C), número de poros (NP/V), área de superfície (AS/V) pelo volume e tortuosidade (τ). O VER foi definido pela estabilização do coeficiente de variação em subvolumes progressivamente maiores. Os resultados mostram que o VER depende principalmente dos manejos do solo para P e C (ambos os esquemas de seleção). O método do paralelepípedo apresentou menor VER devido ao maior volume analisado em relação ao método do cubo. O VER obtido pelo método do cubo foi mais sensível a mudanças na escala de análise, apresentando uma tendência crescente com os ciclos de U-S aplicados para P e DF. O VER apresentou dependência da resolução com maior variabilidade nas propriedades medidas para 1,64 μ m. O manejo do solo influenciou o VER, com PC geralmente apresentando VERs menores, indicando maior homogeneidade da rede de poros. Artefatos nas imagens ou pequena quantidade de informação geraram valores anômalos de alguns parâmetros físicos (anisotropia, tortuosidade e dimensão fractal) na resolução de 1,64 μ m, destacando as limitações dos algoritmos de análise em subvolumes reduzidos. Com base nos resultados obtidos o VER não pode ser considerado estático, visto que é influenciado pelo manejo do solo e processos que nele ocorrem. Algo interessante é que mesmo para tamanhos muito pequenos de amostras, o VER ainda pode ser determinado e os valores dos parâmetros físicos obtidos são representativos dentro da escala de análise. Com relação à análise das mudanças na rede dos poros intra-agregados em função dos diferentes manejos e ciclos de U-S, verificou-se que os ciclos não afetaram significativamente ($p > 0,05$) as seguintes propriedades físicas: P, NP/V, DF, τ e C. Também foi estudado o efeito dos ciclos na permeabilidade (k) e a condutividade hidráulica (K) do solo, com base no poro mais volumoso (PMV). Não foram observadas diferenças em P_{PMV} , FA_{PMV} , EN_{PMV} , τ_{PMV} , raio hi-

dráulico, k e K entre 0 e 12 ciclos de U-S para o PMV. Comparando os tipos de manejo do solo após 12 U-S, por exemplo, as amostras F tornaram-se mais porosas do que as amostras PC e PD. Em contraste, o sistema de poros do PD teve uma dimensão fractal menor e foi mais tortuoso do que o das amostras PC e F. Esses resultados mostram que, para solos altamente intemperizados, como o latossolo estudado, a rede de poros intra-agregados se mostrou resiliente a mudanças com os ciclos de U-S, independentemente do tipo de manejo adotado. Os resultados desse estudo trazem informações básicas sobre a definição de volumes elementares representativos e qual são as dependências desses volumes em função de processos antrópicos ou processos naturais que ocorrem no solo. Esse tipo de resultado é fundamental por auxiliar na definição de volumes mínimos de interesse que devem ser adotados para análises por tomografia de raios X. No entanto, esses volumes devem ser determinados para cada propriedade medida e tipo de solo, dependendo da classe textural, não investigada neste estudo. Os resultados obtidos também mostram que poros contidos em pequenos agregados do solo são pouco sensíveis a mudanças devido a processos como ciclos de umedecimento e secamento, independentemente do tipo de manejo adotado. Esse tipo de informação é interessante tendo em vista a importância dos poros intra-agregados nos processos que ocorrem no solo.

Palavras-chave: Tomografia computadorizada de raios-X. Arquitetura dos poros. Permeabilidade. Condutividade hidráulica. Radiação síncrotron. Medidas elementares representativas. Manejo do solo. Imagens tridimensionais.

ABSTRACT

This thesis work is basically based on two axes, the first involving the definition of representative elementary volumes (REV) and the second, after the definition of the REV, the characterization of the pore network of a red latosol under different management systems and the analysis of the effects of wetting and drying cycles (W-D) on its porous system. REV measurements are fundamental in soil physics to ensure that the evaluated properties do not vary due to statistical fluctuations caused by the measurement scale, reflecting the intrinsic heterogeneity of the soil microstructure. One technique that can be successfully employed in REV analysis is micro-X-ray computed tomography (μ CT). However, some questions arise in REV analysis, and some of them motivated this thesis work: 1) Is REV influenced by soil management for the same soil type?; 2) Do processes such as wetting and drying cycles affect REV?; 3) Does the analyzed pore size scale influence REV?; 4) Once REV is defined, are intra-aggregate pores affected by processes such as W-D cycles, regardless of the type of management to which the soil is subjected? The choice of intra-aggregate pore analysis in this study was due to its importance in protecting organic matter, water retention, microbial activity, and aggregate stability. The management practices studied were conventional tillage (CT), no-tillage (NT), and minimum tillage (MT). The soil studied was a dystrophic Red Latosol widely used in agriculture in Brazil. The W-D cycles were performed using the capillary rise process for moistening and a tension table for drying. For the REV study, two different sub-volume selection schemes named cube and parallelepiped were used, as well as the CT, MT, and NT systems. In the study that evaluated the influence of resolution, three-dimensional (3D) images with the following voxel sizes were used: 1.64 μm , 5.25 μm , and 35 μm . The systems analyzed in this study were CT and MT. In the study on changes in the pore architecture of small aggregates (2-4 mm) as a function of W-D cycles, samples were analyzed under NT, CT, and secondary forest (F). In general, the physical properties evaluated included image-based porosity (P), fractal dimension (FD), degree of anisotropy (DA), connectivity (C), number of pores (NP/V), surface area (SA/V) per volume, and tortuosity (τ). The REV was defined by the stabilization of the coefficient of variation in progressively larger subvolumes. The results show that the REV depends mainly on soil management for P and C (both selection schemes). The parallelepiped method presented a lower REV due to the larger volume analyzed in relation to the cube method. The REV obtained by the cube method was more sensitive to changes in the analysis scale, showing an increasing trend with the W-D cycles applied for P and FD. The REV showed dependence on resolution, with greater variability in the properties measured for 1.64 μm . Soil management influenced the REV, with CT generally presenting lower REV, indicating greater homogeneity of the pore network. Artifacts in the images or a small amount of information generated anomalous values for some physical parameters (anisotropy, tortuosity, and fractal dimension) at a resolution of 1.64 μm , highlighting the limitations of analysis algorithms in reduced subvolumes. Based on the results obtained, REV cannot be considered static, as it is influenced by soil management and processes that occur in it. Interestingly, even for very small sample sizes, REV can still be determined, and the values of the physical parameters obtained are representative within the analysis scale. Regarding the analysis of changes in the intra-aggregate pore network as a function of different management practices and W-D cycles, it was found that the cycles did not significantly affect ($p > 0.05$) the following physical properties: P, NP/V, FD, τ , and C. The effect of cycles on soil permeability (k) and hydraulic conductivity (K) was also studied, based on the most voluminous pore (MVP). No differences were observed in P_{MVP} , F_{MVP} , E_{MVP} , τ_{MVP} , hydraulic radius, k, and K between 0 and 12 W-D cycles for MVP. Comparing soil management types after 12 W-D, for example, F samples became more porous than CT and NT samples. In contrast, the NT pore system had a smaller fractal dimension and was more

tortuous than that of the CT and F samples. These results show that, for highly weathered soils, such as the latosol studied, the intra-aggregate pore network proved resilient to changes with W-D cycles, regardless of the type of management adopted. The results of this study provide basic information on the definition of representative elementary volumes and the dependencies of these volumes as a function of anthropogenic processes. The results of this study provide basic information on the definition of representative elementary volumes and the dependencies of these volumes on anthropogenic or natural processes occurring in the soil. This type of result is fundamental because it helps define the minimum volumes of interest that should be adopted for X-ray tomography analysis. However, these volumes must be determined for each measured property and soil type, depending on the textural class, which was not investigated in this study. The results obtained also show that pores contained in small soil aggregates are not very sensitive to changes due to processes such as wetting and drying cycles, regardless of the type of management adopted. This type of information is interesting given the importance of intra-aggregate pores in the processes that occur in the soil.

Keywords: Computed tomography. Pore architecture. Permeability. Hydraulic conductivity. Synchrotron radiation. Representative elementary measures. Soil management. Three-dimensional images.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 2.1	Desenho esquemático representando o procedimento de aquisição de imagens pela técnica de Microtomografia Computadorizada de Raios X (μ TC).....	33
Figura 2.2	Desenho esquemático mostrando os procedimentos básicos realizados no processamento e segmentação das imagens tomográficas. A imagem apresentada representa uma seção 2D de uma amostra do solo sob sistema de manejo de plantio convencional. Na imagem segmentada os poros estão representados na cor preta e os sólidos na cor branca.....	34
Figura 2.3	Desenho esquemático dos procedimentos de seleção de subvolumes. O primeiro (a) representa o esquema de seleção baseado em paralelepípedo concêntrico (eixo z fixo = profundidade da amostra) e o segundo (b) a geometria de cubo centralizado.....	34
Figura 2.4	Desenho ilustrativo dos subvolumes selecionados para a análise do volume elementar representativo (VER) (esquema de cubo concêntrico). As informações acima e abaixo das imagens indicam o tamanho e o número dos subvolumes analisados, respectivamente.	35
Figura 2.5	Representação de um volume de interesse (VOI) cúbico, os cubos menores brancos representam os voxels da parte sólida e os pretos os da parte dos poros.	36
Figura 2.6	Aplicação do método Box counting para uma figura em 2D. Para tamanho de caixas 270 (a), 90 (b), 30 (c), 10 (d) e 3,33 (e). As linhas vermelhas representam as divisões das caixas.....	37
Figura 2.7	Conjunto de vetores de comprimento medido de um ponto vermelho a outro, interceptando os poros (cor preta) no processo de cálculo do grau de anisotropia (GA) dos poros.....	38
Figura 2.8	Valores de MIL plotados em coordenadas polares para todas as direções, formando uma nuvem de pontos que, estatisticamente, aproxima-se de um elipsoide.	39
Figura 2.9	Elipsoide ajustado estatisticamente a nuvem de pontos do MIL, representando o Tensor Fabrico.	39
Figura 2.10	Representação das a) conexões simples (apenas um caminho do ponto G ao ponto H); e b) conexões múltiplas (dois caminhos do ponto G ao ponto H) de uma rede de poros.....	41
Figura 2.11	Representação esquemática da definição do volume elementar representativo (VER). As letras de A a E indicam a escala de comprimento da janela para a qual as propriedades de interesse foram medidas. A letra E indica o maior volume de amostra analisado por Tomografia Computadorizada de Raios X. ...	42

Figura 2.12	Fluxograma contendo as etapas realizadas na execução desse estudo.....	43
Figura 2.13	Porosidade imageada (P) em função das diferentes escalas de comprimento de janela (L) obtidas com base nas imagens microtomográficas. (a) Plantio cultivo mínimo (PM) e método do paralelepípedo, (b) PM e método do cubo, (c) Plantio convencional (PC) e método do paralelepípedo, (d) PC e método do cubo, (e) Plantio direto (PD) e método do paralelepípedo, e (f) PD e método do cubo. As amostras de solo foram submetidas a 0 (linhas vermelhas) e 6 (linhas azuis) ciclos de umedecimento e secamento (U-S). O marcador (cheio) indica o volume elementar representativo (VER).....	44
Figura 2.14	Dimensão fractal (DF) em função das diferentes escalas de comprimento de janela (L) obtidas a partir das imagens microtomográficas. (a) Plantio cultivo mínimo (PM) e método do paralelepípedo, (b) PM e método do cubo, (c) Plantio convencional (PC) e método do paralelepípedo, (d) PC e método do cubo, (e) Plantio direto (PD) e método do paralelepípedo, e (f) PD e método do cubo. As amostras de solo foram submetidas a 0 (linhas vermelhas) e 6 (linhas azuis) ciclos de umedecimento e secamento (U-S). O marcador (cheio) indica o volume elementar representativo (VER).....	45
Figura 2.15	Grau de anisotropia (GA) em função das diferentes escalas de comprimento de janela (L) obtidas com base nas imagens microtomográficas. (a) Plantio cultivo mínimo (PM) e método do paralelepípedo, (b) PM e método do cubo, (c) Plantio convencional (PC) e método do paralelepípedo, (d) PC e método do cubo, (e) Plantio direto (PD) e método do paralelepípedo, e (f) PD e método do cubo. As amostras de solo foram submetidas a 0 (linhas vermelhas) e 6 (linhas azuis) ciclos de umedecimento e secamento (U-S). O marcador (cheio) indica o volume elementar representativo (VER).....	47
Figura 2.16	Conectividade dos poros (C) em função das diferentes escalas de comprimento de janela (L) obtidas com base nas imagens microtomográficas. (a) Plantio cultivo mínimo (PM) e método do paralelepípedo, (b) PM e método do cubo, (c) Plantio convencional (PC) e método do paralelepípedo, (d) PC e método do cubo, (e) Plantio direto (PD) e método do paralelepípedo, e (f) PD e método do cubo. As amostras de solo foram submetidas a 0 (linhas vermelhas) e 6 (linhas azuis) ciclos de umedecimento e secamento (U-S). O marcador (cheio) indica o volume elementar representativo (VER).....	48
Figura 3.1	Etapas do processo de segmentação aplicado a uma das fatias bidimensionais (2D) de uma amostra sob plantio cultivo mínimo com resolução de 35 μm . (a) Imagem original em escala de cinza; (b) Imagem após passagem dos filtros Median 3D e Unsharp Mask; (c) Imagem binarizada obtida pelo método de Otsu após remoção de outliers, com os poros apresentados em preto (255) e matriz sólida em branco (0).	68
Figura 3.2	Triangulação para os 14 padrões reduzidos.	72

Figura 3.3	Representação 2D do comprimento geodésico (linha vermelha), e do comprimento euclidiano (linha azul) partindo do mesmo ponto A até o ponto B. As regiões brancas representam o solo e as regiões pretas os poros....	73
Figura 3.4	Imagens do esqueleto dos poros das amostras sob plantio convencional (PC) para as resoluções de 1,64 μm (a-c), 5,25 μm (d-f) e 35 μm (g-i). L representa os diferentes comprimentos lineares das caixas (subvolumes).....	75
Figura 3.5	Imagens do esqueleto dos poros das amostras sob plantio cultivo mínimo (PM) para resoluções de 1,64 μm (a-c), 5,25 μm (d-f) e 35 μm (g-i). L representa os diferentes comprimentos lineares das caixas (subvolumes).....	77
Figura 3.6	Porosidade imageada (P), Número de poros por volume (NP/V), Grau de anisotropia (GA), Área su-perficial por volume (AS/V), Dimensão fractal (DF), Conectividade dos poros por volume (C/V) e Tortuosidade (τ) em função das diferentes escalas de comprimento de janela (L) obtidas a partir de imagens de microtomografia com resolução de 1,64 μm do solo sob plantio convencional (PC). R1, R2 e R3 representam as amostras analisadas sob PC.	78
Figura 3.7	Porosidade imageada (P), Número de poros por volume (NP/V), Grau de anisotropia (GA), Área de superfície por volume (AS/V), Dimensão fractal (DF), Conectividade dos poros por volume (C/V) e Tortuosidade (τ) em função das diferentes escalas de comprimento de janela (L) obtidas a partir de imagens de microtomografia com resolução de 5,25 μm do solo sob plantio convencional (PC). R1, R2 e R3 representam as amostras analisadas sob PC.	79
Figura 3.8	Porosidade imageada (P), Número de poros por volume (NP/V), Grau de anisotropia (GA), Área superficial por volume (AS/V), Dimensão fractal (DF), Conectividade dos poros por volume (C/V) e Tortuosidade (τ) em função das diferentes escalas de comprimento de janela (L) obtidas a partir de imagens de microtomografia com resolução de 35 μm do solo sob plantio convencional (PC). R1, R2 e R3 representam as amostras analisadas sob PC. ..	81
Figura 3.9	Porosidade imageada (P), Número de poros por volume (NP/V), Grau de anisotropia (GA), Área superficial por volume (AS/V), Dimensão fractal (DF), Conectividade dos poros por volume (C/V) e Tortuosidade (τ) em função das diferentes escalas de comprimento de janela (L) obtidas a partir de imagens de microtomografia com resolução de 1,64 μm do solo sob plantio cultivo mínimo (PM). R1, R2 e R3 representam as amostras analisadas sob PM.	82
Figura 3.10	Porosidade imageada (P), Número de poros por volume (NP/V), Grau de anisotropia (GA), Área su-perficial por volume (AS/V), Dimensão fractal (DF), Conectividade por volume (C/V) e Tortuosidade (τ) em função das diferentes escalas de comprimento de janela de janela (L) obtidas a partir de imagens de microtomografia com resolução de 5,25 μm do solo sob plantio cultivo mínimo (PM). R1, R2 e R3 representam as amostras analisadas sob PM.	84

Figura 3.11	Porosidade imageada (P), Número de poros por volume (NP/V), Grau de anisotropia (GA), Área superficial por volume (AS/V), Dimensão fractal (DF), Conectividade dos poros por volume (C/V) e Tortuosidade (τ) em função das diferentes escalas de comprimento de janela (L) obtidas a partir de imagens de microtomografia com resolução de 35 μm do solo sob plantio cultivo mínimo (PM). R1, R2 e R3 representam as amostras analisadas sob PM.	85
Figura 4.1	Processamento de imagens de tomografia computadorizada. (a) Imagem original ou em tons de cinza, (b) após aplicação de filtros específicos, (c) após aplicação da máscara de fundo e (d) imagem segmentada (a cor azul representa os poros).....	107
Figura 4.2	Ilustração do processo de seleção de um subvolume de um agregado contendo o poro mais volumoso (PMV). (a) Agregado e PMV, (b) subvolume do agregado contendo o PMV, e (c) PMV (a cor azul representa o PMV e a cor marrom avermelhada o agregado).....	109
Figura 4.3	Diagrama dos procedimentos adotados para as análises. Os dados de F, PC e PD para 0 U-S foram abordados em Ferreira et al. (2023) e são usados aqui para fins de referência.	110
Figura 4.4	Alterações em: (a) porosidade da imagem (P), (b) número de poros dividido pelo volume (NP/V), (c) dimensão fractal (DF), (d) tortuosidade dos poros (τ) e (e) Número de Euler (NE) para as amostras submetidas a 0 e 12 ciclos de umedecimento e secamento (U-S). τ e NE são análises globais, ou seja, consideram todos os poros de cada agregado. Os diferentes manejos do solo investigados foram floresta secundária (F), plantio convencional (PC) e plantio direto (PD). Diferentes valores médios representados por letras latinas com asterisco e sem asterisco indicam diferenças significativas ($p \leq 0,05$) entre os manejos do solo para as amostras sob 0 e 12 U-S, respectivamente. Os valores médios representados por letras gregas indicam diferenças significativas ($p \leq 0,05$) entre 0 e 12 U-S dentro do mesmo manejo do solo. Dados de P e NE para 0 U-S sob F, PC e PD foram abordados em Ferreira et al. (2023) e são usados aqui para fins de referência.....	112
Figura 4.5	Representações 3D do sistema poroso (azul) de amostras agregados (aproximadamente 3 mm) de cada manejo de solo: Floresta (F), plantio convencional (PC) e plantio direto (PD), sob 0 e 12 U-S (ciclos de umedecimento e secamento). Amostras de 0 e 12 U-S dentro do mesmo manejo de solo não são as mesmas.	115
Figura 4.6	Alterações em: (a) porosidade da imagem do poro mais volumoso (PPMV), (b) fração do agregado ocupada pelo PMV (FAPMV), (c) Número de Euler do poro mais volumoso (NEPMV), (d) tortuosidade do PMV determinada por uma análise local baseada na esqueletização do PMV (τ_{PMV}), (e) raio hidráulico (R) do PMV, (f) permeabilidade (k) calculada para o PMV e (g) condutividade hidráulica (K) calculada para o PMV para as amostras submetidas a 0 e 12 ciclos de umedecimento e secamento (U-S). Os	

diferentes manejos de solo investigados foram floresta secundária (F), plantio convencional (PC) e plantio direto (PD). Diferentes valores médios representados por letras latinas com asterisco e sem asterisco indicam diferenças significativas ($p \leq 0,05$) entre as práticas de manejo para as amostras sob 0 e 12 U-S. Os valores médios representados por letras gregas diferentes indicam diferenças significativas ($p \leq 0,05$) entre 0 e 12 U-S dentro da mesma prática de gestão. Dados de PPMV, FAPMV, τ PMV, R, k e K para 0 U-S sob F, PC e PD foram abordados em Ferreira et al. (2023) e são usados aqui para fins de referência. 119

Figura 4.7 Comparação entre os raios hidráulicos R e R' para amostras sob floresta (F), plantio convencional (PC) e plantio direto (PD), e entre amostras sob 12 U-S. Um valor equivalente pode ser encontrado em Ferreira et al. (2023) para amostras sob 0 U-S e o mesmo manejo do solo. 121

Figura 4.8 Distribuição de frequência média do raio médio do segmento do esqueleto do poro mais volumoso (PMV) de amostras de agregados de solo sob (a, b) floresta (F), (c, d) plantio convencional (PC) e (e, f) plantio direto (PD). As amostras foram submetidas a 0 (coluna da esquerda) e 12 (coluna da direita) ciclos de umedecimento e secamento (U-S). Os desvios-padrão são mostrados como áreas preenchidas. O número diferente de amostras (n) analisadas para cada prática de manejo é devido à exclusão de outliers. (a, c, e) Os dados de Ferreira et al. (2023) são apresentados aqui para fins de referência. 124

Figura 4.9 Distribuição de frequência média da tortuosidade do segmento do esqueleto do poro mais volumoso (PMV) de amostras de agregados de solo sob (a, b) floresta (F), (c, d) plantio convencional (PC) e (e, f) plantio direto (PD). As amostras foram submetidas a 0 (coluna da esquerda) e 12 (coluna da direita) ciclos de umedecimento e secamento (U-S). Os desvios-padrão são mostrados como áreas preenchidas. O número diferente de amostras (n) analisadas para cada uso da terra é devido à exclusão de outliers. (a, c, e) Os dados de Ferreira et al. (2023) são apresentados aqui para fins de referência. . 125

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Escala de comprimento de caixa (L) e subvolumes (V) selecionados para a análise do volume elementar representativo (VER) para os esquemas de seleção de subvolumes (cubo e paralelepípedo) estudado. O maior subvolume (subvolume 10) representa todo o volume de interesse (VOI).	36
Tabela 3.1	Dimensões dos 20 subvolumes analisados para definir o volume elementar representativo (VER) para as imagens 3D com as diferentes resoluções (1,64, 5,25 e 35 μm).	69
Tabela 3.2	Volume elementar representativo (VER) para cada resolução analisada (1,64 μm , 5,25 μm e 35 μm) e manejo do solo (plantio convencional – PC e plantio direto – PM). Porosidade imageada (P), Número de poros por volume (NP/V), Grau de anisotropia (GA), Área de superfície por volume (AS/V), Dimensão fractal (DF), Conectividade dos poros por volume (C/V) e Tortuosidade (τ).	87
Tabela 3.3	Valor médio e desvio padrão para cada propriedade micromorfológica estudada para o solo sob plantio convencional (PC) e plantio cultivo mínimo (PM) com base no volume elementar representativo (VER). Porosidade imageada (P), Número de poros por volume (NP/V), Grau de anisotropia (GA), Área de superfície por volume (AS/V), Dimensão fractal (DF), Conectividade dos poros por volume (C/V) e Tortuosidade (τ).	88

LISTA DE NOMENCLATURA

F	Floresta
PD	Plantio Direto
PC	Plantio convencional
U-S	Ciclos de umedecimento e secamento
TCX	Tomografia computadorizada de raios X
P	Porosidade baseada em imagem
V_p	Volume de poros
V_t	Volume total da amostra
NP/V	Número de poros dividido pelo volume
DF	Dimensão fractal
GA	Grau de anisotropia
SE	menores autovalores
LE	maiores autovalores
k	Permeabilidade
K	Condutividade hidráulica
NE	Número de Euler
β	Fator de forma
τ	Tortuosidade
A_{PMV}	Área de superfície do PMV
IBP-KC	Parametrização de equação de Kozeny-Carman
PMV	Poros mais volumoso de um agregado de solo
V_{PMV}	Volume do PMV
V_{sb}	Subvolume do agregado contendo o PMV
P_{PMV}	Porosidade de um subvolume do agregado devido ao PMV
R	Raio hidráulico
R'	Raio hidráulico médio alternativo
NE_{PMV}	Número de Euler do PMV
L_e	Comprimento do segmento sinuoso
L_g	Comprimento do segmento reto
ρ	Densidade da água
g	Aceleração da gravidade
μ	Viscosidade dinâmica da água

τ_{PMV}	Tortuosidade do PMV
F_{APMV}	Fração do agregado ocupada pelo PMV
AS/V	Área de superfície por volume

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	20
1.1 VISÃO GERAL DA TESE	20
1.1.1 Motivações para a Tese	20
1.1.2 Abordando os Problemas.....	21
1.2 HIPÓTESES	22
1.3 OBJETIVOS GERAIS	23
1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
REFERÊNCIAS	24
2 VOLUME ELEMENTAR REPRESENTATIVO INFLUENCIADO POR MANEJOS E PROCESSOS NO SOLO COM BASE NA ANÁLISE DO SISTEMA POROSO EM 3D	24
2.1 INTRODUÇÃO.....	27
2.2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	30
2.2.1 Área Experimental e Amostragem do Solo	30
2.2.2 Ciclos de Umedecimento e Secamento (U-S)	31
2.2.3 Microtomografia Computadorizada de Raios X (μ TC).....	32
2.2.4 Seleção dos Subvolumes	34
2.2.5 Propriedades Físicas do Solo Medidas pela Microtomografia	36
2.2.6 Estimativa do Volume Elementar Representativo (VER)	41
2.3 RESULTADOS	43
2.3.1 Porosidade Imageada.....	43
2.3.2 Dimensão Fractal.....	44
2.3.3 Grau de Anisotropia.....	46
2.3.4 Conectividade dos Poros	47
2.4 DISCUSSÃO	49
2.5 CONCLUSÕES	55
REFERÊNCIAS	55
3 VOLUME ELEMENTAR REPRESENTATIVO EM SOLOS AGRÍCOLAS: INFLUÊNCIA DA RESOLUÇÃO DAS IMAGENS E DOS SISTEMAS DE MANEJO	62
3.1 INTRODUÇÃO.....	63
3.2 MATERIAS E MÉTODOS	65
3.2.1 Área Experimental e Coleta das Amostras	65
3.2.2 Aquisição de Imagens em Diferentes Resoluções	66

3.2.2.1 Microtomografia de raios X com resolução de 1,64 μm	66
3.2.2.2 Microtomografia de raios X com resolução de 5,25 μm	66
3.2.2.3 Microtomografia de raios X com resolução de 35 μm	67
3.2.3 Segmentação das Imagens 3D	67
3.2.4 Seleção de Subvolume.....	68
3.2.5 Propriedades Micromorfológicas	70
3.2.5.1 Porosidade imageada (P)	70
3.2.5.2 Dimensão fractal (DF)	70
3.2.5.3 Grau de anisotropia (GA)	70
3.2.5.4 Conectividade dos poros (C).....	71
3.2.5.5 Número de poros (NP) e área de superfície (AS).....	71
3.2.5.6 Tortuosidade (τ)	73
3.2.6 Procedimentos para a Definição do Volume Elementar Representativo (VER).....	74
3.3 RESULTADOS	75
3.3.1 Esqueleto dos Poros 3D	75
3.3.2 Volume Elementar Representativo em Função das Propriedades Morfológicas Medidas e Resoluções	77
3.3.3 Propriedades Micromorfológicas a partir da Definição do VER	88
3.4 DISCUSSÃO	89
3.5 CONCLUSÕES	93
REFERÊNCIAS	94
4 ESTABILIDADE DA REDE DE POROS INTRA-AGREGADOS APÓS CICLOS DE UMEDECIMENTO E SECAMENTO EM UM LATOSSOLO SOB DIFERENTES MANEJOS	100
4.1 INTRODUÇÃO.....	101
4.2 MATERIAIS E MÉTODOS.....	104
4.2.1 Amostragem de Solo	104
4.2.2 Ciclos de Umedecimento-Secamento e Preparação de Amostras	105
4.2.3 Tomografia Computadorizada de Raios X Baseada em Síncrotron: Aquisição e Segmentação de Imagens.....	106
4.2.4 Análise Morfológica	107
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	111
4.3.1 Análise morfológica Considerando Todos os Poros em cada Agregado	111
4.3.2 Permeabilidade e Condutividade Hidráulica Considerando o Poro Mais Volumoso (PMV) em cada Agregado	118
4.4 CONCLUSÕES	126

REFERÊNCIAS	127
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	134
5.1 RECAPITULAÇÃO DOS OBJETIVOS E PERSPECTIVAS DE ANÁLISES.....	134
5.2 CONSOLIDAÇÃO DOS RESULTADOS POR UNIDADE DE ANÁLISE	134
5.2.1 Conexões entre os Resultados	135
5.3 AVALIAÇÃO CRÍTICA: HIPÓTESES E CONSISTÊNCIA DOS RESULTADOS	135
5.4 PRINCIPAIS LIMITAÇÕES	136
5.5 CONTRIBUIÇÕES DA TESE.....	136
5.6 TRABALHOS FUTUROS.....	136

1 INTRODUÇÃO

1.1 VISÃO GERAL DA TESE

1.1.1 Motivações para a Tese

Medidas elementares representativas são fundamentais na área de física do solo. Qualquer propriedade medida em amostras coletadas no campo necessita representar aquilo que se pretende medir. Assim, a quantificação apropriada das propriedades físicas do solo é essencial para tomadas de decisão sobre a melhor forma de manejar o solo e como utilizar recursos hídricos de maneira sustentável (Al-Raoush; Papadopoulos, 2010; Liu et al., 2023). Uma ferramenta que permite a aquisição de inúmeras propriedades físicas é a microtomografia de raios X (μ TC), baseada em imagens tridimensionais (3D) de alta resolução. Nessa técnica, amostras de diferentes tamanhos podem ser empregadas, o que possibilita a aquisição de imagens com resoluções distintas. No entanto, geralmente, uma melhor resolução representa um menor tamanho de amostra sendo escaneada. Isto faz com que uma pergunta surja, até que ponto o tamanho da amostra permite medir de forma representativa aquilo que se deseja medir? Outra questão a ser respondida é se após determinar volumes elementares representativos (VER), para diferentes propriedades físicas de um mesmo solo, esses volumes podem ser usados independentemente do tipo de manejo empregado. Seriam esses volumes dependentes do método de seleção de subvolumes adotados para a verificação do VER? Amostras de qualquer volume e, portanto, com diferentes resoluções de imagens são capazes de apresentar um VER? Existiriam limitações de quantificação dos parâmetros físicos em função do volume de amostra e da resolução da imagem 3D? Perguntas desse tipo nortearam a construção de parte dessa tese envolvendo determinações do VER para um tipo de solo bastante usado na agricultura brasileira.

Uma vez definido o VER, outra pergunta que surgiu é se os poros contidos em pequenos agregados do latossolo estudado seriam influenciados por ciclos de umedecimento e secamento (U-S). Outros trabalhos na literatura têm trazido algum tipo de *insight* sobre o efeito de ciclos de U-S na estrutura do solo, mas geralmente restritos a solos de clima temperado ou analisando amostras maiores ou diferentes classes de tamanhos de poros (Leij et al., 2002; Da Costa et al., 2014; Ma et al., 2015; Zhang et al., 2018; Wang et al., 2022). Assim, outro estudo derivado desse trabalho de tese envolveu a análise do impacto de ciclos de U-S na rede de poros de um latossolo submetido a diferentes sistemas de manejo. A ideia principal foi verifi-

car até que ponto o tamanho de poro analisado sofre a influência de processos que envolvem umedecimentos e secamentos contínuos do solo, comuns principalmente em solos tropicais.

As respostas às perguntas realizadas motivaram a elaboração e a execução desse trabalho de tese. Os estudos conduzidos envolveram diversos pesquisadores e geraram grandes quantidades de dados que foram sistematizados, analisados criteriosamente e apresentados em três trabalhos científicos, que são os capítulos principais da tese.

1.1.2 Abordando os Problemas

Para responder as perguntas anteriores primeiramente investigou-se como os ciclos de U-S são capazes de influenciar o VER em amostras submetidas a diferentes sistemas de manejo. A escolha dos sistemas de manejo visou verificar se a manutenção da estrutura do solo e sua destruição causam modificações na rede de poros capazes de influenciar a definição do VER quando o solo é sujeito aos ciclos de U-S. Nesse estudo, também foi verificado se o método de seleção dos subvolumes para análise do VER é capaz de influenciar nos resultados obtidos. Neste sentido, o foco foi avaliar como as propriedades do solo, avaliadas pela μ TC, afetam o VER com base na quantidade de informação obtida.

É válido mencionar que a μ TC permite o estudo de inúmeras propriedades geométricas e morfológicas do solo na escala micrométrica (Peth et al., 2008; Ma et al., 2015; Gao et al., 2017; Ferreira et al., 2022). A μ TC é considerada uma técnica não destrutiva e não invasiva capaz de permitir a análise interna de materiais porosos (Tseng et al., 2018). Além disso, ela permite selecionar e analisar diferentes volumes no interior da amostra, o que é impossível nos métodos convencionais sem a destruição do material analisado.

O segundo estudo realizado envolveu a análise de amostras submetidas a dois manejos de solo distintos escaneadas com diferentes resoluções. Neste caso, as diferentes resoluções estão relacionadas com diferentes volumes de amostras. Os manejos escolhidos envolveram um primeiro causando o revolvimento do solo, quebrando sua estrutura, e um segundo, ocasionando modificações mais suaves na estrutura do solo, sendo considerado um manejo mais conservacionista. As amostras analisadas foram do mesmo tipo de solo escaneadas em três resoluções, possibilitando a análise de poros de diferentes classes de tamanhos. Inúmeras propriedades físicas foram medidas, a fim de verificar a dependência do VER com o tipo de propriedade física e se limitações no tamanho da amostra e resolução permitem quantificar parâmetros representativos. Também se buscou analisar se o VER é obtido independentemente do tamanho de amostra escaneado.

O terceiro estudo, que visou avaliar se os poros no interior de agregados com tamanhos entre 2 e 4 mm são afetados por ciclos de U-S, também foi conduzido no latossolo sob diferentes sistemas de manejo. A ideia novamente, como nos outros estudos, foi verificar se as modificações induzidas pelos manejos eram suficientes para alterar a rede de poros quando as amostras de solo eram submetidas aos ciclos de U-S. Portanto, para os objetivos desse estudo foi selecionada somente uma resolução de imagem e inúmeras propriedades físicas foram quantificadas. Também foi avaliado o impacto das mudanças na rede de poros em propriedades relacionadas com a dinâmica da água no solo, como a condutividade hidráulica.

1.2 HIPÓTESES

As hipóteses que nortearam esse trabalho de tese foram:

- Diferentes manejos do solo quando submetidos a ciclos de umedecimento e secamento afetam o volume elementar representativo de propriedades físicas do solo baseadas em imagens tridimensionais de alta resolução;
- Diferentes métodos de seleção de subvolumes de imagens são capazes de influenciar a definição do volume elementar representativo de propriedades físicas do solo baseadas em imagens tridimensionais de alta resolução;
- Imagens tridimensionais de diferentes resoluções são capazes de apresentar volume elementar representativo independentemente do tipo de manejo do solo;
- Métodos que causam menores modificações na estrutura do solo levam a uma rede de poros mais complexa e, portanto, maiores volumes elementares representativos;
- Os poros no interior de pequenos agregados de solo (2-4 mm) são resilientes a modificações nas propriedades físicas do solo obtidas pela microtomografia de raios X após ciclos de umedecimento e secamento.

As hipóteses desse estudo permitiram ainda a elaboração de algumas questões que foram abordadas nos diferentes capítulos que serão apresentados na sequência.

- É possível tornar o critério estatístico para definição do VER mais restritivo? (Capítulo 1)
- Qual método de seleção de volume é mais apropriado? Método do paralelepípedo ou Cubo? (Capítulo 1)
- O intervalo de resoluções estudado é suficiente para detectar variações na determinação do VER? (Capítulo 2)

- A resolução ou volume da imagem pode limitar a quantificação de uma determinada propriedade física do solo? (Capítulo 2)
- A rede de poros do solo apresenta poros dominantes? (Capítulo 3)
- Qual é a importância do poro dominante nos processos que ocorrem no solo? (Capítulo 3)
- Qual propriedade física do solo é mais susceptível a mudanças na escala de pequenos agregados? (Capítulo 3)

Para avaliar as hipóteses e responder às perguntas listadas acima foram elaborados alguns objetivos gerais e específicos, apresentados a seguir.

1.3 OBJETIVOS GERAIS

- Definir o VER de propriedades físicas do solo obtidas por tomografia computadorizada de raios X utilizando dois métodos diferentes de seleção de volume (cubo e paralelepípedo) de amostras de solo submetidas a diferentes manejos e ciclos de umedecimento e secamento.
- Definir o VER de um latossolo submetido a diferentes manejos em função da resolução da imagem.
- Avaliar o impacto de ciclos de U-S na rede de poros de pequenos agregados de um latossolo (2-4 mm) submetido a diferentes manejos.

1.4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Segmentar a parte sólida e porosa do solo de imagens tomográficas de alta resolução.
- Obter o VER de diferentes propriedades físicas de um Latossolo vermelho submetido a diferentes manejos do solo submetido a ciclos de umedecimento e secamento.
- Definir métodos para a determinar o VER com base em análise estatística dos dados.
- Verificar o efeito de processos como ciclos de U-S na definição do VER.
- Padronizar o processo de segmentação das imagens para o estudo comparativo das resoluções.
- Renderizar em 3D o esqueleto dos poros.
- Definir o VER em função da resolução da imagem.
- Verificar limitações na quantificação de propriedades físicas derivadas da tomografia com base na resolução.

- Avaliar a influência de modificações na rede de poros em função do manejo na definição do VER em função da resolução das imagens.
- Segmentar imagens de alta resolução de alta complexidade por meio do método de machine learning.
- Renderizar em 3D a parte porosa do solo.
- Quantificar propriedades micromorfológicas e geométricas com base em imagens 3D na escala de micrômetros.
- Determinar parâmetros relacionados com a dinâmica da água no solo, como a condutividade hidráulica.
- Verificar como o manejo do solo influencia na rede de poros após aplicação dos ciclos de U-S.

REFERÊNCIAS

AL-RAOUSH, R. I.; WILLSON, C. S. Extraction of physically realistic pore network properties from three-dimensional synchrotron X-ray microtomography images of unconsolidated porous media systems. **Journal of Hydrology**, v. 300, p. 44–64, 2005.

DA COSTA, P.A. et al. Changes in soil pore network in response to twenty-three years of irrigation in a tropical semiarid pasture from northeast Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 137, p. 23–32, 2014.

FERREIRA, T.R.; ARCHILHA, N.L.; PIRES, L.F. An analysis of three XCT-based methods to determine the intrinsic permeability of soil aggregates. **Journal of Hydrology**, v. 612, p.128024, 2022.

GAO, L. et al. Effect of different tillage systems on aggregate structure and inner distribution of organic carbon. **Geoderma**, v. 288, p. 97–104. 2017.

LEIJ, F.J.; GHEZZEHEI, T.A.; OR, D. Modeling the dynamics of the soil pore-size distribution. **Soil and Tillage Research**, v. 64, p. 61–78, 2002.

LIU, W. et al. Representative elementary volume evaluation of coal microstructure based on CT 3D reconstruction. **Fuel**, v. 336, p. 126965, 2023.

MA, R. et al. Evaluation of soil aggregate microstructure and stability under wetting and drying cycles in two Ultisols using synchrotron-based X-ray micro-computed tomography. **Soil and Tillage Research**, v.149, p. 1–11, 2015.

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, p. 897–907. 2008.

TSENG, C.L.; ALVES, M.C.; CRESTANA, S. Quantifying physical and structural soil properties using X-ray microtomography. **Geoderma**, p. 318, p. 78–87, 2018.

2 VOLUME ELEMENTAR REPRESENTATIVO INFLUENCIADO POR MANEJOS E PROCESSOS NO SOLO COM BASE NA ANÁLISE DO SISTEMA POROSO EM 3D

O estudo deste capítulo foi publicado no periódico científico *Agriculture*. Os dados referentes à publicação são os seguintes: Gaspareto, J.V.; Oliveira, J.A.T.d.; Andrade, E.; Pires, L.F. Representative elementary volume as a function of land uses and soil processes based on 3D pore system analysis. *Agriculture* **2023**, 13, 736. <https://doi.org/10.3390/agriculture13030736>

Contribuições dos Autores: Conceitualização, L.F.P.; metodologia, J.V.G., J.A.T.d.O. e L.F.P.; análise formal, J.V.G., E.A. e J.A.T.d.O.; investigação, J.V.G. e J.A.T.d.O.; redação — preparação do rascunho original, J.V.G., E.A. e L.F.P.; redação — revisão e edição, L.F.P.; administração do projeto, L.F.P.; obtenção de financiamento, L.F.P.

RESUMO

O volume elementar representativo (VER) é necessário para medidas representativas de propriedades físicas do solo. No entanto, na determinação do VER surgem algumas questões importantes como, por exemplo, se esse volume representativo é dependente de alterações na estrutura do solo ou se processos como ciclos de umedecimento e secamento (U-S) afetam sua determinação. Neste estudo, realizou-se uma análise detalhada do VER na medida de propriedades físicas do solo com base em imagens de microtomografia de raios X (μ TC) de alta resolução em três dimensões (3D). Os sistemas de manejo estudados foram (plantio convencional (PC), plantio direto (PD) e plantio cultivo mínimo (PM)). As amostras foram submetidas a zero (referência) e seis ciclos de U-S. Além disso, foi investigado se o esquema de seleção de subvolumes usado influenciaria na definição do VER. Para isto foram selecionados dois esquemas, cubo e paralelepípedo, sendo o primeiro empregado com frequência em estudos de VER. As propriedades físicas na escala micrométrica medidas foram porosidade imageada (P), dimensão fractal (DF), grau de anisotropia (GA) e conectividade de poros (C). Os resultados mostram que o VER depende principalmente do manejo do solo quando propriedades como P e C (ambos os esquemas de seleção) estão sendo medidas. O método do paralelepípedo exibiu menor VER em relação ao método do cubo. Esse resultado é explicado pelo maior volume analisado no primeiro, o qual compensa flutuações nas propriedades físicas medidas. Não foi possível definir um VER para GA devido à heterogeneidade em porções das amostras. O VER obtido pelo método do cubo foi mais sensível a mudanças na escala de análise, apresentando uma tendência crescente com os ciclos de U-S para P e DF. Os resultados apresentados têm implicações práticas significativas para a física do solo, particularmente na melhoria da precisão e confiabilidade da medição das propriedades físicas do solo em microescalas. Compreender que o VER não é fixo, mas influenciado pelos sistemas de manejo e processos que ocorrem no solo, como ciclos de U-S, destaca a necessidade de abordagens mais cuidadosas na análise do solo. A constatação de que o VER varia com os sistemas de manejo e que a escolha do método de seleção de subvolumes (cubo vs. paralelepípedo) afeta a precisão da medição fornece orientações para o planejamento de experimentos e interpretação de dados. Especificamente, o método do paralelepípedo mostra menor flutuação em propriedades como porosidade e conectividade dos poros, que são críticas para modelar o transporte de água e solutos no solo. Além disso, o estudo ressalta que o VER deve ser medido para cada

situação específica, a fim de apresentar resultados coerentes de propriedades físicas para o desenvolvimento de modelos na área de recursos hídricos e no planejamento de estratégias para a redução do impacto ambiental de práticas agrícolas.

ABSTRACT

The representative elementary volume (REV) is essential for accurately measuring soil physical properties. However, determining the REV raises several important questions, such as whether this representative volume depends on changes in soil structure or if processes like wetting and drying cycles (W-D) influence its determination. In this study, we conduct a detailed analysis of the REV in measuring soil physical properties using high-resolution three-dimensional (3D) micro-X-ray computed tomography (μ CT) images. The management systems examined include conventional tillage (CT), no-tillage (NT), and minimum tillage (MT). The samples were subjected to zero (reference) and six wetting-drying cycles. We also explored whether the subvolume selection scheme affects the definition of REV. For this purpose, we selected two schemes: the cube and the parallelepiped, with the cube method being commonly used in REV studies. The physical properties measured on a micrometric scale included imaging porosity (P), fractal dimension (FD), degree of anisotropy (DA), and pore connectivity (C). The results indicate that REV primarily depends on soil management, particularly when measuring properties such as P and C, regardless of the selection scheme used. The parallelepiped method resulted in a lower REV compared to the cube method. This result can be attributed to the larger volume analyzed in the first instance, which helps offset fluctuations in the measured physical properties. We were unable to define REV for DA due to the heterogeneity found in some portions of the samples. The REV obtained through the cube method was more responsive to changes in the analysis scale, exhibiting an increasing trend with the U-S cycles for both P and FD. The results presented have significant practical implications for soil physics, particularly in improving the accuracy and reliability of measuring soil physical properties at micro scales. Understanding that the REV is not fixed but influenced by soil managements and processes such as W-D cycles highlights the need for dynamic approaches in soil analysis. The finding that REV varies with different tillage systems and that the choice of subvolume selection method (cube vs. parallelepiped) affects measurement precision provides essential guidance for designing soil experiments and interpreting data. Specifically, the use of larger parallelepiped volumes may offer more stable estimates of properties like porosity and pore connectivity, which are critical for modeling water and solute transport in soils. Moreover, the study underscores that REV must be context-specific, adapting to structural changes over time, which is crucial for developing accurate, scale-appropriate models in soil hydrology and environmental management.

2.1 INTRODUÇÃO

Qualquer medição de propriedades físicas do solo requer amostras representativas. Quando essas amostras não são representativas, os parâmetros físicos medidos apresentarão flutuações pelo volume de amostra analisado se encontrar na região de domínio microscópico (Bear, 1972). Assim, aumentando o volume da amostra faz com que se migre da região do domínio microscópico para a região de domínio do sistema poroso (Gane et al., 2004; Gerke; Karsanina, 2021).

O volume mínimo necessário para que a amostra se torne representativa é chamado de volume elementar representativo (VER). Este volume elementar indica que a propriedade física medida se torna independente do tamanho da amostra, ou seja, qualquer volume selecionado a partir desse mínimo mostrará uma dada estabilidade na propriedade medida (Vandenbygaart; Protz, 1999). Diferentes fatores podem influenciar o VER, como os diferentes manejos do solo, que são ações antrópicas geralmente conduzidas em áreas agrícolas.

Quando o solo é submetido a diferentes sistemas de manejo, mudanças significativas podem ocorrer em sua estrutura. No plantio convencional (PC), as camadas mais superficiais do solo sofrem mudanças significativas, devido ao seu revolvimento pela ação de arados e grades (Lipiec et al., 2006; Álvaro-Fuentes et al., 2008). Já em práticas consideradas conservacionistas como o plantio direto (PD), os restos vegetais são mantidos na camada superficial do solo, contribuindo para a preservação de sua estrutura, maior estabilidade de agregados e maior aporte de material orgânico (Galdos et al., 2019; Cooper et al., 2021). Outra técnica geralmente considerada mais conservacionista é o plantio cultivo mínimo (PM), que apresenta algumas características do PD e PC, uma vez que a camada superficial do solo é submetida de tempos em tempos a intervenções (Li et al., 2021).

Quando a estrutura do solo é analisada na escala micrométrica, cada tipo de manejo é capaz de causar alterações significativas na arquitetura dos poros do solo (Deurer et al., 2009; De Oliveira et al., 2021). Propriedades físicas como a porosidade, a distribuição dos tamanhos e formatos dos poros e o número de poros podem ser modificadas drasticamente, principalmente no caso de manejos que revolvem as camadas mais superficiais do solo (Gao et al., 2017; Borges et al., 2018; Tseng et al., 2018; Pires et al., 2022). Outras propriedades relacionadas com a complexidade da rede de poros, como a conectividade, a tortuosidade, o grau de anisotropia e a dimensão fractal, também são sensíveis as modificações na estrutura do solo (Dal Ferro et al., 2013; Ferreira et al., 2018; Camargo et al., 2022; De Oliveira et al., 2022). Assim, quando essas propriedades não são medidas usando amostras representativas, os resultados flutuam em função das características microscópicas das amostras e não das eventuais variabilidades encontradas no campo (Bear, 1972; Vogel et al., 2002; Assouline; Or, 2013; Gerke; Karsanina, 2021). Portanto, para que as propriedades físicas medidas representem as características intrínsecas do solo são necessárias amostras com tamanhos representativos.

Desta forma, como o solo está frequentemente submetido a manejos que afetam sua estrutura – principalmente na camada superficial, é razoável se perguntar como diferentes manejos são capazes de afetar o VER. A resposta a esse questionamento é importante porque

o manejo, considerando um mesmo tipo de solo, pode fazer com que volumes diferentes de amostras sejam necessários para medir representativamente uma mesma propriedade física.

Porém, além do manejo, o solo é frequentemente submetido a diferentes tipos de processos, sendo um deles a alternância de ciclos de umedecimento e secamento (U-S). Esses ciclos são capazes de causar modificações significativas na rede de poros do solo, geralmente associadas ao caráter expansivo de alguns tipos de solos, ricos em argilas como, esmectitas e ilitas, à coalescência dos agregados, a alterações na estabilidade mecânica e estrutural dos agregados com o umedecimento, a modificações nas tensões existentes entre agregados com o secamento, entre outros processos (Leij et al., 2002; Da Costa et al., 2014; Ma et al., 2015; Zhang et al., 2018; Wang et al., 2022;). Como o solo está constantemente sujeito a processos dinâmicos, que podem afetar sua estrutura, outra pergunta interessante é verificar se o VER sofre variações a partir de mudanças na arquitetura dos poros com os ciclos de U-S.

O advento de técnicas que permitem a análise tridimensional (3D) da estrutura do solo, como a Microtomografia de Raios X (μ TC), permitiu o estudo de inúmeras propriedades geométricas e morfológicas dos poros do solo na escala micrométrica (Peth et al., 2008; Ma et al., 2015; Gao et al., 2017; Ferreira et al., 2022). A μ TC é considerada uma técnica não destrutiva e não invasiva aplicada à investigação da estrutura interna de materiais porosos, como o solo (Tseng et al., 2018). Métodos não destrutivos possibilitam a avaliação e verificação de parâmetros morfológicos do solo sem afetar suas propriedades originais ou causar danos à sua estrutura (Koestel et al., 2021).

A técnica de μ TC é baseada na interação de raios X com o material sendo analisado. As diferenças de densidade do material geram imagens com diferentes tons de cinza após a interação com os raios X. Materiais mais densos tendem a apresentar tons mais claros na imagem em relação aos materiais menos densos. A aquisição da imagem envolve a varredura da amostra em uma mesa rotativa para obter uma série de imagens bidimensionais (2D) (radiografias). A combinação das fatias 2D permite a aquisição de imagens 3D do objeto de interesse. Variações no tamanho da amostra escaneada, no tamanho e na resolução do detector e na posição da amostra entre a fonte de raios X e o detector também influenciam a resolução e a precisão da imagem (Carmignato; Dewulf; Leach, 2018; Schroer; De Carlo, 2020; Mooney et al., 2022).

Vale ressaltar que a determinação de qualquer propriedade física do solo por μ TC requer amostras representativas. Portanto, essa técnica torna-se ideal para a definição do VER, pois permite análises no interior das amostras por intermédio da seleção de diferentes subvolumes a partir do volume máximo representado pela amostra (Borges et al., 2018; Juyal et al.,

2018; Koestel et al., 2021). Além disso, a μ TC possibilita a escolha de subvolumes em regiões distintas no interior das amostras e a definição de diferentes esquemas de seleção de subvolumes (Baveye et al., 2002; Costanza-Robinson et al., 2011). Desta forma, é possível analisar flutuações nas propriedades morfológicas obtidas pela μ TC, como a porosidade imageada, a conectividade dos poros, a anisotropia e a dimensão fractal. Esse tipo de análise permite definir os tamanhos mais adequados de amostras a serem analisados pela μ TC. Outra vantagem da escolha de amostras representativas é a otimização da resolução da imagem, que é função do volume de amostras escaneado. Isto possibilita a avaliação de diferentes processos no solo com base no tamanho e formato dos poros.

Assim, este estudo está baseado em três hipóteses: (1) o VER é afetado por diferentes sistemas de manejo do solo, (2) o VER é influenciado por ciclos de umedecimento e secamento, e (3) diferentes esquemas de seleção (cubo e paralelepípedo) afetam a definição do VER. Para que essas hipóteses fossem respondidas foram utilizadas imagens 3D de μ TC de alta resolução. Os manejos do solo estudados foram plantio convencional, plantio direto e plantio cultivo mínimo. As amostras de solo foram submetidas a 0 e 6 ciclos de U-S. No entanto, é válido mencionar que o objetivo do estudo foi principalmente a definição do VER em função dos manejos, ciclos de U-S e esquemas de seleção. O objetivo do estudo não foi uma comparação entre manejos do solo.

2.2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.2.1 Área Experimental e Amostragem do Solo

Este estudo foi realizado por meio da coleta de amostras conduzida na Fazenda de Pesquisa do IDR (25°06' S, 50°09' W; 875 m acima do nível do mar) localizada no município de Ponta Grossa, Paraná. O solo analisado foi um Latossolo Vermelho Distrófico (Dos Santos et al., 2018). O solo foi coletado na camada superficial (0-10 cm). A sua textura foi classificada como argilosa apresentando os seguintes valores: 58% argila (< 2 μ m de diâmetro), 28% silte (2-50 μ m de diâmetro) e 14% areia (50-2000 μ m de diâmetro). Esses valores foram obtidos considerando a média da textura determinada em cada sistema de manejo estudado. A precipitação pluvial média na região está entre 1400 e 1600 mm por ano e as temperaturas médias anuais variam entre 17 a 18 °C. O clima é classificado como subtropical úmido (Cfb) de acordo com o sistema de classificação de Köppen (Nitsche et al., 2019).

As amostras foram coletadas em um experimento de campo de longa duração, iniciado em 1981, contendo os seguintes tipos de manejos: (1) plantio convencional (PC), (2) plantio

cultivo mínimo (PM) e (3) plantio direto (PD). A parcela sob PC foi preparada arando-se o solo com um disco de 70 cm duas vezes ao ano até uma profundidade de 25 cm, seguido por duas gradagens na profundidade de 60 cm. A parcela sob PD foi submetida apenas às operações de semeadura e limpeza sem o revolvimento do solo. A parcela sob PM foi preparada usando arado escarificador até 25 cm de profundidade, seguida por uma gradagem na profundidade de 60 cm. Para as parcelas sob PM e PD, os restos culturais foram mantidos na superfície do solo. As amostras sob PC foram coletadas aproximadamente seis meses após o preparo do solo.

As amostras de solo foram coletadas seguindo o método do anel de Kopeck usando cilindros de aço inoxidável com diâmetro e altura de aproximadamente 5 cm. Primeiro, os restos culturais (PD e PM), serapilheira e pequenas plantas foram retirados da superfície do solo usando uma enxada. Em seguida, o anel volumétrico (cilindro) com a borda biselada foi inserido na superfície do solo. Um bloco de madeira foi colocado no topo do anel e usando um martelo de borracha o anel foi cuidadosamente inserido até a profundidade desejada. Para isto foi encaixado um anel acima do outro. Na sequência, o solo foi cuidadosamente escavado ao redor do anel volumétrico, sem exercer pressão sobre ele, para a sua retirada. Uma desempenadeira foi posicionada sob o anel volumétrico para levantá-lo cuidadosamente e evitar perdas de solo.

Em seguida, o excesso de solo exterior ao volume interno dos cilindros de aço foi cuidadosamente aparado com uma faca de lâmina plana para garantir que o volume de solo fosse igual ao volume interno do cilindro (Booman; Leiker, 2021). Após a coleta, as amostras foram embrulhadas em filme plástico e colocadas em um porta-amostras cilíndrico de plástico para serem transportadas ao laboratório. Para minimizar os danos à estrutura do solo, devido à força necessária para a coleta no cilindro, as amostras foram coletadas alguns dias após uma chuva de alta intensidade, com o solo próximo à sua capacidade de campo. Além disso, as amostras foram coletadas nas linhas da cultura para evitar a compactação devido ao tráfego de implementos agrícolas. No total, foram coletadas seis amostras para cada manejo do solo ($3 \times 6 = 18$ amostras). Todas as amostras foram coletadas após a colheita do milho (*Zea mays L.*) (Borges et al., 2019; Pires et al., 2019).

2.2.2 Ciclos de Umedecimento e Secamento (U-S)

Após a realização da toaleta das amostras, um pano do tipo *silk screen* foi colocado em uma de suas superfícies para permitir o umedecimento e contato hidráulico com a superfície

de areia na mesa de tensão. O processo de saturação das amostras foi por ascensão capilar, o qual foi realizado lentamente, colocando-se inicialmente uma quantidade de água de aproximadamente 5 a 10 mm na base das amostras. Após aproximadamente duas horas, mais 5 mm de água foram adicionados a cada hora, até aproximadamente 8/10 da altura máxima dos cilindros contendo as amostras. O processo de saturação foi concluído após um período de 48 h. Após a etapa de saturação, as amostras foram colocadas em uma mesa de tensão (Eijkelkamp-modelo 08.01 *SandBox*) e submetidas a um potencial matricial de -6 kPa, equivalente a um diâmetro de poro de aproximadamente 50 μm (equação de Young-Laplace). O tempo necessário para o equilíbrio hidráulico foi de três dias, quando a saída de água do sistema de exaustão da mesa de tensão cessou.

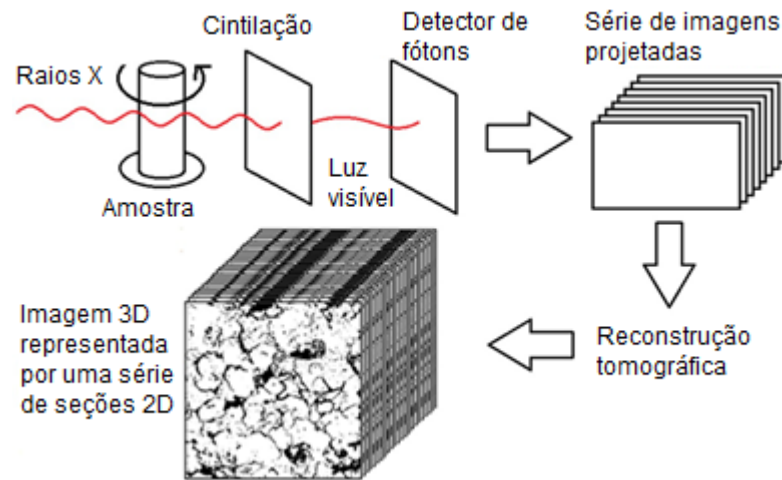
Em seguida, as amostras foram cuidadosamente retiradas da mesa de tensão e submetidas a um novo processo de umedecimento e subsequente secamento. Este procedimento repetiu-se por seis vezes completando um total de seis ciclos de umedecimento e secamento. As amostras submetidas aos ciclos foram comparadas com aquelas não submetidas a qualquer tipo de tratamento. O número de ciclos foi escolhido de acordo com o número médio de eventos de chuva mais intensa nos meses mais chuvosos.

2.2.3 Microtomografia Computadorizada de Raios X (μTC)

As amostras de solo foram escaneadas em um sistema tomográfico de raios X da marca Nikon modelo XT V 130C. As imagens foram reconstruídas em 32 bits, para evitar a compressão do histograma em escala de cinza, com um tamanho de voxel de aproximadamente 35 μm . Na reconstrução foi usado o programa Inspect-X/CT Pro 3D (Figura 2.1). Os ajustes de tensão, corrente e tempo de exposição para todas as amostras escaneadas foram 125 kV, 140 μA e 250 ms, respectivamente. Visando minimizar artefatos ocasionados pelo endurecimento do feixe, um filtro de Cu de 0,25 mm foi inserido próximo à fonte de raios X.

Após a reconstrução, as imagens foram importadas para o Volumetric Graphics (VG) StudioMAX® 2.0 e para o ImageJ 1.42 (Rasband, 2007). No último, as imagens foram cortadas em um formato cúbico usando a ferramenta *Crop*. O corte foi realizado para evitar possíveis regiões compactadas próximas às paredes dos cilindros. Com isto, definiram-se as regiões de interesse com as seguintes dimensões para cada amostra: $30,1 \times 30,1 \times 30,1 \text{ mm}^3$ ($860 \times 860 \times 860$ pixels).

Figura 2.1 Desenho esquemático representando o procedimento de aquisição de imagens pela técnica de Microtomografia Computadorizada de Raios X (μ TC).

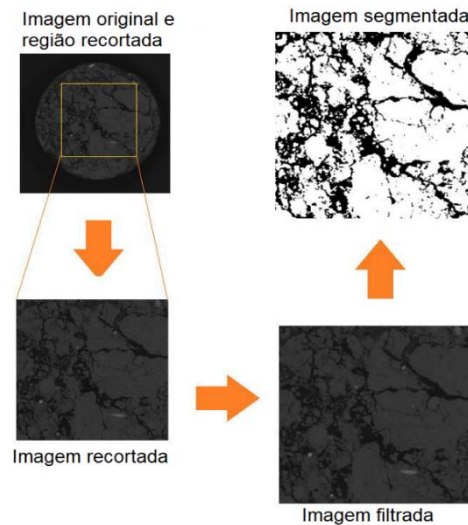


Fonte: Gaspareto et al. (2023).

As imagens iniciais de tomografia em níveis de cinza foram processadas usando o software ImageJ 1.42. Primeiramente, as imagens foram submetidas aos seguintes processos antes da segmentação: (1) passagem de filtro *median 3D* para reduzir o ruído nas imagens, com um raio de 2 pixels e (2) passagem da ferramenta *unsharp masking* (0,5%) visando melhorar o contraste das imagens.

O procedimento de segmentação foi baseado nos histogramas em escala de cinza das imagens 2D, as quais foram convertidas de 32 bits em 8 bits (256 tons de cinza) antes da segmentação. Os diferentes materiais que compõem o solo produzem picos que estão relacionados à atenuação de fótons de raios X. Para as amostras secas analisadas aqui, ocorrem dois picos, com os tons de cinza mais baixos e mais altos nos histogramas representando a atenuação pelos materiais de menor (ar) e maior (sólido) densidade. Assim, a existência de dois picos no histograma está relacionada a um material composto de duas fases. Quando essas duas fases apresentam boa separação, métodos de segmentação global podem ser usados. Logo, o processo de segmentação foi baseado no método de limiar não paramétrico e não supervisionado desenvolvido por Otsu (1979). Para inspecionar a qualidade da segmentação, foram utilizadas ferramentas de zoom do ImageJ para avaliar diferentes porções das imagens. Com a segmentação foi obtida uma imagem binária, na qual os poros e os sólidos foram representados por pixels na cor preta e branca (Figura 2.2).

Figura 2.2 Desenho esquemático mostrando os procedimentos básicos realizados no processamento e segmentação das imagens tomográficas. A imagem apresentada representa uma seção 2D de uma amostra do solo sob sistema de manejo de plantio convencional. Na imagem segmentada os poros estão representados na cor preta e os sólidos na cor branca.

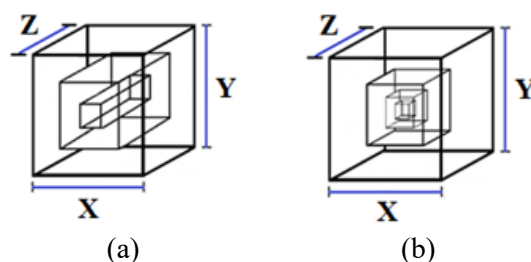


Fonte: Gaspareto et al. (2023).

2.2.4 Seleção dos Subvolumes

Para o estudo do VER as imagens foram recortadas em diferentes subvolumes utilizando duas abordagens distintas: (1) paralelepípedo concêntrico no qual um eixo fixo (z = profundidade da amostra) foi definido e os subvolumes foram selecionados concentricamente a partir deste eixo (Figura 2.3a) e (2) cubos concêntricos no qual um subvolume cúbico foi selecionado no centro da região de interesse (ROI) e subvolumes cada vez maiores foram selecionados a partir do menor selecionado até todo o volume de interesse (VOI) fosse atingido (Figura 2.3b). Os recortes resultantes de todos os subvolumes foram realizados com o software REVaux (Borges, 2015). Com o auxílio deste programa, determinou-se o número de seções recortadas, os seus tamanhos em 3D e para isso a seção central foi usada como referência.

Figura 2.3 Desenho esquemático dos procedimentos de seleção de subvolumes. O primeiro (a) representa o esquema de seleção baseado em paralelepípedo concêntrico (eixo z fixo = profundidade da amostra) e o segundo (b) a geometria de cubo centralizado.

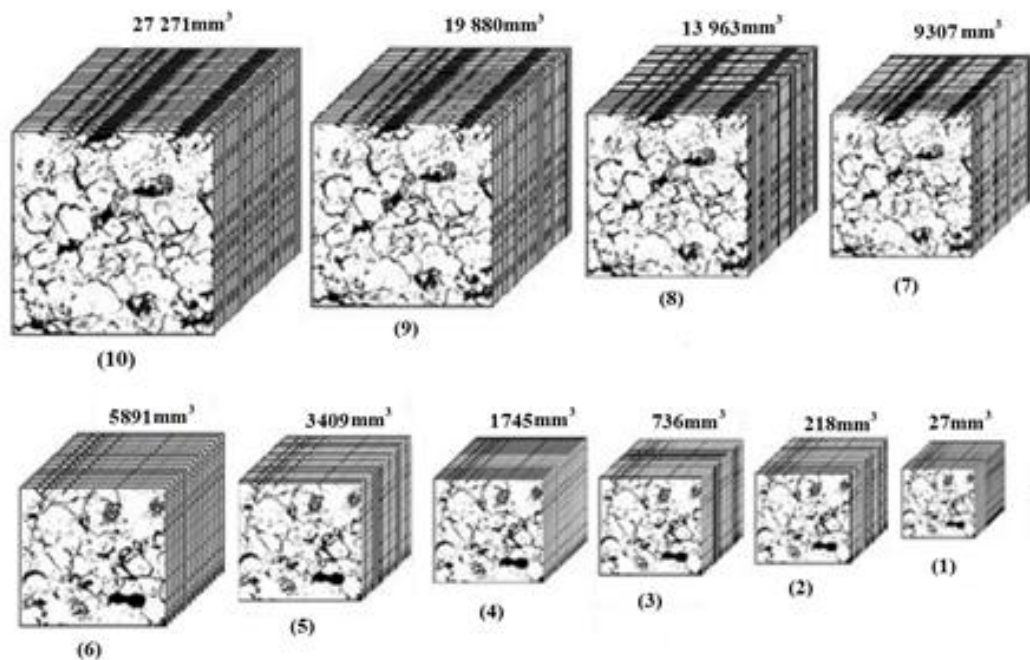


Fonte: Gaspareto et al. (2023).

Os métodos escolhidos para a seleção dos subvolumes foram semelhantes aos baseados no artigo de Costanza-Robinson et al. (2011). Esses autores usaram duas abordagens, a geometria tradicional do cubo centrado, crescendo simetricamente a partir de um volume central, e a geometria da janela cuboide centrada. No último caso, um dos eixos tem uma altura fixa igual à altura da imagem. Outros estudos que empregaram procedimentos de seleção similares para a definição do VER foram os desenvolvidos por Yio et al. (2017), Baveye et al. (2002), Koestel et al. (2020) e Wu et al. (2020).

A Figura 2.4 mostra a seleção de subvolumes obtida para os cubos após o procedimento de recorte da imagem 3D. Essa escolha foi feita, como já mencionado, com base em cubos e paralelepípedos centralizados selecionados ao longo de um eixo central de simetria. O procedimento de recorte de subvolumes foi realizado sem extrapolar o VOI máximo previamente estabelecido (27.271 mm^3).

Figura 2.4 Desenho ilustrativo dos subvolumes selecionados para a análise do volume elementar representativo (VER) (esquema de cubo concêntrico). As informações acima e abaixo das imagens indicam o tamanho e o número dos subvolumes analisados, respectivamente.



Fonte: Gaspareto et al. (2023).

Nove pequenos subvolumes foram adquiridos por meio do recorte do VOI. A Tabela 2.1 traz a escala de comprimento da janela (L) e os subvolumes selecionados para ambos os esquemas (cubo e paralelepípedo).

Tabela 2.1 Escala de comprimento de caixa (L) e subvolumes (V) selecionados para a análise do volume elementar representativo (VER) para os esquemas de seleção de subvolumes (cubo e paralelepípedo) estudado. O maior subvolume (subvolume 10) representa todo o volume de interesse (VOI).

Subvolumes (V)	Comprimento da caixa (L)	Paralelepípedo	Cubo
	(mm)	(mm ³)	
1	3,0	271	27
2	6,0	1.084	216
3	9,0	2.438	729
4	12,0	4.334	1.728
5	15,1	6.863	3.442
6	18,1	9.861	5.930
7	21,0	13.274	9.261
8	24,1	17.482	13.998
9	27,1	22.106	19.903
10	30,1	27.271	27.271

Fonte: Gaspareto et al. (2023).

2.2.5 Propriedades Físicas do Solo Medidas pela Microtomografia

Os parâmetros físicos selecionados para a determinação do VER foram: a porosidade imageada (P), a dimensão fractal (DF), o grau de anisotropia (GA) e a conectividade dos poros (C). Essas propriedades foram calculadas usando plugins específicos do software ImageJ 1.42. A porosidade foi obtida usando a função *voxel counter* no ImageJ. Após a contagem dos voxels referentes aos poros (V_{voxel}), o volume ocupado por eles ($V_{\text{poro total}}$) foi dividido pelo volume total da imagem (V_{imagem}) conforme procedimento apresentado em Borges et al. (2019):

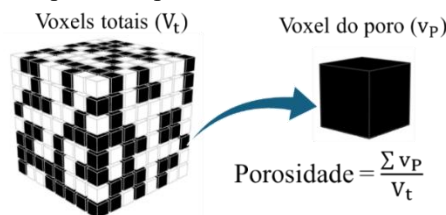
$$V_{\text{poro}} = V_{\text{voxel}}(vr)^3 \quad (2.1)$$

$$V_{\text{poro total}} = \sum V_{\text{poro}}, \quad (2.2)$$

$$P(\%) = \left(\frac{\sum V_{\text{poro}}}{V_{\text{imagem}}} \right) 100, \quad (2.3)$$

onde vr representa a resolução do voxel (mm³) e P (%) a porosidade imageada expressa como uma porcentagem. A figura a seguir ilustra o processo citado acima.

Figura 2.5 Representação de um volume de interesse (VOI) cúbico, os cubos menores brancos representam os voxels da parte sólida e os pretos os da parte dos poros.



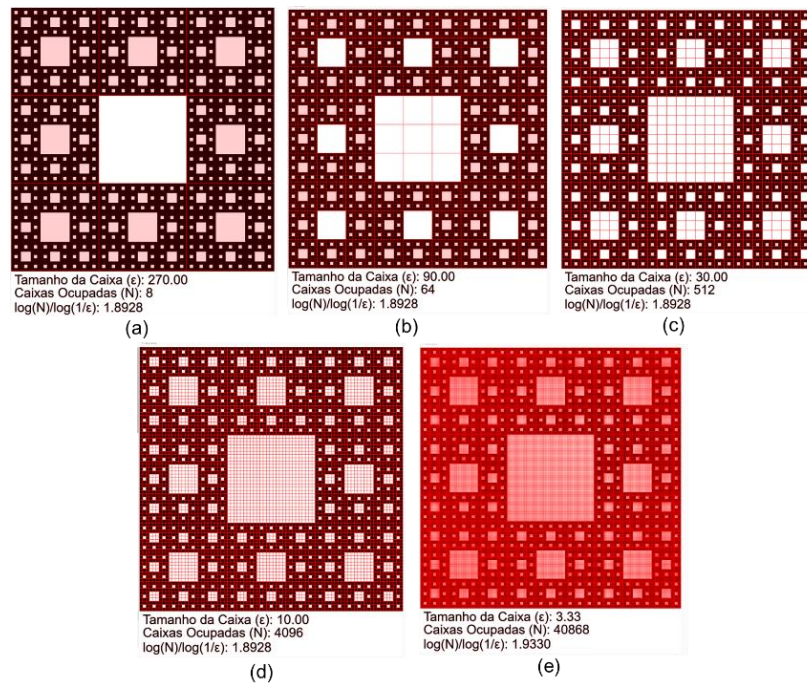
Fonte: O autor.

A dimensão fractal fornece um método sistemático para identificar complexidades em estruturas internas em diferentes escalas (Caniego et al., 2019). A medição da dimensão fractal de qualquer sistema ou meio poroso reflete, portanto, a sua heterogeneidade. Para o cálculo da DF foi utilizado o plugin *fractal dimension* no ImageJ, o qual é baseado no método de contagem de caixas. Neste método, a DF representa a inclinação da reta do gráfico de $\log(N)$ (eixo y) em relação ao $\log(r)$ (eixo x):

$$DF = \frac{\log(N)}{\log(r)} \quad (2.4)$$

onde N representa o número de caixas que cobrem o objeto em análise, enquanto r é o inverso do tamanho da caixa. A seguir uma representação desse método aplicado a uma imagem em duas dimensões.

Figura 2.6 Aplicação do método Box counting para uma figura em 2D. Para tamanho de caixas 270 (a), 90 (b), 30 (c), 10 (d) e 3,33 (e). As linhas vermelhas representam as divisões das caixas.

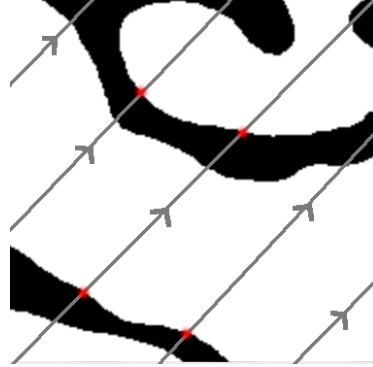


Fonte: O autor.

O grau de anisotropia (GA) fornece informações sobre como as propriedades do material variam dependendo da direção em que são medidas. Geralmente, essa propriedade tem valores que variam de 0 a 1. O primeiro caso significa que a propriedade analisada é inteiramente isotrópica; a amostra não tem nenhuma direcionalidade ($SE=LE$). No segundo caso, há uma orientação de estruturas específicas na imagem ($LE \gg SE$). Neste estudo o plugin *BoneJ* foi usado para calcular o GA. O método empregado é baseado no *Mean Intercept Length*

(MIL), inicialmente o software lança uma grade de linhas (vetores) de teste através da imagem do volume do solo em múltiplas direções no espaço 3D (ângulos θ, ϕ) (Figura 2.7).

Figura 2.7 Conjunto de vetores de comprimento medido de um ponto vermelho a outro, interceptando os poros (cor preta) no processo de cálculo do grau de anisotropia (GA) dos poros.



Fonte: Doube et al. (2010).

Para cada direção, conta-se quantas vezes as linhas cruzam a interface poro-sólido ($I(\theta, \phi)$). O Comprimento Médio de interceptação para uma direção específica é calculado pela seguinte equação:

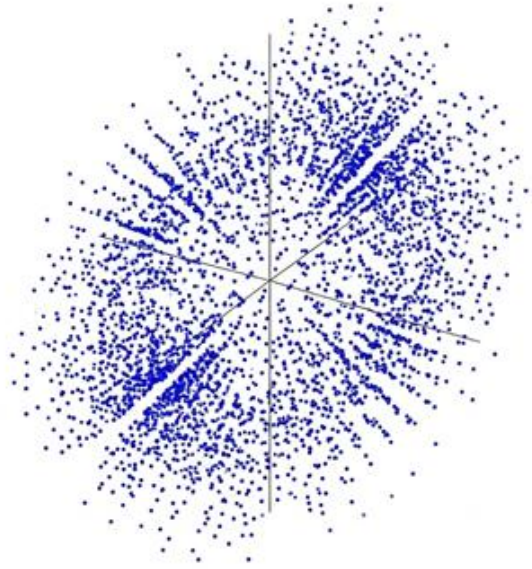
$$MIL(\theta, \phi) = \left(\frac{L}{I(\theta, \phi)} \right) \quad (2.5)$$

Em que MIL é o comprimento medio de interceptação, L é o comprimento da linha de interceptação e ($I(\theta, \phi)$) é o numero de interceptações de cada linha. Ao plotar o valor de MIL em coordenadas polares para todas as direções, forma-se uma nuvem de pontos que, estatisticamente, aproxima-se de um elipsoide (Figura 2.8). A equação desse elipsoide pode ser escrita na forma matricial, como a seguir:

$$\frac{1}{MIL^2(n)} = n^T M n \quad (2.6)$$

Em que M é o tensor fabrico e n é o vetor unitário de direção.

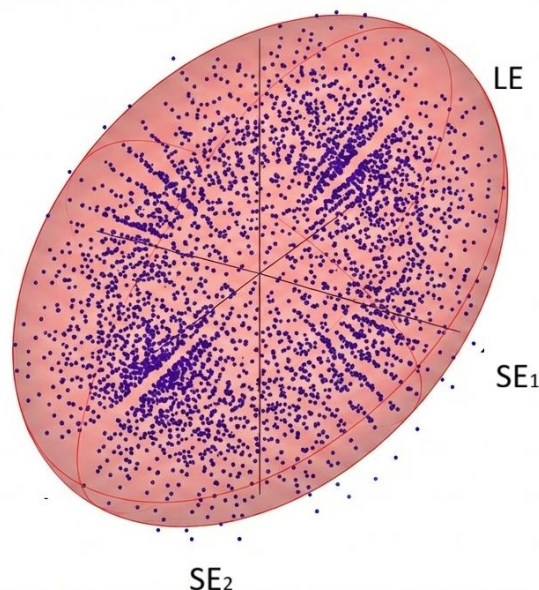
Figura 2.8 Valores de MIL plotados em coordenadas polares para todas as direções, formando uma nuvem de pontos que, estatisticamente, aproxima-se de um elipsoide.



Fonte: O autor.

A diagonalização da matriz M fornece os três autovalores (LE , $SE_1 \sim SE_2$) e os autovetores correspondentes (que indicam as direções principais da anisotropia) em seguida um elipsoide é ajustado estatisticamente a essa nuvem de pontos. Este elipsoide (Figura 2.9) representa o Tensor Fabrico. Seus eixos principais (LE , $SE_1 \sim SE_2$) são os autovalores do tensor. O eixo maior (LE) indica a direção de máxima continuidade dos poros, enquanto o menor (SE_1 ou SE_2) indica a direção de mínima continuidade (Doubé et al., 2010).

Figura 2.9 Elipsoide ajustado estatisticamente a nuvem de pontos do MIL, representando o Tensor Fabrico.



Font: O autor.

Dessa forma, a seguinte equação foi usada na obtenção de GA (Tseng et al., 2018):

$$GA = \left(1 - \frac{SE}{LE}\right) \quad (2.7)$$

onde SE e LE representam os menores e maiores autovalores, respectivamente.

A conectividade é uma característica geométrica que fornece informações sobre a distribuição dos poros da rede porosa, por intermédio da medição do número de caminhos independentes entre dois pontos no espaço, caracterizando o grau de interconexão entre os poros (Dullien, 1992). A medição da conectividade foi realizada após a passagem do filtro *purify* no BoneJ (Doube et al., 2010). Esse comando isola o maior componente, ou seja, ele identifica e remove todas as partículas (ou seja, regiões de pixels conectados) da imagem, com exceção da maior delas, tanto para o material sólido (foreground) quanto para o espaço poroso (background). Em outras palavras, o software assume que, em um sistema poroso, a maior partícula do foreground é o esqueleto sólido, e a maior partícula do background é o sistema de poros interconectados. Ao remover todas as outras partículas menores e isoladas, o *purify* garante que a análise subsequente se concentre apenas no principal componente conectado do sistema, eliminando ruídos ou artefatos que não representam a estrutura principal.

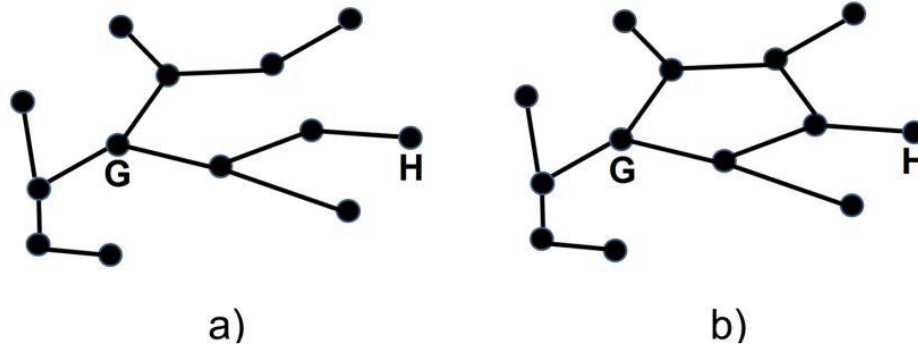
Em seguida, a ferramenta de conectividade foi utilizada nas medições de C. A quantificação da conectividade dos poros foi realizada com base na medição do número de Euler (NE) de acordo com as seguintes equações:

$$NE = N - C + H, \quad (2.8)$$

$$C = 1 - NE, \quad (2.9)$$

onde N representa o número de objetos conectados, C indica o número de conexões redundantes, que se refere à conectividade ou gênero, e H representa o número de cavidades fechadas. De acordo com Vogel et al. (2002), quando o número de Euler é analisado, seu valor será positivo quando o número de poros isolados não conectados exceder o número de conexões múltiplas entre os poros ($N > C$). Para uma rede de poros totalmente conectada, o número de Euler será negativo ($C \gg N = 1$). Nessa situação, NE conta o número de conexões múltiplas e corresponde ao número de malhas na rede de poros (Figura 2.10). Como o filtro *purify* remove todas as cavidades fechadas isoladas H tende a zero, simplificando a equação 2.8.

Figura 2.10 Representação das a) conexões simples (apenas um caminho do ponto G ao ponto H); e b) conexões múltiplas (dois caminhos do ponto G ao ponto H) de uma rede de poros.



Fonte: Gaspareto (2018).

2.2.6 Estimativa do Volume Elementar Representativo (VER)

Os valores médios das propriedades físicas obtidos para cada subvolume e esquemas de seleção foram utilizados para estimar o VER. A definição do VER foi baseada na escala de comprimento de janela (L) para os dois esquemas de seleção, conforme mostrado na Figura 2.3, onde $L = x$. No esquema de cubo, L é igual a $V^{1/3}$ (Baveye et al., 2002); entretanto, no esquema de paralelepípedo, L representa um comprimento efetivo a partir do centro do subvolume, mantendo sempre um eixo fixo (z = profundidade) (Costanza-Robinson et al., 2011) (Figura 2.3a).

Os critérios empregados na escolha do VER foram os seguintes: (1) variação relativa (Equação (2.10)) dos valores médios das propriedades medidas (porosidade imageada, dimensão fractal, grau de anisotropia e conectividade dos poros) entre comprimentos de janela adjacentes não superior a 5%; (2) pelo menos três ou mais comprimentos de janela consecutivos não devem apresentar valores médios das propriedades medidas com base no critério de variação do primeiro item. Procedimento semelhante foi utilizado por Vandenbygaart e Protz (1999).

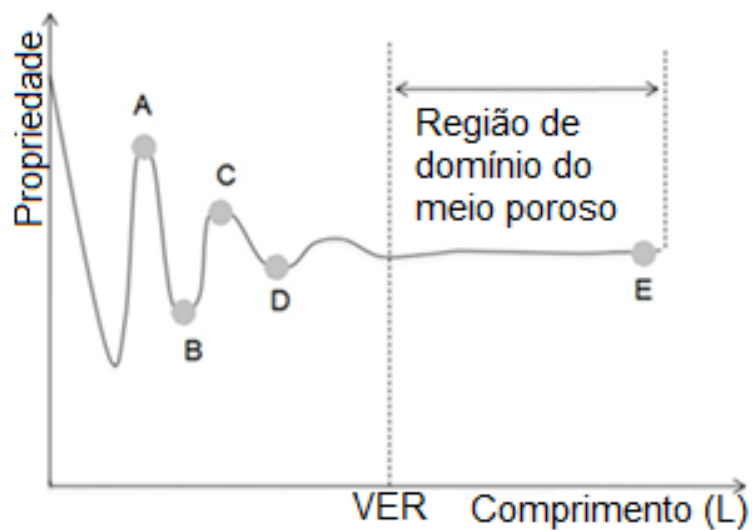
Por fim, vale mencionar que todos os valores médios das propriedades medidas devem apresentar valores de Δ menores que 5% (existência de um platô) para estimar o VER. Isso ocorre porque o valor do VER será estimado a partir do primeiro comprimento que apresentar valores médios das propriedades com $\Delta < 5\%$, indicando a existência de um platô, calculado pela seguinte equação:

$$\Delta^{i-1} = \left| \frac{\omega^i - \omega^{i-1}}{\omega^{i-1}} \right| 100 \quad (2.10)$$

onde Δ é a variação relativa expressa como uma porcentagem, ω é o valor médio da propriedade medida e i (1 a 10) indica cada um dos comprimentos de janela analisado (Tabela 2.1). O uso da Equação (2.10) foi baseado no artigo de Wu et al. (2020). O valor de $\Delta < 5\%$ foi selecionado considerando a variabilidade espacial para as propriedades estudadas. Em muitas situações, como para conectividade dos poros, o critério escolhido foi mais restritivo do que o utilizado por Wu et al. (2020), com base no coeficiente de variação.

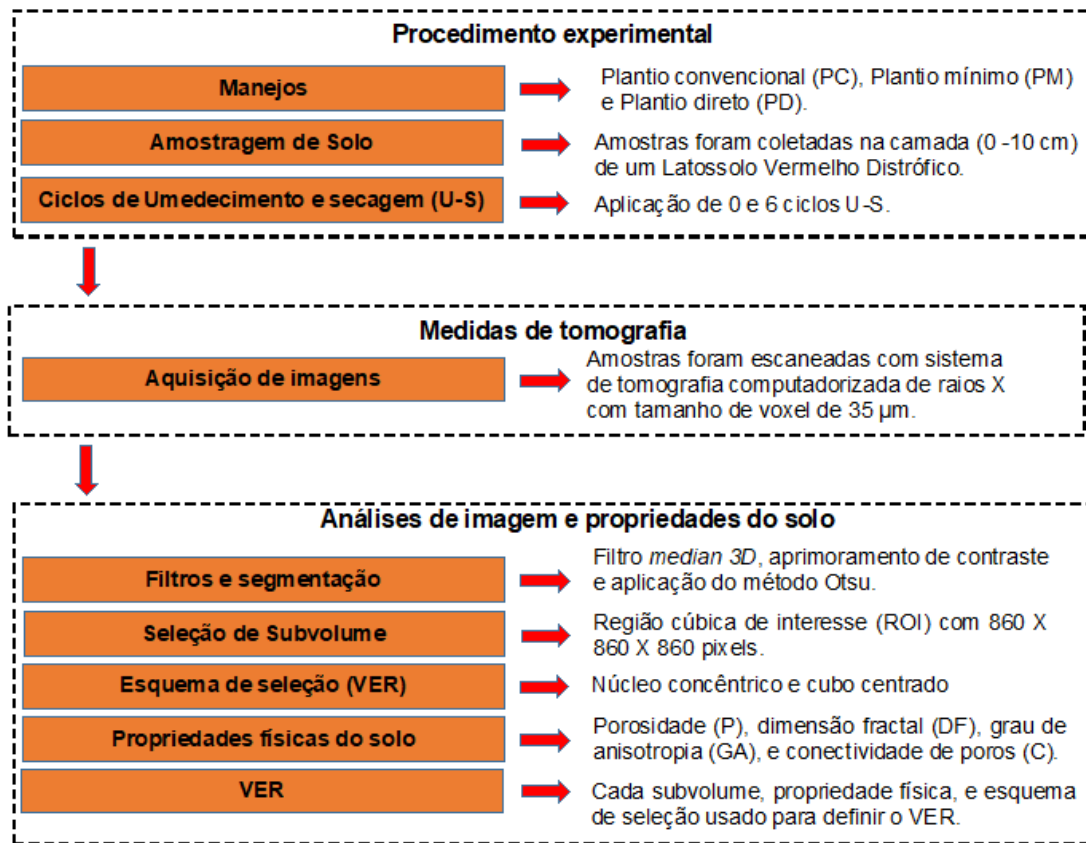
A Figura 2.11 ilustra a definição do VER considerando as regiões do domínio das flutuações microscópicas (à esquerda da linha pontilhada) e a região do domínio do meio poroso (à direita da linha pontilhada). A linha pontilhada indica o menor comprimento de janela (L) sobre o qual uma medição representativa pode ser realizada. A Figura 2.12 traz o fluxograma das principais etapas realizadas durante este estudo.

Figura 2.11 Representação esquemática da definição do volume elementar representativo (VER). As letras de A a E indicam a escala de comprimento da janela para a qual as propriedades de interesse foram medidas. A letra E indica o maior volume de amostra analisado por Tomografia Computadorizada de Raios X.



Fonte: Gaspareto et al. (2023).

Figura 2.12 Fluxograma contendo as etapas realizadas na execução desse estudo.



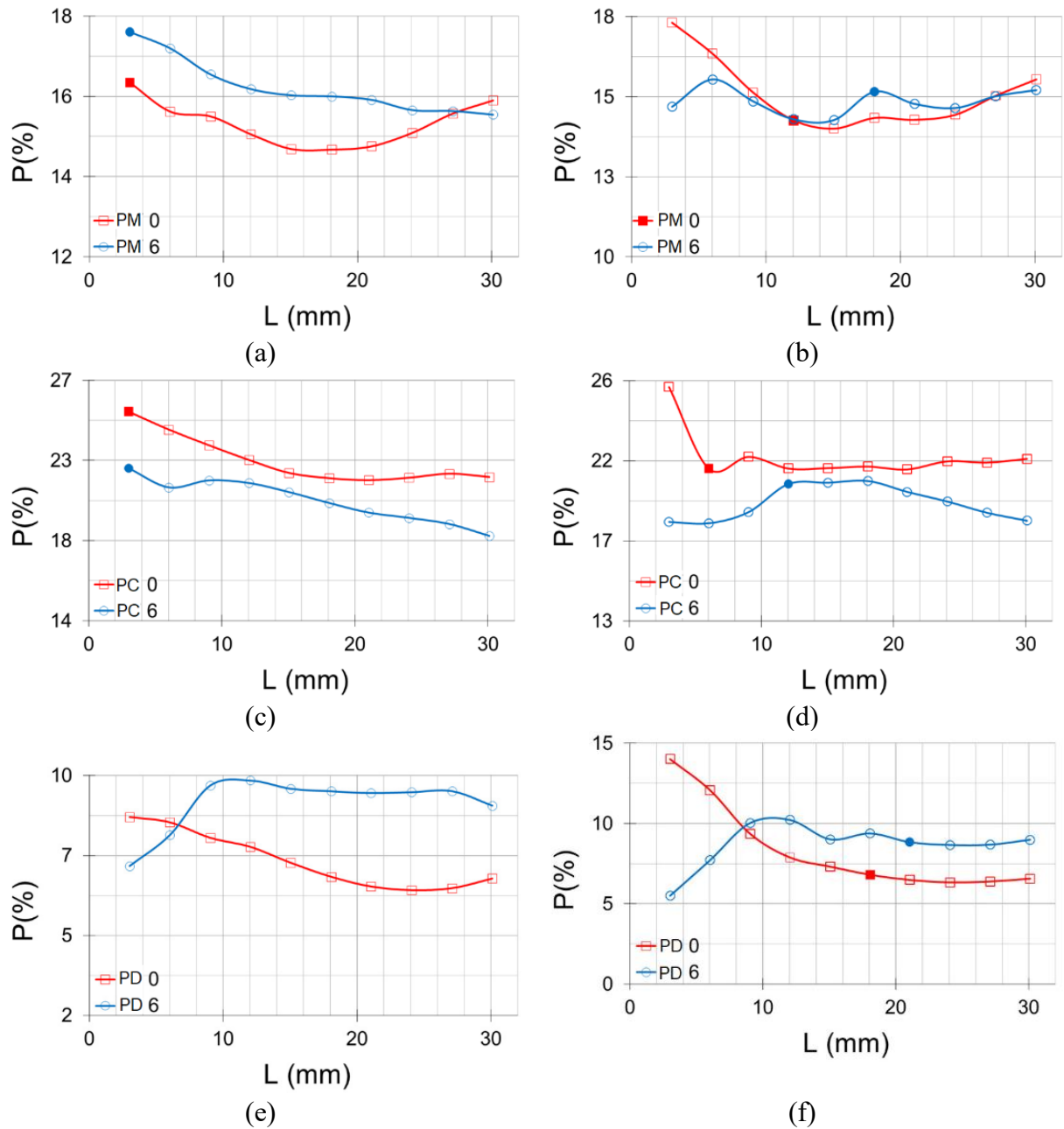
Fonte: Gaspareto et al. (2023).

2.3 RESULTADOS

2.3.1 Porosidade Imageada

Na Figura 2.13 é apresentado a determinação do VER para os dois esquemas de seleção de subvolume (paralelepípedo e cubo), sistemas de manejo e ciclos de U-S para a porosidade imageada. Nenhuma tendência foi observada entre VERs quando os diferentes métodos de seleção de subvolume foram empregados para P. No método do paralelepípedo, as amostras submetidas a 0 e 6 ciclos de U-S atingiram o VER para PM e PC para o mesmo comprimento de janela ($L = 3,0$ mm) (Figura 2.13a,c). Para PD (Figura 2.13e), o VER não foi atingido. No método do cubo, o VER foi alcançado em todos os manejos. Para PM (Figura 2.13b), o VER foi estimado em 12,0 mm (0 U-S) e 18,1 mm (6 U-S). Para PC (Figura 2.13d), o VER foi atingido em 6,0 mm (0 U-S) e 12,0 mm (6 U-S), enquanto para PD (Figura 2.13f), os valores encontrados foram 18,1 mm (0 U-S) e 21,0 mm (6 U-S). Os resultados obtidos pelo método do cubo demonstram que a porosidade foi sensível ao tipo de sistema de manejo e à aplicação dos ciclos U-S.

Figura 2.13 Porosidade imageada (P) em função das diferentes escalas de comprimento de janela (L) obtidas com base nas imagens microtomográficas. (a) Plantio cultivo mínimo (PM) e método do paralelepípedo, (b) PM e método do cubo, (c) Plantio convencional (PC) e método do paralelepípedo, (d) PC e método do cubo, (e) Plantio direto (PD) e método do paralelepípedo, e (f) PD e método do cubo. As amostras de solo foram submetidas a 0 (linhas vermelhas) e 6 (linhas azuis) ciclos de umedecimento e secamento (U-S). O marcador (cheio) indica o volume elementar representativo (VER).



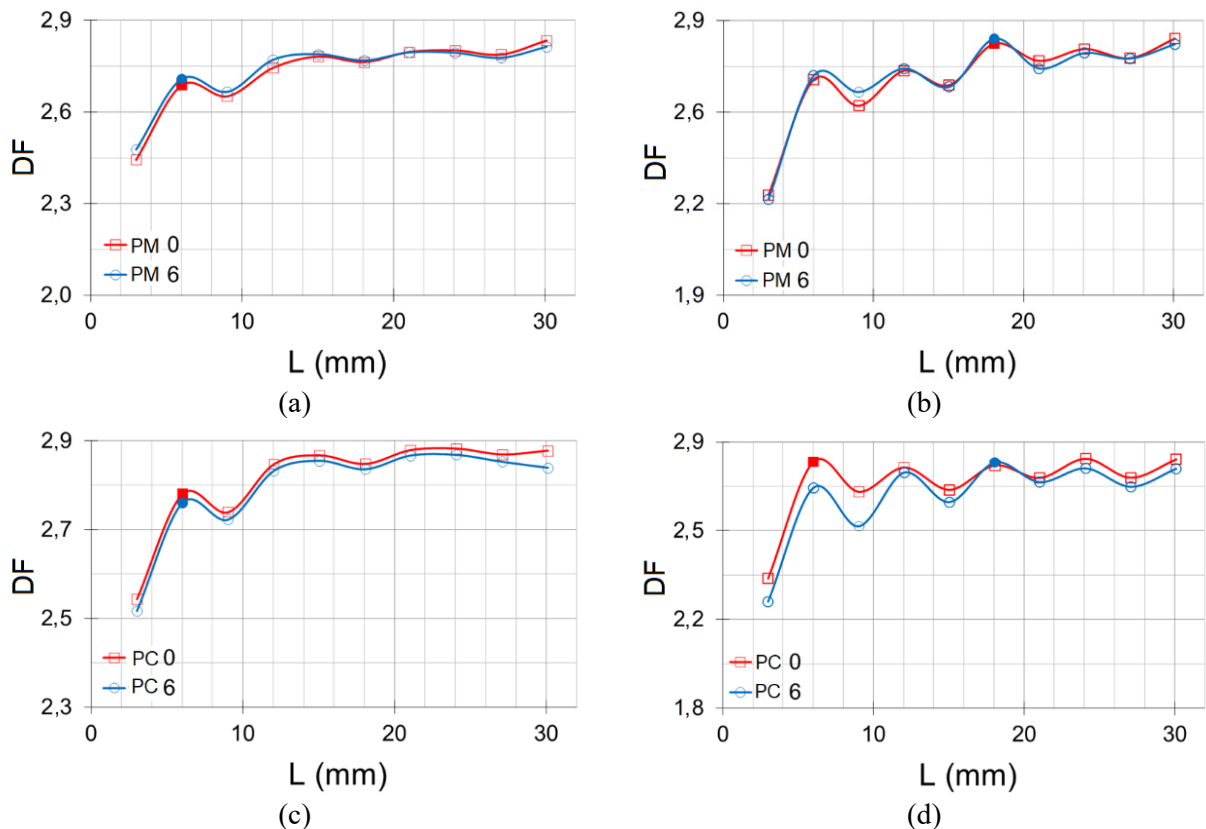
Fonte: Gaspareto et al. (2023).

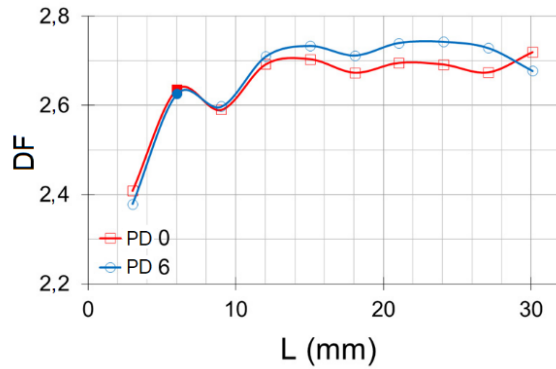
2.3.2 Dimensão Fractal

Para a dimensão fractal o método do paralelepípedo apresentou os menores valores de VER entre os sistemas de manejo e ciclos U-S quando comparado ao método do cubo (Figura 2.14). Similarmente aos resultados de P, os manejos afetaram o VER apenas no método do

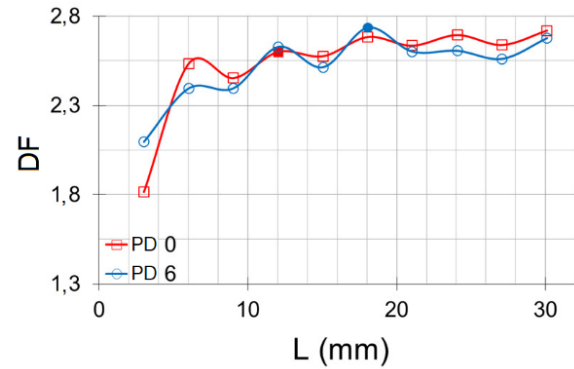
cubo (exceto para PD no caso da porosidade (método do paralelepípedo)). No método do paralelepípedo, PM apresentou o mesmo VER para 0 e 6 U-S ($L = 6,0$ mm), indicando que, para este sistema de manejo os ciclos de U-S não influenciaram a estimativa do VER (Figura 2.14a). Para PC (Figura 2.14c) e PD (Figura 2.14e), o VER não foi afetado pelos ciclos de U-S ($L = 6,0$ mm (0 e 6 U-S)). No método do cubo, os ciclos U-S não afetaram a definição do VER para PM ($L = 18,1$ mm) (Figura 2.14b). No entanto, para PC (Figura 2.14d) e PD (Figura 2.14f), a aplicação dos ciclos U-S aumentou o comprimento de janela necessária para a estimativa do VER. Esses resultados seguem a mesma tendência observada para P (Figura 2.13d,f). Para PC, o VER aumentou com a aplicação dos ciclos U-S de 6,0 mm (0 U-S) para 18,1 mm (6 U-S), enquanto para PD, passou de 12,0 mm (0 U-S) para 18,1 mm (6 U-S).

Figura 2.14 Dimensão fractal (DF) em função das diferentes escalas de comprimento de janela (L) obtidas a partir das imagens microtomográficas. (a) Plantio cultivo mínimo (PM) e método do paralelepípedo, (b) PM e método do cubo, (c) Plantio convencional (PC) e método do paralelepípedo, (d) PC e método do cubo, (e) Plantio direto (PD) e método do paralelepípedo, e (f) PD e método do cubo. As amostras de solo foram submetidas a 0 (linhas vermelhas) e 6 (linhas azuis) ciclos de umedecimento e secamento (U-S). O marcador (cheio) indica o volume elementar representativo (VER).





(e)



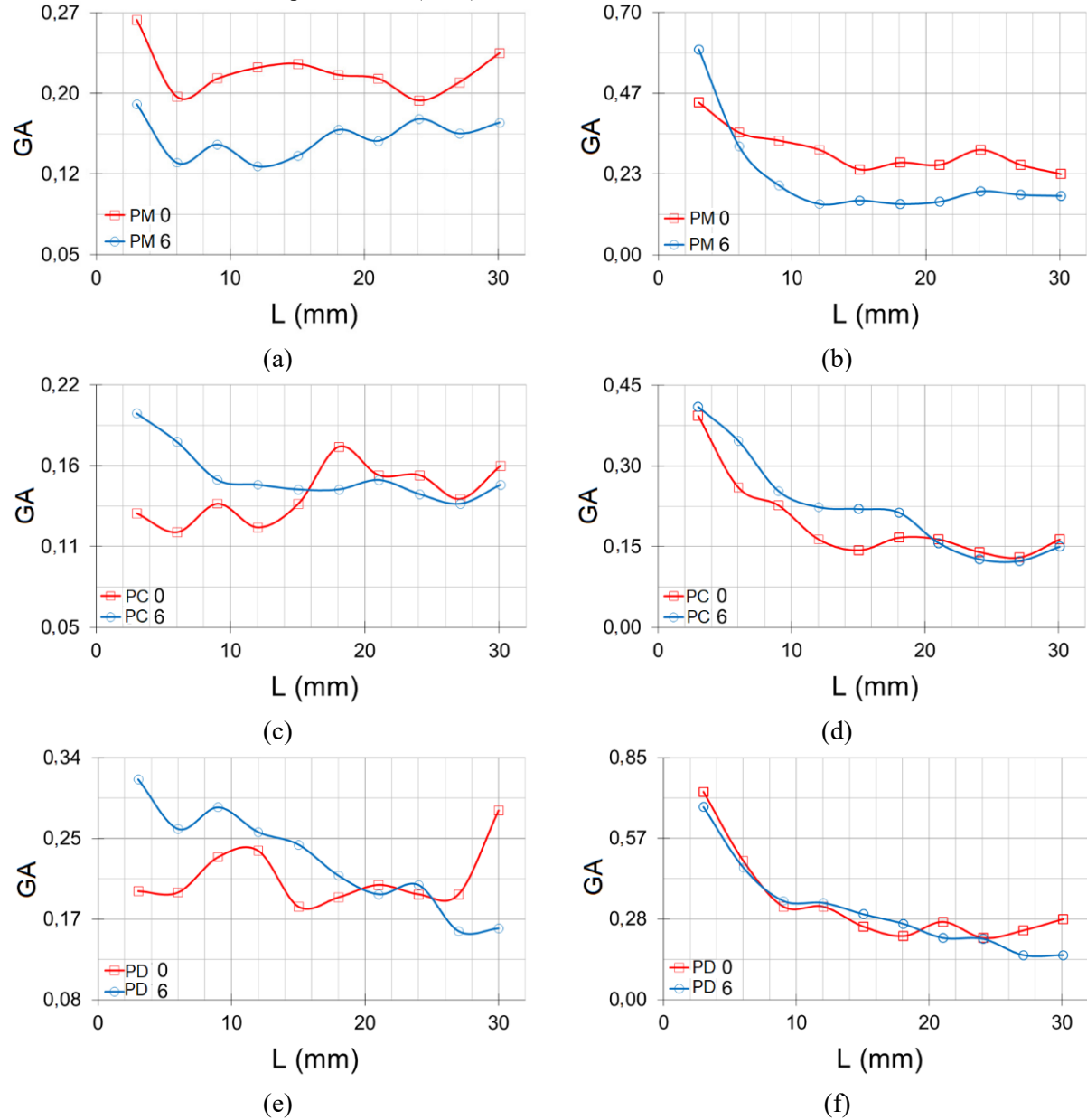
(f)

Fonte: Gaspareto et al. (2023).

2.3.3 Grau de Anisotropia

O grau de anisotropia (Figura 2.15), ferramenta utilizada para mensurar a orientação das subestruturas em um determinado volume de análise, apresentou resultados distintos entre os métodos de seleção de subvolumes, sistemas de manejo e ciclos U-S. Quando o método do paralelepípedo foi utilizado, os valores de GA obtidos foram menores que 0,32, evidenciando estruturas mais isotrópicas, independentemente do manejo adotado. Os valores de GA também apresentaram flutuações para todos os comprimentos de janela examinados, sem uma tendência clara de estabilização entre os sistemas de manejo. Nenhuma das amostras atingiu o VER para este esquema de seleção (Figura 2.15a,c,e). Em relação ao método do cubo, os maiores comprimentos de janela apresentaram reduções de GA, mas ainda sem uma tendência clara de estabilização de seus valores. Comportamento semelhante foi observado para todos os manejos (Figura 2.15b,d,f). Neste esquema de seleção, foi observado que janelas com comprimentos menores apresentaram anisotropias mais significativas, demonstrando a dependência dessa propriedade em relação ao esquema de seleção. No entanto, como observado no método do paralelepípedo, o VER não foi atingido para o método do cubo.

Figura 2.15 Grau de anisotropia (GA) em função das diferentes escalas de comprimento de janela (L) obtidas com base nas imagens microtomográficas. (a) Plantio cultivo mínimo (PM) e método do paralelepípedo, (b) PM e método do cubo, (c) Plantio convencional (PC) e método do paralelepípedo, (d) PC e método do cubo, (e) Plantio direto (PD) e método do paralelepípedo, e (f) PD e método do cubo. As amostras de solo foram submetidas a 0 (linhas vermelhas) e 6 (linhas azuis) ciclos de umedecimento e secamento (U-S). O marcador (cheio) indica o volume elementar representativo (VER).



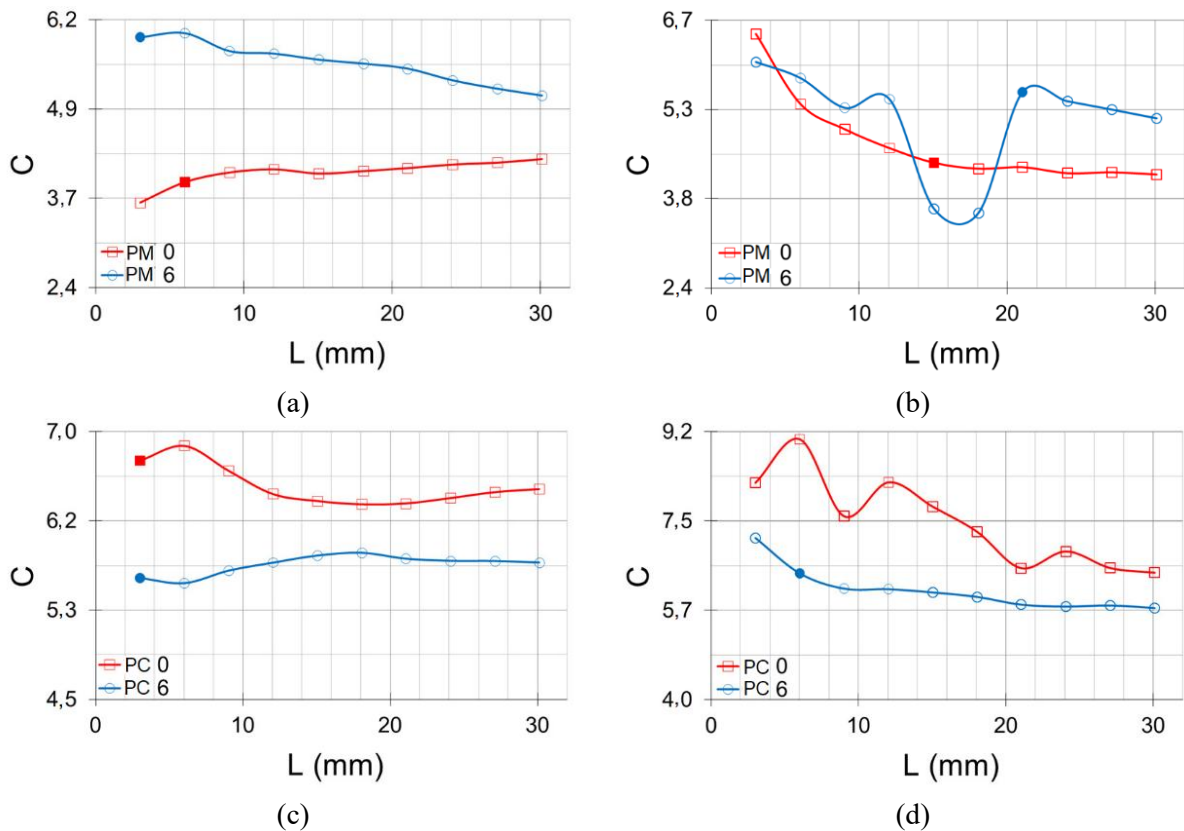
Fonte: Gaspareto et al. (2023).

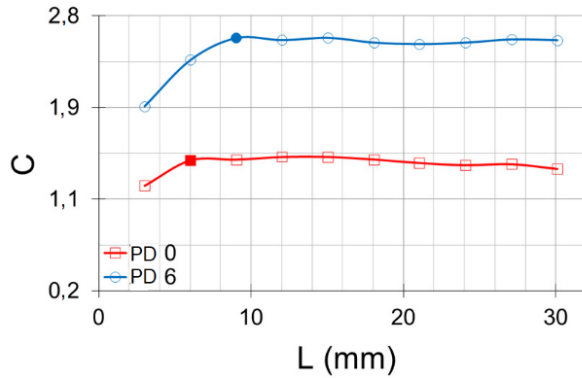
2.3.4 Conectividade dos Poros

Os resultados de VER para a conectividade dos poros são apresentados na Figura 2.16. Os diferentes manejos do solo afetaram a medição da conectividade e a definição do VER. Conforme observado para P (Figura 2.13) e DF (Figura 2.14), a aplicação dos ciclos U-S impactou a estimativa do VER para C (exceto para PC — método do paralelepípedo). No méto-

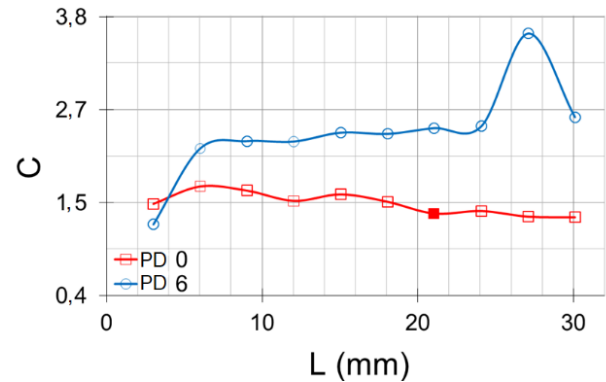
do do paralelepípedo, a aplicação dos ciclos U-S aumentou o VER das amostras sob PM ($L = 3,0 \text{ mm} \rightarrow 0 \text{ U-S}$ e $L = 6,0 \text{ mm} \rightarrow 6 \text{ U-S}$) (Figura 2.16a). Por outro lado, comportamento oposto foi observado para PD (Figura 2.16e), com VERs de $6,0 \text{ mm}$ (0 U-S) e $9,0 \text{ mm}$ (6 U-S). O solo sob PC (Figura 2.16c) não apresentou variações na estimativa do VER ($L = 3,0 \text{ mm}$) com a aplicação dos ciclos U-S. Em relação ao método do cubo, os VERs variaram quando comparados ao método do paralelepípedo, indicando que esta propriedade é suscetível ao procedimento de seleção de subvolume. Os resultados mostram que para PM (Figura 2.16b), o VER foi alcançado em $15,1 \text{ mm}$ (0 U-S) e $21,0 \text{ mm}$ (6 U-S). Para PC (Figura 2.16d), o VER foi atingido somente para as amostras submetidas a 6 U-S ($L = 6,0 \text{ mm}$), enquanto PD (Figura 2.16f) apresentou resultado oposto ($L = 21,0 \text{ mm}$) para as amostras não submetidas aos ciclos U-S.

Figura 2.16 Conectividade dos poros (C) em função das diferentes escalas de comprimento de janela (L) obtidas com base nas imagens microtomográficas. (a) Plantio cultivo mínimo (PM) e método do paralelepípedo, (b) PM e método do cubo, (c) Plantio convencional (PC) e método do paralelepípedo, (d) PC e método do cubo, (e) Plantio direto (PD) e método do paralelepípedo, e (f) PD e método do cubo. As amostras de solo foram submetidas a 0 (linhas vermelhas) e 6 (linhas azuis) ciclos de umedecimento e secamento (U-S). O marcador (cheio) indica o volume elementar representativo (VER).





(e)



(f)

Fonte: Gaspareto et al. (2023).

2.4 DISCUSSÃO

Este estudo se baseou em três suposições principais: (1) a estimativa do VER é afetada pelos manejos do solo, (2) o VER varia em função dos processos que ocorrem no solo e (3) a estimativa do VER é influenciada pelo esquema de seleção de subvolume. Para analisar essas três hipóteses, foram selecionadas quatro propriedades morfológicas dos poros do solo, porosidade imageada, dimensão fractal, grau de anisotropia e conectividade dos poros. No geral, observou-se que o VER varia em função da propriedade física do solo analisada, conforme demonstrado por outros autores (Vogel et al., 2002; Assouline e Or, 2013; Borges et al., 2018; Gerke; Karsanina, 2021). As características de cada propriedade medida impactam diretamente na estimativa do VER, principalmente aquelas relacionadas à distribuição dos poros dentro do volume da amostra. Essa descoberta reforça a necessidade de amostras representativas principalmente quando estudos de μ TC são realizados.

Para a porosidade imageada, com exceção das amostras submetidas ao PD (Figura 2.13e), os outros sistemas (PM e PC) apresentaram o mesmo VER para o método do paralelepípedo, independentemente da aplicação dos ciclos U-S. Este resultado indica homogeneidade na estrutura do solo para esses manejos, mesmo após aplicação dos ciclos de U-S. No caso do PC, embora ocorram modificações significativas na estrutura do solo, sua estrutura tende a se recuperar após a aplicação contínua de ciclos de U-S (Wang et al., 2022).

O plantio convencional é caracterizado pela quebra de agregados devido às operações de gradagem e aração (Álvaro-Fuentes et al., 2008). No caso do PM, que representa um sistema de manejo com as características de PC e PD, espera-se uma estrutura mais complexa da rede de poros (Li et al., 2020). No entanto, o menor subvolume analisado já foi suficiente para que esses manejos atingissem o VER, o que é um resultado surpreendente. Porém, Costanza-Robinson et al. (2011) mencionam que os menores valores de VER estimados usando o méto-

do do paralelepípedo são associados à contribuição do volume analisado devido à largura fixa de um dos eixos de análise (eixo z) (Figura 2.3a). No primeiro subvolume analisado, o método do paralelepípedo apresentou um volume quase dez vezes superior ao do método do cubo. Esse maior volume obtido pode explicar a estabilidade nos valores de P para o método do paralelepípedo, indicando que a variabilidade dessa propriedade, com o aumento do tamanho dos comprimentos das janelas, foi compensada por esse maior volume (eixo z fixo).

Resultados semelhantes, mostrando menor variabilidade entre as propriedades medidas em função da escala usando o método do paralelepípedo, também foram observados por Wu et al. (2020). Borges et al. (2018), usando método semelhante ao do cubo centralizado, encontraram maiores variabilidades de P para os menores subvolumes, quando comparados a esse estudo. Entretanto, o primeiro e o segundo subvolumes analisados por esses autores foram aproximadamente 680 e 5,4 vezes menores, do que o primeiro subvolume empregado no presente estudo. Assim, os primeiros subvolumes investigados, usando o método do paralelepípedo, já eram grandes o suficiente para mitigar os efeitos da variabilidade de P.

Em relação ao método do cubo, variações no VER foram observadas em função dos manejos do solo e dos ciclos de U-S para P. Os resultados mostram que a aplicação dos ciclos alterou a estrutura do solo, sendo necessários subvolumes maiores para medições representativas de P (Ma et al., 2015), evidenciando mudanças na heterogeneidade da rede de poros do solo com a aplicação dos ciclos, conforme demonstrado por Oliveira et al. (2022). A ação da matéria orgânica e do teor de argila do solo na camada superficial do solo também podem ajudar a explicar esses resultados, especialmente nos sistemas mais conservacionistas (PM e PD). Já para PM e PD (Figura 2.13b,f), que são sistemas que geralmente apresentam distribuições de poros mais complexas, o VER foi alcançado para subvolumes maiores do que para PC. Este resultado já era esperado, especialmente para as amostras coletadas da camada superficial do solo, devido a ação de raízes e fauna do solo (Blanco-Moure et al., 2012; Diel et al., 2019; Pires et al., 2020).

Para PC, a quebra de agregados, devido ao processo de preparo do solo, tende a homogeneizar a rede de poros (De Oliveira et al., 2021). Resultados semelhantes de VER para P foram encontrados por Borges et al. (2018) trabalhando com PC e PD. Esses autores encontraram, em geral, VERs mais altos para as amostras submetidas ao PD empregando o método do cubo centralizado. Os resultados do presente estudo mostram que para P mesmo pequenas variações com a profundidade são suficientes para influenciar o VER obtido usando o método do cubo, como observado por Costanza-Robinson et al. (2011) e Baveye et al. (2002). As variações mais significativas de P para os menores subvolumes estão relacionadas principalmen-

te ao domínio das flutuações microscópicas, destacando a importância da variabilidade espacial em pequena escala (Caniego et al., 2003; Wang et al., 2014; Wu et al., 2020).

A dimensão fractal foi utilizada para identificar a complexidade do sistema de poros por meio da análise de padrões e formas (Wang et al., 2018; Roy; Perfect, 2014). A distribuição do sistema de poros e as mudanças na complexidade devido aos processos do solo podem ser quantificadas por meio de ferramentas como DF (Young et al., 2001). Os resultados obtidos demonstram que DF foi a única propriedade com VER para todos os manejos do solo, ciclos de U-S e esquemas de seleção (Figura 2.14). Os valores de DF entre 2 e 3 são características de estruturas 3D (Perret et al., 2003). A aplicação dos ciclos de U-S não influenciou o VER para DF no método do paralelepípedo (Figura 2.14a,c,e), indicando similaridades na complexidade da arquitetura dos poros sob variações de escala (Oliveira et al., 2022). Conforme discutido anteriormente, os resultados de homogeneidade de DF verificados ao usar o método do paralelepípedo estão associados ao maior volume analisado e a uma maior complexidade do sistema poroso em profundidade (eixo mantido fixo no crescimento dos subvolumes). Resultados semelhantes foram observados por Lopes de Silva et al. (2018) e Borges et al. (2018), trabalhando com propriedades como macroporosidade, número de poros, conectividade e tortuosidade. No caso do método do paralelepípedo, uma ferramenta talvez mais interessante para verificar diferenças localizadas na complexidade dos poros seria o multifractal, podendo apresentar diferenças na definição do VER (Roy; Perfect, 2014; Wang et al., 2018).

No caso do método do cubo, como esperado, as amostras que não foram submetidas aos ciclos U-S apresentaram maiores VERs para DF para os sistemas mais conservacionistas (PM e PD) (Figura 2.14b,f). Este resultado segue a mesma tendência de P e é explicado pela maior complexidade da rede de poros para esses manejos (Passoni et al., 2015; Galdos et al., 2019; Wardak et al., 2022). A ausência de revolvimento do solo (PD) ou perturbação mínima (PM) explica a maior complexidade do sistema poroso em comparação ao PC (Dos Reis., 2021). Este último é submetido a modificações profundas na rede de poros devido à gradagem e aração (Dal Ferro et al., 2014). Para PM e PD, a perturbação mínima do solo favorece o aparecimento de bioporos, resultando em poros mais ramificados e, consequentemente, conectados (Guo et al., 2021). A aplicação dos ciclos de U-S afetou a estimativa de VER para PC (Figura 2.14d) e PD, exigindo subvolumes maiores para esses dois manejos. Este resultado demonstra que os ciclos de U-S aumentaram a complexidade dos poros analisados (Caniego et al., 2003).

Pires et al. (2008) mostraram que a aplicação de ciclos de U-S tende a aumentar a porosidade do solo e a complexidade do sistema poroso, principalmente em latossolos como o estudado neste trabalho, confirmando os resultados encontrados. É interessante notar que resultados semelhantes aos obtidos aqui, quanto à relação entre DF e P, também foram observados por Wu et al. (2019). Esses autores analisaram as relações entre DF e P, mostrando como o VER varia em função de DF e P.

O GA (Figura 2.15) que fornece informações sobre como as propriedades de um dado material variam dependendo da direção em que são medidas não atingiu o VER para nenhuma das condições estudadas (Pulido-Moncada et al., 2022). Os resultados obtidos mostraram estruturas pouco anisotrópicas (Tseng et al., 2018; Garbout et al., 2013), mas que não foram suficientes para gerar estabilidades nos valores de GA. Apenas PM e PC mostraram alguma tendência de estabilidade para o esquema cúbico (Figura 2.15b,d). Como a variabilidade espacial da distribuição do tamanho dos poros induz o aparecimento de aglomerados de poros em diferentes porções da amostra, afetando o GA (Ferreira et al., 2018; Mitchell-Fostyk; Haruna, 2021), os resultados obtidos indicam a necessidade de volumes maiores de análise para que o VER possa ser atingido.

Para a conectividade dos poros o VER foi influenciado pelo esquema de seleção (Figura 2.16). O VER foi alcançado para todos os manejos para o método do paralelepípedo. Este resultado indica que este método de seleção minimiza a variação da continuidade dos poros de um volume para o outro, uma vez que mantém o eixo z constante (Figura 2.3a). Para este esquema de seleção, amostras sob PM (Figura 2.16a) e PD (Figura 2.16e) exigiram volumes maiores para atingir o VER quando comparados ao PC (Figura 2.16c). Este resultado, como já mencionado, está relacionado à complexidade da rede de poros do solo sob usos mais conservacionistas (Hubert et al., 2007; Tarquis et al., 2009). Geralmente, PM e PD tendem a apresentar poros grandes e altamente conectados, como demonstrado por Tseng et al. (2018), Galdos et al. (2019) e de Oliveira et al. (2021) trabalhando com solos brasileiros. Em relação ao PC, o processo de revolvimento do solo rompe a conexão entre os poros, principalmente na camada superficial, homogeneizando a distribuição do tamanho dos poros (Czyz; Dexter, 2009; Silva et al., 2016). Os VERs foram alcançados nos menores volumes analisados para C, indicando que a manutenção de um dos eixos fixos na seleção do subvolume no método do paralelepípedo minimizou a variabilidade dos valores de C (Costanza-Robinson et al., 2011). Borges et al. (2018) publicaram um artigo avaliando o VER para o mesmo tipo de solo desse estudo. Esses autores mostraram uma variabilidade mais significativa nos valores de C para os diferentes subvolumes analisados, especialmente os menores. No entanto, vale ressaltar que

os primeiros subvolumes investigados por esses autores foram muito menores do que os menores selecionados no presente estudo, como mencionado anteriormente. Em relação aos ciclos U-S, eles não mostraram grandes influências na estimativa do VER para os diferentes manejos, nem uma tendência clara entre eles. Novamente, esse resultado pode ser explicado pela alta conectividade dos poros, principalmente na direção do eixo fixo do método do paralelepípedo (Ferreira et al., 2018; Ferreira et al., 2022; Pires et al., 2022).

O método do cubo apresentou resultados distintos do método do paralelepípedo para os diferentes manejos. Apenas o solo sob PM (Figura 2.16b) apresentou VER para 0 e 6 ciclos de U-S. Isto indica que a variabilidade de C não pode ser desconsiderada quando diferentes subvolumes são analisados, mesmo que existam poros dominantes e bem conectados, como mostrado por outros autores (Tseng et al., 2018; Ferreira et al., 2018; Galdos et al., 2019; De Oliveira et al., 2021; Pires et al., 2022). Tal resultado mostra que a estrutura dos poros e sua heterogeneidade influenciam na definição do VER, como mostrado por Xue et al. (2022). Quando o PC é analisado (Figura 2.16d), o VER foi alcançado apenas para 6 ciclos de U-S. Este resultado está associado à quebra dos agregados no revolvimento do solo. No entanto, a aplicação dos ciclos faz com que o solo se reestruture favorecendo novamente a conexão dos poros (Ma et al., 2015). No caso do PD (Figura 2.16f), ocorreu o oposto, com o VER sendo atingido somente para as amostras não submetidas aos ciclos de U-S. Para as amostras submetidas a 6 ciclos de U-S, observou-se uma variação abrupta de C para os maiores subvolumes, o que pode estar associado a variações na distribuição dos poros (clusters) no interior das amostras de solo (Müller et al., 2008; Singh et al., 2021; Oliveira et al., 2022; Pulido-Moncada et al., 2022). Koestel et al. (2020) mostraram que a conectividade dos poros sofre variações mais significativas do que a porosidade quando diferentes subvolumes são analisados usando o método do cubo. Tal resultado é semelhante aos observados neste estudo para C .

Embora o objetivo deste estudo tenha sido a definição do VER para diferentes propriedades do solo com base na μTC , alguns resultados obtidos têm importantes implicações para muitos dos processos que ocorrem no solo. O movimento de água, por exemplo, é fortemente influenciado pela permeabilidade do solo, que está intimamente relacionada à conectividade de seus poros e à porosidade. Assim, mudanças na conectividade dos poros afetarão a capacidade do solo de infiltrar e redistribuir a água devido a modificações na permeabilidade (An et al., 2022a; 2022b). A porosidade adequada do solo também é essencial para o bom desenvolvimento do sistema radicular das culturas agrícolas e para manter níveis adequados de água disponíveis para as plantas. Portanto, determinações confiáveis de porosidade e conectividade dos poros têm várias implicações práticas para a agricultura.

A direção do fluxo de água no solo também influencia o rendimento das culturas devido ao seu impacto na distribuição e retenção de água para as plantas. Propriedades como o grau de anisotropia e a dimensão fractal nos fornecem uma ideia da heterogeneidade da rede de poros. Como a direção do fluxo de água depende principalmente da estrutura dos poros, medições representativas de GA e DF podem trazer insights sobre a distribuição de água dentro de materiais porosos.

Assim, é possível notar que existe uma estreita relação entre as propriedades morfológicas medidas e as propriedades hidráulicas do solo (Camargo et al., 2022; An et al., 2022b). Portanto, medições representativas das propriedades do solo por meio de μ TC podem ajudar a explicar muitos dos processos hidráulicos relacionados à retenção e movimento de água, o destino de nutrientes e poluentes no solo e à quantidade de água necessária para o crescimento das culturas agrícolas (Castellini et al., 2019; Jackson et al., 2020; Amami et al., 2021).

Este estudo demonstrou a importância de se selecionar amostras representativas para medir propriedades geométricas e morfológicas usando μ TC. O esquema de seleção mostrou influenciar na definição do VER, de modo que seu uso deve ser empregado com cautela. Costanza-Robinson et al. (2011) indicam que a estimativa do VER que os métodos podem apresentar diferenças de acordo com sua aplicabilidade. Os manejos também afetam a definição do VER, de modo que o mesmo tamanho de amostra às vezes pode fornecer resultados não representativos, dependendo do uso do solo (Rajaram et al., 1999; Li et al., 2006; Moreira et al., 2016; Piron et al., 2017).

No entanto, o estudo apresentado mediu somente algumas propriedades físicas do solo, de modo que um aumento no número das propriedades avaliadas pode trazer resultados interessantes. Embora foram explorados somente dois esquemas de seleção de subvolumes, a escolha de outros tipos (por exemplo, de cima para baixo, aleatório, da direita para a esquerda) pode oferecer insights principalmente para as propriedades associadas à complexidade da rede de poros.

Finalmente, uma análise do VER para diferentes tamanhos de voxels pode fornecer resultados sobre como as estruturas de poros intra e inter-agregados variam em função da escala de medição. Koestel et al. (2020) demonstraram que o tamanho dos poros analisados pode influenciar a estimativa do VER. Recentemente, Lucas et al. (2021) apresentaram resultados abordando a questão da escala e das resoluções das imagens em medições representativas de propriedades morfológicas e geométricas dos poros do solo. Esses autores demonstraram que quando ocorrem mudanças de escala, geralmente são encontradas instabilidades nas proprie-

dades medidas, em função da transição entre os domínios dos poros e da definição do VER (Vogel et al., 2019).

2.5 CONCLUSÕES

Os resultados desse estudo mostram que no geral o esquema de seleção influencia a definição do volume elementar representativo, indicando a necessidade de precauções na escolha do tipo de esquema, dependendo das características do meio poroso estudado. A aplicação de ciclos de U-S também influencia o VER, indicando que o volume ideal de amostra para análises de tomografia não é estático. Este resultado indica que o VER pode variar com o tempo em função dos processos que ocorrem no solo. Esse resultado é importante principalmente em áreas sob intervenção humana, como quando o solo é submetido a diferentes tipos de manejo, os quais também afetam a definição do VER como demonstrado neste estudo.

Com relação às propriedades físicas medidas, a complexidade dos poros, medida pela dimensão fractal, afeta a definição do VER. Por outro lado, o grau de anisotropia não atingiu o VER para nenhum esquema de seleção (cubo e paralelepípedo) estudado e sistema de manejo do solo. A porosidade imageada e a conectividade dos poros mostraram sensíveis aos esquemas de seleção e ciclos de U-S para alguns dos manejos estudados. Esses resultados mostram que o VER precisa ser determinado para cada manejo do solo, de modo que um mesmo solo pode apresentar volumes ideais diferentes de amostra para análises físicas. Além disso, os ciclos de U-S alteram a rede de poros, de modo que dependendo do tipo de propriedade medida, o volume ideal de amostra pode variar. Nesse sentido, os volumes de amostra escaneados podem variar em função do processo que ocorre ao longo do solo.

REFERÊNCIAS

- ÁLVARO-FUENTES, J. et al. Aggregate breakdown during tillage in a Mediterranean loamy soil. **Soil and Tillage Research**, v. 101, p. 62–68, 2008.
- AMAMI, R. et al. Impacts of different tillage practices on soil water infiltration for sustainable agriculture. **Sustainability**, v. 13, p. 3155, 2021.
- AN, R. et al. Drying-wetting impacts on granite residual soil: A multi-scale study from macroscopic to microscopic investigations. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 81, p. 10, 2022.
- AN, R. et al. Effects of dry-wet cycles on three-dimensional pore structure and permeability characteristics of granite residual soil using X-ray micro computed tomography. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 14, p. 3, 2022.

ASSOULINE, S.; OR, D. Conceptual and parametric representation of soil hydraulic properties: A review. **Vadose Zone Journal**, v. 12, p. 1–20, 2013.

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, p. 775–784, 2002.

BEAR, J. **Dynamics of Fluids in Porous Media**. New York, NY, USA: American Elsevier Pub. Co. 1972.

BLANCO-MOURE, N.; MORET-FERNÁNDEZ, D.; VICTORIA LÓPEZ, M. Dynamics of aggregate de tabilization by water in soils under long-term conservation tillage in semiarid Spain. **Catena**, v. 99, p. 34–41, 2012.

BOOMAN, G.; LEIKER, S. **Soil Sampling Guide; Document ID: RND_SSG_001; Regen Network Development**, Inc.: Northfield, MA, USA, 2021.

BORGES, J. A. R. **Tamanhos Elementares Representativos de Atributos do Solo via Atenuação de Raios Gama e Tomografia Computadorizada**. 2015. 119 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2015.

BORGES, J.A.R. et al. X-ray computed tomography for assessing the effect of tillage systems on topsoil morphological attributes. **Soil and Tillage Research**, v. 189, p. 25–35, 2019.

BORGES, J.A.R. et al. X-ray microtomography analysis of representative elementary volume (REV) of soil morphological and geometrical properties. **Soil and Tillage Research**, v. 182, p. 112–122, 2018.

CAMARGO, M.A.; CÁSSARO, F.A.M.; PIRES, L.F. How do geometric factors influence soil water retention? A study using computerized microtomography. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 81, p. 137, 2022.

CANIEGO, F.J.; MARTÍ, M.A.; SAN JOSÉ, F. Rényi dimensions of soil pore size distribution. **Geoderma**, v. 112, p. 205–216, 2003.

CARMIGNATO, S.; DEWULF, W.; LEACH, R. **Industrial X-ray computed tomography**. Cham: Springer, 2018.

CASTELLINI, M. et al. Effects of no-tillage and conventional tillage on physical and hydraulic properties of fine textured soils under winter wheat. **Water**, v. 11, p. 484, 2019.

COOPER, H.V. et al. Long-term zero-tillage enhances the protection of soil carbon in tropical agriculture. **European Journal of Soil Science**, v. 72, p. 2477–2492, 2021.

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, p. 12, 2011.

CZYZ, E.A.; DEXTER, A.R. Soil physical properties as affected by traditional, reduced and no-tillage for winter wheat. **International Agrophysics**, v. 23, p. 319–326, 2009.

DA COSTA, P.A. et al. Changes in soil pore network in response to twenty-three years of irrigation in a tropical semiarid pasture from northeast Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 137, p. 23–32, 2014.

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, 2014.

DAL FERRO, N.; CHARRIER, P.; MORARI, F. Dual-scale micro-CT assessment of soil structure in a long-term fertilization experiment. **Geoderma**, v. 204–205, p. 84–93, 2013.

DE OLIVEIRA, J.A.T.; CÁSSARO, F.A.M.; PIRES, L.F. Quantification of the pore size distribution of a Rhodic Hapludox under diferente management systems with X-ray microtomography and computational simulation. **Soil and Tillage Research**, v. 209, p. 104941, 2021.

DEURER, M. et al. The impact of soil carbon management on soil macropore structure: A comparison of two apple orchard systems in New Zealand. **European Journal of Soil Science**, v. 60, p. 945–955, 2009.

DIEL, J.; VOGEL, H.J.; SCHLÜTER, S. Impact of wetting and drying cycles on soil structure dynamics. **Geoderma**, v. 345, p. 63–71, 2019.

DOS REIS, A.M.H. et al. Micromorphological analysis of soil porosity under integrated crop-livestock management systems. **Soil and Tillage Research**, v. 205, p.104783, 2021.

DOS SANTOS, H. G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

DOUBE, M. et al. BoneJ: Free and extensible bone image analysis in ImageJ. **Bone**, v. 47, p. 1076–1079, 2010.

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

FERREIRA, T.R. et al. X-ray microtomography analysis of lime application effects on soil porous system. **Geoderma**, v. 324, p. 119–130, 2018.

FERREIRA, T.R.; ARCHILHA, N.L.; PIRES, L.F. An analysis of three XCT-based methods to determine the intrinsic permeability of soil aggregates. **Journal of Hydrology**, v. 612, p. 128024, 2022.

GALDOS, M.V. et al. Assessing the long-term effects of zero-tillage on the macroporosity of brazilian soils using X-ray computed tomography. **Geoderma**, v. 337, p. 1126–1135, 2019.

GANE, P.A.C.; RIDGWAY, C.J.; SCHOELKOPF, J. Absorption rate and volume dependency on the complexity of porous network structures. **Transport in Porous Media**, v. 54, p. 79–106, 2004.

GAO, L. et al. Effect of different tillage systems on aggregate structure and inner distribution of organic carbon. **Geoderma**, v. 288, p. 97–104, 2017.

GARBOUT, A.; MUNKHOLM, L.J.; HANSEN, S.B. Tillage effect on topsoil structural quality assessed using X-ray CT soil cores and visual soil evaluation. **Soil and Tillage Research**, v. 128, p. 104–109, 2013.

GERKE, K.M.; KARSANINA, M.V. How pore structure non-stationarity compromises flow properties representativity (REV) for soil samples: Pore-scale modelling and stationarity analysis. **European Journal of Soil Science**, v. 72, p. 527–545, 2021.

GUO, Y. et al. Impacts induced by the combination of earthworms, residue and tillage on soil organic carbon dynamics using ¹³C labelling technique and X-ray computed tomography. **Soil and Tillage Research**, v. 205, p. 104737, 2021.

HUBERT, F. et al. Pore morphology changes under tillage and no-tillage practices. **Geoderma**, v. 142, p. 226–236, 2007.

JACKSON, S.J.; LIN, Q.; KREVOR, S. Representative elementary volumes, hysteresis, and heterogeneity in multiphase flow from the pore to continuum scale. **Water Resources Research**, v. 56, p. e2019WR026396, 2020.

JUYAL, A. et al. Control of pore geometry in soil microcosms and its effect on the growth and spread of *Pseudomonas* and *Bacillus* sp. **Frontiers in Environmental Science**, v. 6, p. 73, 2018.

KOESTEL, J. et al. Approaches to delineate aggregates in intact soil using X-ray imaging. **Geoderma**, v. 402, p. 115360, 2021.

KOESTEL, J.; LARSBO, M.; JARVIS, N. Scale and VER analyses for porosity and pore connectivity measures in undisturbed soil. **Geoderma**, v. 366, p. 114206, 2020.

LEIJ, F.J.; GHEZZEHEI, T.A.; OR, D. Modeling the dynamics of the soil pore-size distribution. **Soil and Tillage Research**, v. 64, p. 61–78, 2002.

LI, Y. et al. Residue retention promotes soil carbon accumulation in minimum tillage systems: Implications for conservation agriculture. **Science of the Total Environment**, v. 740, p. 140147, 2020.

LI, Y.Y.; SHAO, M.A. Change of soil physical properties under long-term natural vegetation restoration in the Loess Plateau of China. **Journal of Arid Environments**, v. 64, p. 77–96, 2006.

LIPIEC, J. et al. Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods. **Soil and Tillage Research**, v. 89, p. 210–220, 2006.

LOPES DE SILVA, W.G.A. et al. Representative elementary volume of a region of interest of a heterogeneous carbonate rock using computed microtomography and numerical simulation. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 36, p. 1–8, 2018.

LUCAS, M. et al. Revealing pore connectivity across scales and resolutions with X-ray CT. **European Journal of Soil Science**, v. 72, p. 546–560, 2021.

MA, R. et al. Evaluation of soil aggregate microstructure and stability under wetting and drying cycles in two Ultisols using synchrotron-based X-ray micro-computed tomography. **Soil and Tillage Research**, v. 149, p. 1–11, 2015.

MITCHELL-FOSTYK, B.A.; HARUNA, S.I. Spatial and fractal characterization of soil hydraulic properties along a catena. **Soil Science Society of America Journal**, v. 85, p. 1710–1726, 2021.

MOONEY, S. J. et al. **X-ray imaging of the soil porous architecture**. Cham: Springer, 2022.

MOREIRA, W.H. et al. Seasonal changes in soil physical properties under long-term no-tillage. **Soil and Tillage Research**, v. 160, p. 53–64, 2016.

MÜLLER, K. et al. Characterizing and linking X-ray CT derived macroporosity parameters to infiltration in soils with contrasting structures. **Geoderma**, v. 313, p. 82–91, 2018.

NITSCHKE, P.R. et al. **Atlas Climático do Estado do Paraná**; IAPAR: Londrina, Brazil, 2019.

OLIVEIRA, J.A.T. et al. Soil Pore Network Complexity Changes Induced by Wetting and Drying Cycles—A Study Using X-ray Microtomography and 3D Multifractal Analyses. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 19, p. 10582, 2022.

OTSU, N. A threshold selection method from gray-level histograms. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, v. 9, p. 62–66, 1979.

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.

PERRET, J.; PRASHER, S.; KACIMOV, A. Mass fractal dimension of soil macropores using computed tomography: From the box-counting to the cube-counting algorithm. **European Journal of Soil Science**, v. 54, p. 569–579, 2003.

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, p. 897–907, 2008.

PIRES, L.F. et al. X-ray microtomography analysis of soil pore structure dynamics under wetting and drying cycles. **Geoderma**, v. 362, p. 114103, 2020.

PIRES, L.F. et al. 3D analysis of the soil porous architecture under long term contrasting management systems by X-ray computed tomography. **Soil and Tillage Research**, v. 191, p. 197–206, 2019.

PIRES, L.F. et al. A comparison of the differences in soil structure under long-term conservation agriculture relative to a secondary forest. **Agriculture**, v. 12, p. 1783, 2022.

- 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.
- PIRON, D. et al. Indicators of earthworm bioturbation to improve visual assessment of soil structure. **Soil and Tillage Research**, v. 173, p. 53–63, 2017.
- PULIDO-MONCADA, M.; KATUWAL, S.; MUNKHOLM, L.J. Characterisation of soil pore structure anisotropy caused by the growth of bio-subsoilers. **Geoderma**, v. 409, p. 115571, 2022.
- RAJARAM, G.; ERBACH, D.C. Effect of wetting and drying on soil physical properties. **Journal of Terramechanics**, v. 36, p. 39–49, 1999.
- RASBAND, W. IMAGEJ; U.S. **National Institutes of Health**: Bethesda, MD, USA, 2007.
- ROY, A.; PERFECT, E. Lacunarity analyses of multifractal and natural grayscale patterns. **Fractals**, v. 22, n. 03, p.1440003, 2014.
- SCHROER, C. G.; DE CARLO, F. **X-ray Tomography: Fundamentals and Applications**. Berlin; Boston: De Gruyter, 2020.
- SILVA, F.R. et al. Physical properties of a Hapludox after three decades under different soil management systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, p. 0140331, 2016.
- SINGH, N. et al. X-ray micro-computed tomography characterized soil pore network as influenced by long-term application of manure and fertilizer. **Geoderma**, v. 385, p. 114872, 2021.
- TARQUIS, A.M. et al. Pore network complexity and thresholding of 3D soil images. **Ecological Complexity**, 6, 230–239, 2009.
- TSENG, C.L.; ALVES, M.C.; CRESTANA, S. Quantifying physical and structural soil properties using X-ray microtomography. **Geoderma**, v. 318, p. 78–87, 2018.
- VANDENBYGAART, A.J.; PROTZ, R. The representative elementary area (REA) in studies of quantitative soil micromorphology. **Geoderma**, v. 89, p. 333–346, 1999.
- VOGEL, H. J. Scale issues in soil hydrology. **Vadose Zone Journal**, v. 18, p. 190001, 2019.
- VOGEL, H. J.; COUSIN, I.; ROTH, K. Quantification of pore structure and gas diffusion as a function of scale. **European Journal of Soil Science**, v. 53, p. 465–473, 2002.
- WANG, D.Y.; XU, H.S.; MA, X.J. Computed tomography analysis of representative elementary volume (REV) of porous medium. **Advanced Materials Research**, v. 868, p. 234–237, 2014.
- WANG, J. et al. Influence of Soil Wetting and Drying Cycles on Soil Detachment. **AgriEngineering**, v. 4, p. 533–543, 2022.

WANG, J. et al. Multifractal characteristics of three-dimensional distribution of reconstructed soil pores at opencast coal-mine dump based on high-precision CT scanning. **Soil and Tillage Research**, v. 82, p. 144–152, 2018.

WARDAK, D.L.R. et al. Zero tillage has important consequences for soil pore architecture and hydraulic transport: A review. **Geoderma**, v. 422, p. 115927, 2022.

WU, H. et al. Analyses of representative elementary volume for coal using X-ray-CT and FIB-SEM and its application in permeability predication model. **Fuel**, v. 254, p. 115563, 2019.

WU, M. et al. A new criterion for determining the representative elementary volume of translucent porous média and inner contaminant. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 24, p. 5903–5917, 2020.

XUE, Y. et al. Insights into heterogeneity and representative elementary volume of vuggy dolostones. **Energies**, v. 15, p. 5817, 2022.

YIO, M.H.N.; WONG, H.S.; BUENFELD, N.R. Representative elementary volume (REV) of cementitious materials from threedimensional pore structure analysis. **Cement and Concrete Research**, v. 102, p. 187–202, 2017.

YOUNG, I.M.; CRAWFORD, J.W.; RAPPOLDT, C. New methods and models for characterising structural heterogeneity of soil. **Soil and Tillage Research**, v. 61, p. 33–45, 2001.

ZHANG, M. et al. Temporal changes of soil water retention behavior as affected by wetting and drying following tillage. **Soil Science Society of America Journal**, v. 81, p. 1288–1295, 2018.

3 VOLUME ELEMENTAR REPRESENTATIVO EM SOLOS AGRÍCOLAS: INFLUÊNCIA DA RESOLUÇÃO DAS IMAGENS E DOS SISTEMAS DE MANEJO

O estudo deste capítulo foi publicado no periódico científico *Soil Advances*. Os dados referentes à publicação são os seguintes: Gaspareto, J.V.; Andrade, E.; Pires, L.F. Representative elementary volume in agricultural soils: Effects of image resolution and tillage practices on pore structure. *Soil Advances*, 4, 100081, **2025**. <https://doi.org/10.1016/j.soilad.2025.100081>

Contribuições dos Autores: Conceitualização, L.F.P.; metodologia, J.V.G., E.A. e L.F.P.; análise formal, J.V.G. e E.A.; investigação, J.V.G. e E.A.; redação — preparação do rascunho original, J.V.G., E.A. e L.F.P.; redação — revisão e edição, J.V.G., E.A. e L.F.P.; administração do projeto, L.F.P.; obtenção de financiamento, L.F.P.

RESUMO

Determinar o volume elementar representativo (VER) em sistemas porosos como o solo é essencial para garantir a confiabilidade das propriedades micromorfológicas derivadas da microtomografia de raios X (μ TC). Na ausência de um VER, as medições podem apresentar flutuações estatísticas devido à heterogeneidade da rede de poros. Este estudo investigou a influência da resolução da imagem (1,64 μ m, 5,25 μ m e 35 μ m) na medida do VER e de dois sistemas de manejo do solo (plantio convencional – PC e plantio cultivo mínimo – PM). As propriedades micromorfológicas avaliadas incluíram a porosidade imageada, dimensão fractal, grau de anisotropia, conectividade dos poros, número de poros, área de superfície dos poros e tortuosidade. O VER foi definido com base na estabilização do coeficiente de variação medido em subvolumes progressivamente maiores. Os resultados mostraram que o VER é dependente da resolução, com os maiores volumes ocorrendo na resolução de 35 μ m e com maior variabilidade observada na resolução de 1,64 μ m. O manejo do solo influenciou significativamente o VER, com PC geralmente apresentando VERs menores, indicando maior homogeneidade estrutural. Também se observou que artefatos nas imagens ou falta de informação geraram valores anômalos de grau de anisotropia, tortuosidade e dimensão fractal para a resolução de 1,64 μ m. Esse resultado indica limitações dos algoritmos de medidas de propriedades de meios porosos em subvolumes muito pequenos. De modo geral, o VER foi influenciado pela resolução das imagens, pelo tipo de manejo do solo e pela propriedade analisada, ressaltando a necessidade de planejamento experimental com foco na escala de medida e abordagens complementares para uma análise mais representativa da estrutura do solo baseada em μ TC.

ABSTRACT

Determining the representative elementary volume (REV) in porous systems, such as soil, is crucial for ensuring the reliability of micromorphological properties obtained from X-ray microtomography (μ CT). Without an established REV, measurements may show statistical fluctuations due to the heterogeneous nature of the pore network. This study examined the effect of image resolution (1.64 μ m, 5.25 μ m, and 35 μ m) on the measurement of REV, as well as the impact of two soil management systems: conventional tillage (CT) and minimum tillage

(MT). The micromorphological properties evaluated included imaged porosity, fractal dimension, degree of anisotropy, pore connectivity, number of pores, pore surface area, and tortuosity. The representative elementary volume was defined based on the stabilization of the coefficient of variation measured in progressively larger subvolumes. The results indicated that REV is dependent on resolution, with the largest volumes observed at a resolution of 35 μm and the greatest variability at a resolution of 1.64 μm . Soil management practices had a significant impact on REV, with CT generally exhibiting lower REV values, suggesting greater structural homogeneity. Additionally, it was noted that artifacts in the images and insufficient information led to anomalous values for the degree of anisotropy, tortuosity, and fractal dimension at the 1.64 μm resolution. This result highlights the limitations of algorithms used to measure properties of porous media within very small subvolumes. Generally, REV was affected by factors such as image resolution, soil management practices, and the specific property being analyzed. This underscores the importance of careful experimental planning that considers measurement scale and integrates complementary approaches for a more accurate representation of soil structure based on micro-CT imaging.

3.1 INTRODUÇÃO

As propriedades físicas do solo exigem medições representativas que reflitam sua heterogeneidade. Para isso, é essencial usar volumes de amostra suficientemente grandes, conhecidos como volume elementar representativo (VER). Esse tamanho mínimo de amostra garante que as medições representem com precisão as condições de campo, em vez de variações aleatórias (Bear, 1972; Zhang et al., 2000; Al-Raoush; Papadopoulos, 2010; Liu et al., 2023). Quando as propriedades físicas são medidas usando amostras menores que o VER, a variabilidade resultante devido a diferenças em pequena escala leva a flutuações de medição que não estão relacionadas às condições reais no campo agrícola.

Estudos recentes exploraram o VER para vários materiais porosos em múltiplas escalas (Al-Raoush; Papadopoulos, 2010; Pires et al., 2019; Sadeghnejad et al., 2023). No entanto, a resolução das imagens afeta significativamente quais domínios de poros são acessados (intra ou interagregados). Como resultado, o VER torna-se altamente dependente da escala de observação (Huang et al., 2021). Pesquisadores como Al-Raoush et al. (2005) e Huang et al. (2021), que estudaram materiais como esferas de vidro, areias e arenitos, demonstraram o impacto da escala nas medições do VER. Eles descobriram que as variações de escala, particularmente por meio de processos como redução de escala, influenciam a definição de VER. Isso ressalta a necessidade de analisar amostras com diferentes volumes e, consequentemente, resoluções variadas. Tais procedimentos são essenciais para representar com precisão as estruturas hierárquicas do solo.

A microtomografia computadorizada por raios X (μCT) é uma técnica versátil para quantificar redes de poros do solo (Cnudde; Boone, 2013; Borges et al., 2018; Gaspareto et

al., 2023). Este método permite a seleção de subvolumes sem danificar as amostras, tornando-o ideal para a análise do volume elementar representativo (Liu et al., 2023; Kadyrov, 2024). Nos últimos anos, vários pesquisadores investigaram o VER em solos. Baveye et al. (2022) e Koestel et al. (2020) estudaram o VER em escalas de núcleo e coluna, demonstrando que alguns parâmetros se estabilizam, enquanto outros permanecem dependentes da escala. Uma descoberta semelhante foi relatada por Qian et al. (2024), que exploraram os efeitos de diferentes práticas de manejo do solo na definição do VER.

Os avanços recentes na análise da VER para meios porosos complexos, como o solo, têm sido significativos (Borges et al., 2018; Schmidt et al., 2022; Gaspareto et al., 2023; Wen et al., 2024). No entanto, ainda existe uma lacuna crítica: há poucos estudos que avaliaram sistematicamente o VER em solos não perturbados de volumes variados, onde domínios intra e interagregados coexistem e afetam significativamente as propriedades hidráulicas e mecânicas (Kravchenko et al., 2011; Chen et al., 2025). Além disso, muitos estudos de solo não compararam explicitamente os VER em diferentes resoluções de varredura física, apesar do fato de que a resolução influencia diretamente as classes de poros acessíveis (Li; Zhang, 2010; Koestel et al., 2020; Borges et al., 2018; Gaspareto et al., 2023).

Para resolver essa lacuna, analisou-se amostras de solo não perturbadas sob duas práticas de manejo diferentes: plantio convencional (PC) e plantio mínimo (PM). As análises do presente estudo envolveram a digitalização dos solos em três resoluções físicas: 1,64 μm , 5,25 μm e 35 μm . Essas resoluções abrangem as faixas comuns usadas em estudos de μCT do solo. Altas resoluções (menos de 2 μm) são usadas para examinar poros intra-agregados, resoluções intermediárias (5–10 μm) acessam domínios de poros de equilíbrio e resoluções grosseiras (maiores que 30 μm) são normalmente empregadas para núcleos maiores e porosidade interagregada (Tippkötter et al., 2009; Dal Ferro et al., 2013; Houston et al., 2013). Ao investigar explicitamente as interações entre VER, práticas de manejo do solo e resolução de digitalização, o estudo oferece novos insights sobre a dependência da escala da quantificação estrutural do solo. Além disso, fornece orientação metodológica para futuras aplicações de μCT na ciência do solo.

Assim, investigou-se no presente estudo três hipóteses principais: (i) o VER é alcançado quando os poros intra e interagregados são analisados; (ii) práticas de manejo que preservam a estrutura do solo, como o plantio mínimo, resultam em VERs maiores; e (iii) examinar volumes de solo digitalizados muito pequenos pode produzir resultados enganosos em relação às propriedades morfológicas, mesmo que o VER tenha sido alcançado. O estudo inclui uma análise abrangente de várias propriedades morfológicas da rede de poros do solo,

incluindo porosidade imageada, dimensão fractal, grau de anisotropia, número de poros, área de superfície, conectividade dos poros e tortuosidade, a fim de testar as hipóteses propostas.

3.2 MATERIAS E MÉTODOS

3.2.1 Área Experimental e Coleta das Amostras

O estudo foi realizado em amostras coletadas em um experimento de longa duração em áreas da fazenda experimental do Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná (IDR-PR), localizada nas coordenadas 25°06' S e 50°09' O, a uma altitude média de 875 m, no município de Ponta Grossa, Paraná. O clima da região é classificado como subtropical úmido (Cfb), com precipitação anual variando entre 1400 e 1600 mm e temperatura média anual entre 17 e 18°C.

O solo é classificado como um Latossolo Vermelho distrófico, com textura argilosa composta por 58% de argila, 28% de silte e 14% de areia na camada de 0–10 cm de profundidade. Os valores dos conteúdos de areia, silte e argila foram obtidos com base na média entre as duas áreas sob manejos diferentes. As amostras foram coletadas na camada superficial. As áreas experimentais do estudo foram estabelecidas em 1981 apresentando dois sistemas de manejo do solo: plantio convencional (PC) e plantio cultivo mínimo (PM). No PC, o preparo do solo foi feito com duas passadas de arado de disco a 25 cm de profundidade, seguido por gradagens com grade niveladora. No PM foi empregado escarificador seguido de gradagem com grade leve, com a manutenção dos restos vegetais das culturas agrícolas na superfície.

Para cada resolução de imagem (1,64 μm , 5,25 μm e 35 μm), foram adotados procedimentos diferenciados de preparo das amostras. Na resolução de 1,64 μm , as amostras foram submetidas a cuidadosa desagregação manual. Os agregados foram peneirados a seco, primeiramente homogeneizados em peneira de 19 mm e, em seguida, fracionados entre peneiras de 4 mm e 2 mm. Um agregado representativo de aproximadamente 3 mm de diâmetro foi selecionado para análise. Para as análises com resolução de 5,25 μm , pequenos agregados de cerca de 2 cm foram extraídos do interior de amostras coletadas em anéis volumétricos (cilindros) após secamento em estufa a 40 °C por duas semanas. A seleção priorizou os agregados mais estáveis que não se quebraram durante a coleta, com atenção especial àqueles localizados nas regiões centrais das amostras, distantes das bordas que pudessem apresentar compactação. Para a resolução de 35 μm , as amostras foram coletadas com o solo em condições de umidade próximas à capacidade de campo, alguns dias após chuvas intensas. A coleta foi realizada nas

linhas de plantio utilizando cilindros de aço inoxidável de 5 cm de diâmetro e 5 cm de altura, utilizando trados específicos. Para a coleta, a superfície do solo foi previamente nivelada com restos vegetais sendo retirados com auxílio de enxadas.

Após a coleta, as amostras foram envolvidas com filme plástico e colocadas em recipientes apropriados para o transporte para o laboratório. Um total de dezoito amostras foi selecionado para análise por μ TC, sendo três amostras de cada manejo (PC e PM) escaneadas em três diferentes resoluções de imagem ($3 \text{ amostras} \times 2 \text{ manejos} \times 3 \text{ resoluções} = 18 \text{ amostras}$).

3.2.2 Aquisição de Imagens em Diferentes Resoluções

3.2.2.1 Microtomografia de raios X com resolução de $1,64 \mu\text{m}$

As imagens 3D dos agregados de solo foram obtidas na linha de luz IMX do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron (LNLS/CNPEM), localizado no Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM) em Campinas, São Paulo. A análise concentrou-se no escaneamento de um único agregado obtido de amostras compostas proveniente dos sistemas de manejo estudados. A aquisição das imagens foi realizada utilizando uma fonte de raios X obtida por luz síncrotron. A fim de se evitar artefatos, foi empregado um filtro de silício de $550 \mu\text{m}$ de espessura. Um total de 1.024 projeções foi obtido por amostra, com um tempo de exposição de 2 s por imagem.

O sistema de detecção consistiu em um cintilador LuAg:Ce de $50 \mu\text{m}$ de espessura acoplado a uma câmera pco.2000 com lente objetiva de 5x. A reconstrução da imagem foi realizada utilizando o método de retroprojeção filtrada usando software desenvolvido pelo grupo de computação do LNLS. Após a reconstrução foram geradas imagens 3D com os seguintes volumes $2.048 \times 2.048 \times 2.048$ voxels. O tamanho de cada voxel foi de $1,64 \mu\text{m}$, resultando em imagens 3D com as seguintes dimensões $3,36 \times 3,36 \times 3,36 \text{ mm}^3$.

3.2.2.2 Microtomografia de raios X com resolução de $5,25 \mu\text{m}$

As amostras dos agregados de solo com dimensões de aproximadamente 2 cm foram escaneadas em um sistema de μ TC de alta resolução, modelo Nanotom (Phoenix X-ray/GE Measurement & Control Systems), localizado na *Hounsfield Facility*, localizada na Universidade de Nottingham, Reino Unido. O dispositivo é equipado com fonte de raios X do tipo nanofoco com tensão máxima de 180 kV. Os parâmetros para a aquisição das imagens foram:

tensão de 90 kV, corrente de 70 μ A e tempo de exposição de 750 milissegundos por projeção. Para cada amostra foram geradas 1.800 projeções.

A detecção dos fótons de raios X foi feita com uma câmera CMOS digital de 5 megapixels, garantindo alta resolução espacial. Um filtro de cobre com 0,1 mm de espessura foi colocado na frente da fonte de raios X para reduzir artefatos de endurecimento de feixe. A reconstrução da imagem 3D foi realizada utilizando o software Phoenix datos-x2 rec, que converte projeções 2D em volumes 3D. As imagens foram inicialmente obtidas com profundidade de cor de 16 bits. O tamanho final do voxel das imagens 3D reconstruídas foi de 5,25 μ m.

3.2.2.3 Microtomografia de raios X com resolução de 35 μ m

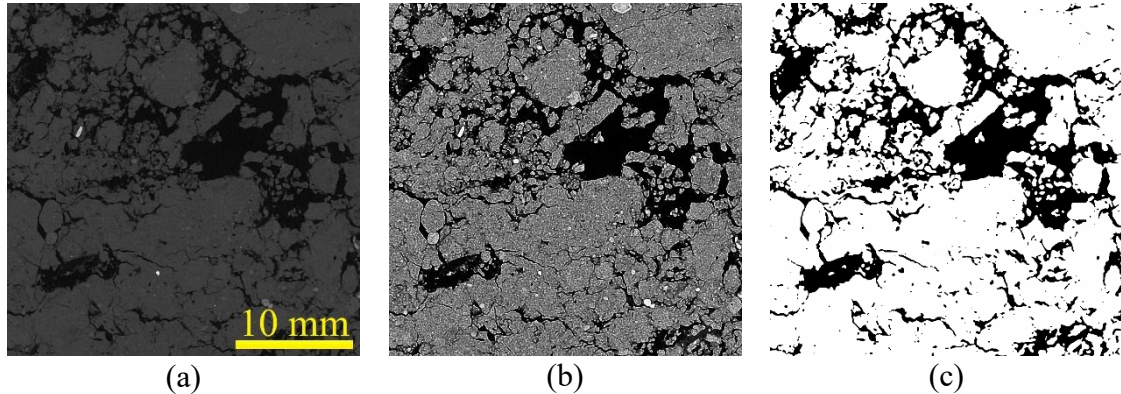
A terceira etapa de aquisição de imagens foi realizada utilizando um μ TC da marca GE, modelo v|tomex|m, localizada na *Hounsfield Facility*, Universidade de Nottingham, Reino Unido. As amostras foram escaneadas selecionando-se uma tensão de 180 kV, corrente de 160 μ A e tempo de exposição de 250 ms. Um filtro de cobre de 0,25 mm foi utilizado próximo à fonte de raios X para minimizar artefatos de endurecimento de feixe.

Após a reconstrução das imagens utilizando o software Inspect-X/CT Pro 3D, essas imagens foram importadas para o VG StudioMAX® e ImageJ, onde foram recortadas em formato cúbico ($860 \times 860 \times 860$ pixels), correspondendo a um volume de aproximadamente $30,1 \times 30,1 \times 30,1$ mm³. Esse recorte teve como objetivo eliminar regiões próximas às paredes do cilindro que pudessem apresentar compactação. A seleção do volume final foi realizada utilizando a ferramenta ROI do ImageJ. As imagens foram inicialmente obtidas com profundidade de cor de 32 bits.

3.2.3 Segmentação das Imagens 3D

As imagens de μ TC obtidas em escala de cinza (Figura 3.1a) foram processadas e segmentadas utilizando o software ImageJ (Schneider et al., 2012). O pré-processamento incluiu a aplicação do filtro *3D Median* com raio de 2 pixels em todas as direções (x, y e z) visando a redução de ruído e preservação das interfaces entre fases (sólido e ar). Em seguida, foi aplicado o filtro *Unsharp Mask* com raio de 1 pixel e peso de máscara de 0,9 visando melhorar o contraste entre as fases segmentadas (Figura 3.1b).

Figura 3.1 Etapas do processo de segmentação aplicado a uma das fatias bidimensionais (2D) de uma amostra sob plantio cultivo mínimo com resolução de 35 μm . (a) Imagem original em escala de cinza; (b) Imagem após passagem dos filtros Median 3D e Unsharp Mask; (c) Imagem binarizada obtida pelo método de Otsu após remoção de outliers, com os poros apresentados em preto (255) e matriz sólida em branco (0).



Fonte: Gaspareto et al. (2025).

A segmentação foi realizada utilizando o método global de Otsu (Abrosimov et al., 2021), que determina o limiar ideal para a separação de fases (poros e sólidos) maximizando a variância interclasse. Após a binarização, uma inspeção visual detalhada usando ferramentas de ampliação de fatias 2D das imagens foi realizada para verificar a qualidade da segmentação. Por fim, a ferramenta *Remove Outliers* foi aplicada com os parâmetros *Bright* = 4,0 e *Dark* = 2,0 visando remover possíveis ruídos remanescentes nas imagens. As imagens foram convertidas em formato 8 bits, padronizando a escala de cinza em 256 tons de cinza. As imagens binárias resultantes (Figura 3.1c) apresentaram os poros com valor 255 (preto) e a matriz sólida com valor 0 (branco), formando a base de imagens para as análises micromorfológicas subsequentes.

3.2.4 Seleção de Subvolume

Para a determinação do VER foi adotada a estratégia de seleção de sub-volumes baseada em cubos concêntricos. Partindo do volume de interesse (VOI) englobando toda a imagem 3D, uma série de 19 subvolumes progressivamente menores foi gerada, todos centrados a partir da região central do VOI. Essa abordagem permitiu a avaliação das variações das propriedades micromorfológicas em função dos subvolumes em diferentes escalas de medida.

O corte dos subvolumes foi realizado utilizando a ferramenta de *crop* do ImageJ, permitindo a extração com precisão de cada subvolume. Cada cubo foi extraído de acordo com o comprimento da janela (L) específicos de cada imagem, para as três resoluções estudadas (1,64 μm , 5,25 μm e 35 μm), conforme detalhado na tabela a seguir.

Tabela 3.1 Dimensões dos 20 subvolumes analisados para definir o volume elementar representativo (VER) para as imagens 3D com as diferentes resoluções (1,64, 5,25 e 35 μm).

Resolução n°/subvolume	1,64 μm			5,25 μm			35 μm		
	L	L	V	L	L	V	L	L	V
1	15	0,025	$1,5 \times 10^{-5}$	40	0,21	$9,5 \times 10^{-3}$	100	3,5	$4,3 \times 10^1$
2	30	0,050	$1,2 \times 10^{-4}$	50	0,27	$1,9 \times 10^{-2}$	140	4,9	$1,2 \times 10^2$
3	45	0,074	$4,0 \times 10^{-4}$	75	0,40	$6,3 \times 10^{-2}$	180	6,3	$2,5 \times 10^2$
4	60	0,098	$9,5 \times 10^{-4}$	100	0,53	$1,5 \times 10^{-1}$	220	7,7	$4,6 \times 10^2$
5	75	0,12	$1,9 \times 10^{-3}$	125	0,66	$2,9 \times 10^{-1}$	260	9,1	$7,5 \times 10^2$
6	90	0,15	$3,2 \times 10^{-3}$	150	0,80	$5,0 \times 10^{-1}$	300	10,5	$1,2 \times 10^3$
7	105	0,17	$5,1 \times 10^{-3}$	175	0,93	$8,0 \times 10^{-1}$	340	11,9	$1,7 \times 10^3$
8	120	0,20	$7,6 \times 10^{-3}$	200	1,06	$1,2 \times 10^0$	380	13,3	$2,4 \times 10^3$
9	135	0,22	$1,1 \times 10^{-2}$	225	1,19	$1,7 \times 10^0$	420	14,7	$3,2 \times 10^3$
10	150	0,25	$1,5 \times 10^{-2}$	250	1,33	$2,3 \times 10^0$	460	16,1	$4,2 \times 10^3$
11	165	0,27	$2,0 \times 10^{-2}$	275	1,46	$3,1 \times 10^0$	500	17,5	$5,4 \times 10^3$
12	180	0,30	$2,6 \times 10^{-2}$	300	1,60	$4,0 \times 10^0$	540	18,9	$6,8 \times 10^3$
13	195	0,32	$3,3 \times 10^{-2}$	325	1,72	$5,1 \times 10^0$	580	20,3	$8,4 \times 10^3$
14	210	0,34	$4,1 \times 10^{-2}$	350	1,86	$6,4 \times 10^0$	620	21,7	$1,0 \times 10^4$
15	225	0,37	$5,0 \times 10^{-2}$	375	1,99	$7,9 \times 10^0$	660	23,1	$1,2 \times 10^4$
16	240	0,39	$6,1 \times 10^{-2}$	400	2,12	$9,5 \times 10^0$	700	24,5	$1,5 \times 10^4$
17	255	0,42	$7,3 \times 10^{-2}$	425	2,25	$1,1 \times 10^1$	740	25,9	$1,7 \times 10^4$
18	270	0,44	$8,7 \times 10^{-2}$	450	2,39	$1,4 \times 10^1$	780	27,3	$2,0 \times 10^4$
19	285	0,47	$1,0 \times 10^{-1}$	475	2,52	$1,6 \times 10^1$	820	28,7	$2,4 \times 10^4$
20	300	0,49	$1,2 \times 10^{-1}$	500	2,65	$1,9 \times 10^1$	860	30,1	$2,7 \times 10^4$

Fonte: Gaspareto et al. (2025).

Vale ressaltar que algumas das propriedades micromorfológicas analisadas neste estudo foram investigadas anteriormente por meio de diferentes abordagens metodológicas. Para a resolução de 1,64 μm , dados amostrais semelhantes foram examinados por Ferreira et al. (2023), enquanto análises com resolução de 5,25 μm foram publicadas por Pires et al. (2022). Em relação à resolução de 35 μm , os resultados foram relatados por Pires et al. (2020), com valores médios de VER posteriormente discutidos por Gaspareto et al. (2023).

Porém, a principal inovação deste estudo reside na abordagem de determinação do VER para cada amostra. Ao contrário dos estudos mencionados, que se baseavam em valores médios, a metodologia aqui apresentada avalia especificamente a variabilidade intrínseca de cada amostra individual. Esse avanço permite uma caracterização mais precisa da heterogeneidade estrutural no solo estudado, proporcionando maior detalhamento da análise da rede de poros sob diferentes sistemas de manejo.

3.2.5 Propriedades Micromorfológicas

3.2.5.1 Porosidade imageada (P)

A porosidade é uma propriedade física do solo que mede a quantidade de vazios existentes em um determinado volume de solo. Quando medida usando a técnica de μ TC, a porosidade pode ser calculada por:

$$P (\%) = \sum \frac{V_{\text{poros}}}{V_{\text{amostra}}} 100 \quad (3.1)$$

onde V_{poros} e V_{amostra} representam o volume de poros e o volume da amostra, respectivamente. Para quantificar o volume de poros foi usada a função *voxel counter* no ImageJ. O volume de amostra foi o volume de interesse utilizado para cada subvolume.

3.2.5.2 Dimensão fractal (DF)

A dimensão fractal caracteriza a complexidade geométrica da estrutura da rede de poros. Esse parâmetro foi calculado nesse estudo usando o método de contagem de caixas (*box counting*) usando o plugin *fractal dimension* no ImageJ. A técnica baseia-se na relação existente entre o número de caixas (n) necessárias para cobrir a estrutura analisada e o tamanho da caixa (R), expressa como:

$$DF = \lim_{R \rightarrow 0} \frac{\log n}{\log \frac{1}{R}} \quad (3.2)$$

Na interpretação dos resultados, os maiores valores de DF indicam maior irregularidade e complexidade na distribuição dos poros.

3.2.5.3 Grau de anisotropia (GA)

O grau de anisotropia (GA) fornece informações sobre a variação das propriedades de um material de acordo com a direção de medição. Essa propriedade geralmente apresenta valores entre 0 e 1. Um GA igual a 0 indica que a propriedade analisada é completamente isotrópica, ou seja, a amostra não possui direcionalidade. Já um GA igual a 1 indica a orientação de estruturas específicas na imagem. Neste estudo, o plugin *BoneJ* foi utilizado para o cálculo do GA. O método empregado se baseia em uma série de vetores de comprimento idêntico, que partem de posições específicas no volume analisado. Esses vetores são então divididos pelo número de vezes em que eles interceptam os poros, resultando no comprimento médio de interceptação. Elipsóides são utilizados para construir os tensores de anisotropia. Assim, é possível obter autovalores, relacionados aos comprimentos dos eixos do elipsóide, e autovetores,

que fornecem as orientações desses eixos. A equação para o cálculo do GA utilizada neste trabalho foi proposta por Tseng et al. em 2018:

$$GA = 1 - \frac{SE}{LE} \quad (3.3)$$

onde SE e LE representam os menores e maiores autovalores, respectivamente.

3.2.5.4 Conectividade dos poros (C)

A conectividade dos poros foi avaliada por meio do número de Euler (NE), calculado usando o plugin *connectivity* no BoneJ. Antes do cálculo de C, as imagens 3D foram submetidas ao filtro *purify* no BoneJ. Esse comando isola o maior componente, ou seja, ele identifica e remove todas as partículas (ou seja, regiões de pixels conectados) da imagem, com exceção da maior delas, tanto para o material sólido (foreground) quanto para o espaço poroso (background). Em outras palavras, o software assume que, em um sistema poroso, a maior partícula do foreground é o esqueleto sólido, e a maior partícula do background é o sistema de poros interconectados. Ao remover todas as outras partículas menores e isoladas, o *purify* garante que a análise subsequente se concentre apenas no principal componente conectado do sistema, eliminando ruídos ou artefatos que não representam a estrutura principal. Para o cálculo de C foram usadas as seguintes relações:

$$NE = N_{ob} - C + H \quad (3.4)$$

$$C = 1 - NE \quad (3.5)$$

onde N_{ob} representa objetos conectados e H cavidades fechadas. Em redes altamente conectadas, NE assume valores negativos, indicando o predomínio de estruturas porosas conectadas, uma vez que o *purify* remove todas as cavidades fechadas isoladas H tende a zero. Como C se mostrou altamente dependente do volume amostral, para a análise do VER foi realizada a normalização da conectividade dos poros (C/V).

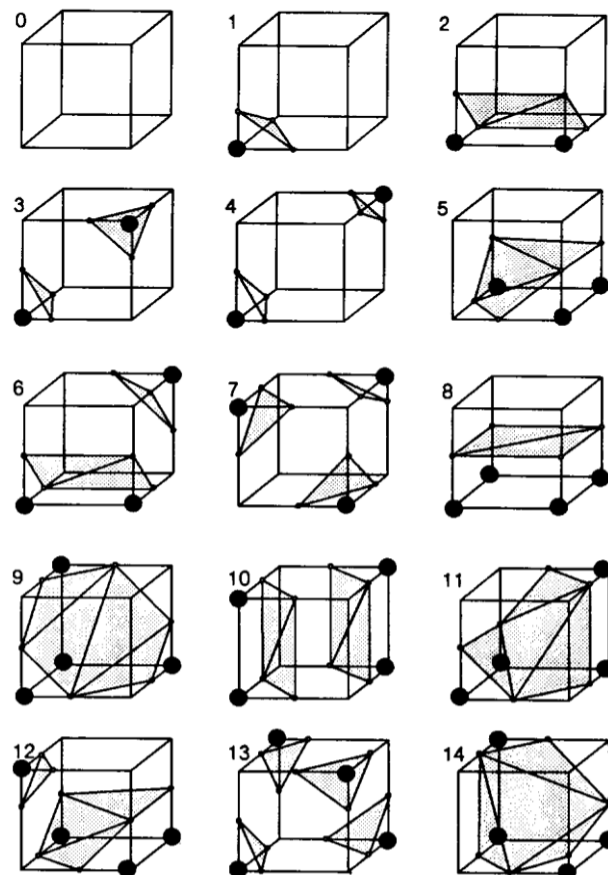
3.2.5.5 Número de poros (NP) e área de superfície (AS)

A contagem do número total de poros (NP) e a medida da área de superfície (AS) dos poros foram realizadas usando o plugin *particle analyzer* no ImageJ. A ferramenta que permite a medida de NP identifica e quantifica poros individuais em imagens binárias. Para cada poro individual é possível mensurar a sua área de superfície. Para calcular AS é usado o Marching Cubes que é um algoritmo de gráficos de computador introduzido por Lorensen e Cline (1987) que gera uma malha poligonal (triângulos) que representa o contorno (superfície) de um volume de dados 3D. Uma (AS) maior para um dado volume de poro significa que ele tem

uma forma mais rugosa e complexa ou é composto por muitas ramificações estreitas. O cálculo da Área de Superfície envolve os seguintes passos: (a) Definição da Superfície: O algoritmo varre o stack de voxels e se concentra em pequenos cubos de $2 \times 2 \times 2$ voxels. Cada vértice do cubo é classificado como pertencente ao interior (o poro) ou ao exterior (o sólido); (b) Determinação dos Casos (Cubos): Um cubo de $2 \times 2 \times 2$ tem 8 vértices, logo existem $2^8 = 256$ combinações possíveis de como a superfície pode cruzar esse cubo. O Marching Cubes pré-calcula esses 256 casos (e usa simetria para reduzir o número real de casos únicos) para determinar como traçar a superfície através do cubo, o qual é reduzido por simetria para 14 padrões (Figura 3.2); (c) Geração dos Triângulos: Para cada cubo, o algoritmo insere de zero a cinco triângulos na fronteira entre o interior (o poro) e o exterior (o sólido). Esses triângulos formam a malha de superfície; (d) A área de cada triângulo individual é calculada (usando geometria básica no espaço 3D); (e) A Área de Superfície total (AS) da partícula é obtida pela soma das (n) áreas de todos os triângulos que formam a malha ($A_{\text{triângulo}}$). Conforme a equação a seguir:

$$AS = \sum_i^n A_{\text{triângulo}} \quad (3.6)$$

Figura 3.2 Triangulação para os 14 padrões reduzidos.



Fonte: Lorensen e Cline (1987).

3.2.5.6 Tortuosidade (τ)

A sinuosidade dos poros foi avaliada através da razão entre o comprimento geodésico (L_g) e o comprimento euclidiano (L_e) na rede de poros (Roque; Costa, 2020):

$$\tau = \frac{L_g}{L_e} \quad (3.7)$$

Para essa medida foi utilizado o plugin *tortuosity* no imageJ por meio do algoritmo de reconstrução geodésica (Gommes et al., 2009). Para calcular a tortuosidade, a estrutura bidimensional ou tridimensional de imagens binarizadas é analisada com base nos voxels que representam a rede de poros. No caso de imagens 3D, o espaço poroso é reconstruído voxel a voxel. Para isso, uma varredura é realizada a partir de um plano normal inicial, usando uma determinada direção de referência. A varredura se estende da primeira fatia até uma fatia N, e o número total de reconstruções geodésicas presentes nas N-ésimas fatias é denominado N_g . Assim, o número total de reconstruções geodésicas, que analisam todos os voxels contendo poros por fatia, é tal que $N_g \geq N$. A partir desse procedimento, a distância geodésica (L_g) de um meio poroso pode ser encontrada em todos os planos normais de interesse, nas direções ($\pm x, \pm y, \pm z$). Para determinar a distância euclidiana (L_e), é necessário o número total de fatias (N) do volume que foi submetido à varredura. Uma vez que os valores de L_g e L_e são obtidos, é possível construir um gráfico de dispersão com base na Equação 3.7. A tortuosidade, então, pode ser estimada a partir da equação que melhor se ajuste à inclinação da reta linear, cujo coeficiente angular fornecerá o valor da tortuosidade (Gaspareto, 2018; Roque; Costa, 2020). Esse parâmetro foi calculado ao longo das três direções espaciais (coronal, sagital, axial) do plano cartesiano 3D, sendo a tortuosidade média (τ) um indicador da complexidade espacial da rede de poros. Uma representação em 2D dos caminhos L_g e L_e são mostrados a seguir.

Figura 3.3 Representação 2D do comprimento geodésico (linha vermelha), e do comprimento euclidiano (linha azul) partindo do mesmo ponto A até o ponto B. As regiões brancas representam o solo e as regiões pretas os poros.



Fonte: O autor

3.2.6 Procedimentos para a Definição do Volume Elementar Representativo (VER)

A identificação do VER foi baseada na análise das propriedades micromorfológicas em função da escala da janela de observação (L), empregando a relação direta entre a escala de comprimento L e o subvolume analisado ($L = \sqrt[3]{V}$), conforme proposto por Costanza-Robinson et al. (2011). Esse tipo de formulação permite a investigação sistemática do comportamento das propriedades físicas do solo em diferentes escalas, garantindo maior confiabilidade na determinação do VER.

Para avaliar a existência de estabilização (platô) das propriedades micromorfológicas do meio poroso, foi adotado um critério que compara os valores das propriedades medidas entre um subvolume ω_i e o volume máximo analisado ω_x (Ferreira et al., 2015). O parâmetro Δ_i , que quantifica a diferença percentual entre as escalas, foi calculado como:

$$\Delta_i = \left| 1 - \frac{\omega_i}{\omega_x} \right| 100 \quad (3.8)$$

A estabilização (ou seja, o volume mínimo para o qual as propriedades se tornam representativas) foi identificada quando Δ_i ficou abaixo do coeficiente de variação (CV) da propriedade medida:

$$\Delta_i < CV \quad (3.9)$$

O coeficiente de variação foi calculado a partir da dispersão relativa dos valores das propriedades nos subvolumes:

$$CV = \frac{s}{\bar{\omega}} 100 \quad (3.10)$$

onde s representa o desvio padrão ($\approx 68\%$) da média do conjunto (ω_i) e $\bar{\omega}$ a média aritmética. Para amostras que apresentam alta variabilidade interna, definimos o limite máximo aceitável de CV em 50%. Esse limite relativamente alto foi escolhido para refletir a heterogeneidade inerente das redes de poros do solo com base nas várias propriedades micromorfológicas medidas, uma vez que limites mais baixos (como 10-20%) excluiriam volumes que ainda são representativos do comportamento físico do sistema. Na prática, o uso de um limite mais rigoroso levaria a estimativas VER maiores, enquanto um critério mais flexível resultaria em estimativas menores. Ao selecionar um limite de 50%, buscou-se encontrar um equilíbrio entre a sensibilidade à variabilidade estrutural e a necessidade de identificar volumes significativos e representativos, essa limitação deve ser levada em consideração ao aplicar valores VER em diferentes tipos de solo.

Seguindo a metodologia de VandenBygaart e Protz (1999), foi implementado neste estudo um critério adicional de definição do VER, ou seja, o VER foi considerado alcançado

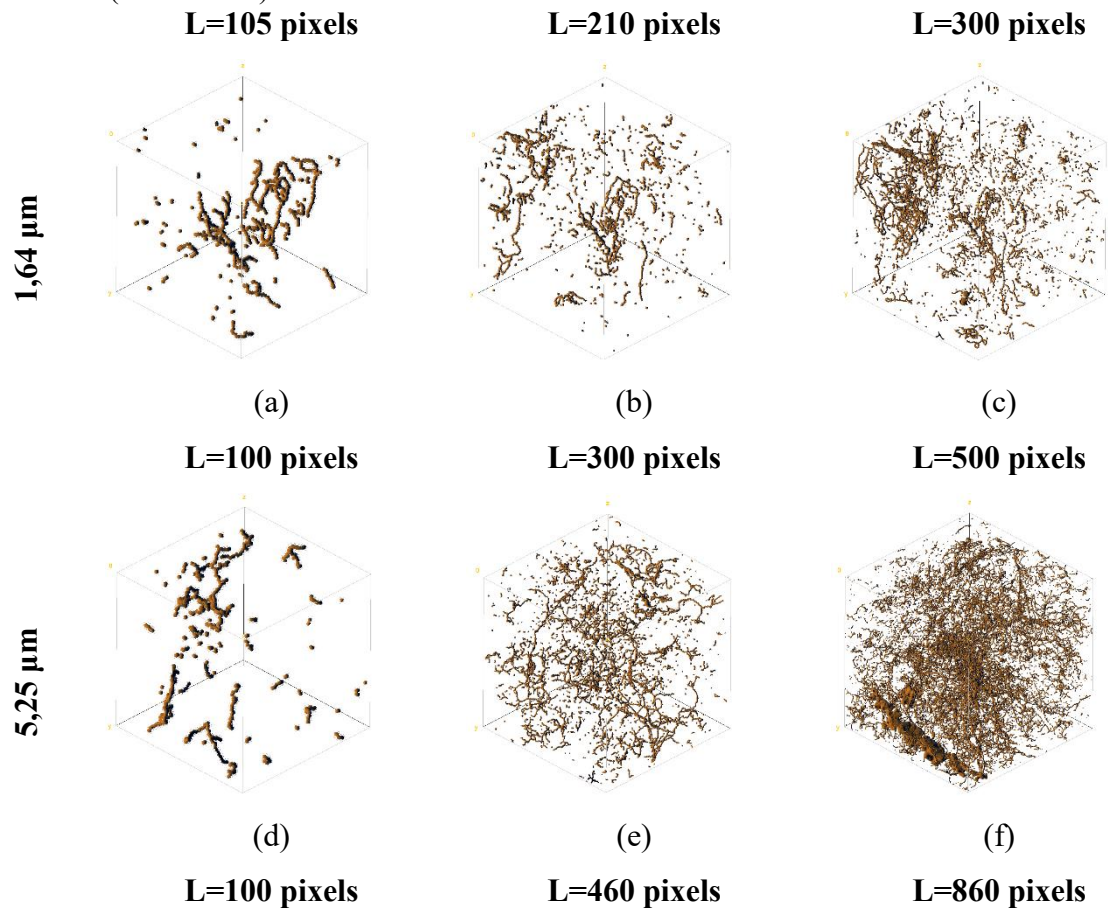
somente quando cinco ou mais subvolumes consecutivos apresentavam valores estáveis e estatisticamente indistinguíveis considerando o critério estatístico usado, vale ressaltar que o quinto subvolume foi considerado com VER. Essa abordagem garante que o VER identificado reflita a variabilidade intrínseca da propriedade física medida, ao invés de limites de variação predeterminados.

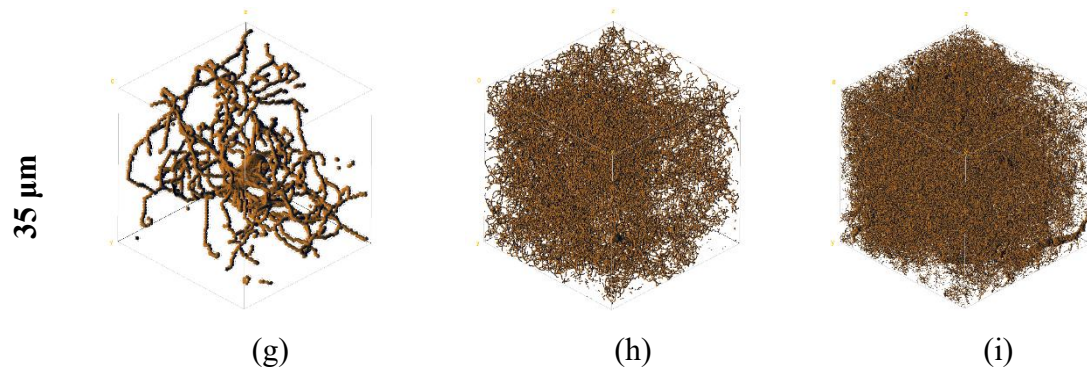
3.3 RESULTADOS

3.3.1 Esqueleto dos Poros 3D

Nas Figuras 3.4 (PC) e 3.5 (PM) são apresentadas imagens 3D ilustrando variações na rede de poros em função dos subvolumes para as três diferentes resoluções. Foi escolhida uma amostra representativa para cada resolução e sistema de manejo do solo.

Figura 3.4 Imagens do esqueleto dos poros das amostras sob plantio convencional (PC) para as resoluções de 1,64 μm (a-c), 5,25 μm (d-f) e 35 μm (g-i). L representa os diferentes comprimentos lineares das caixas (subvolumes).



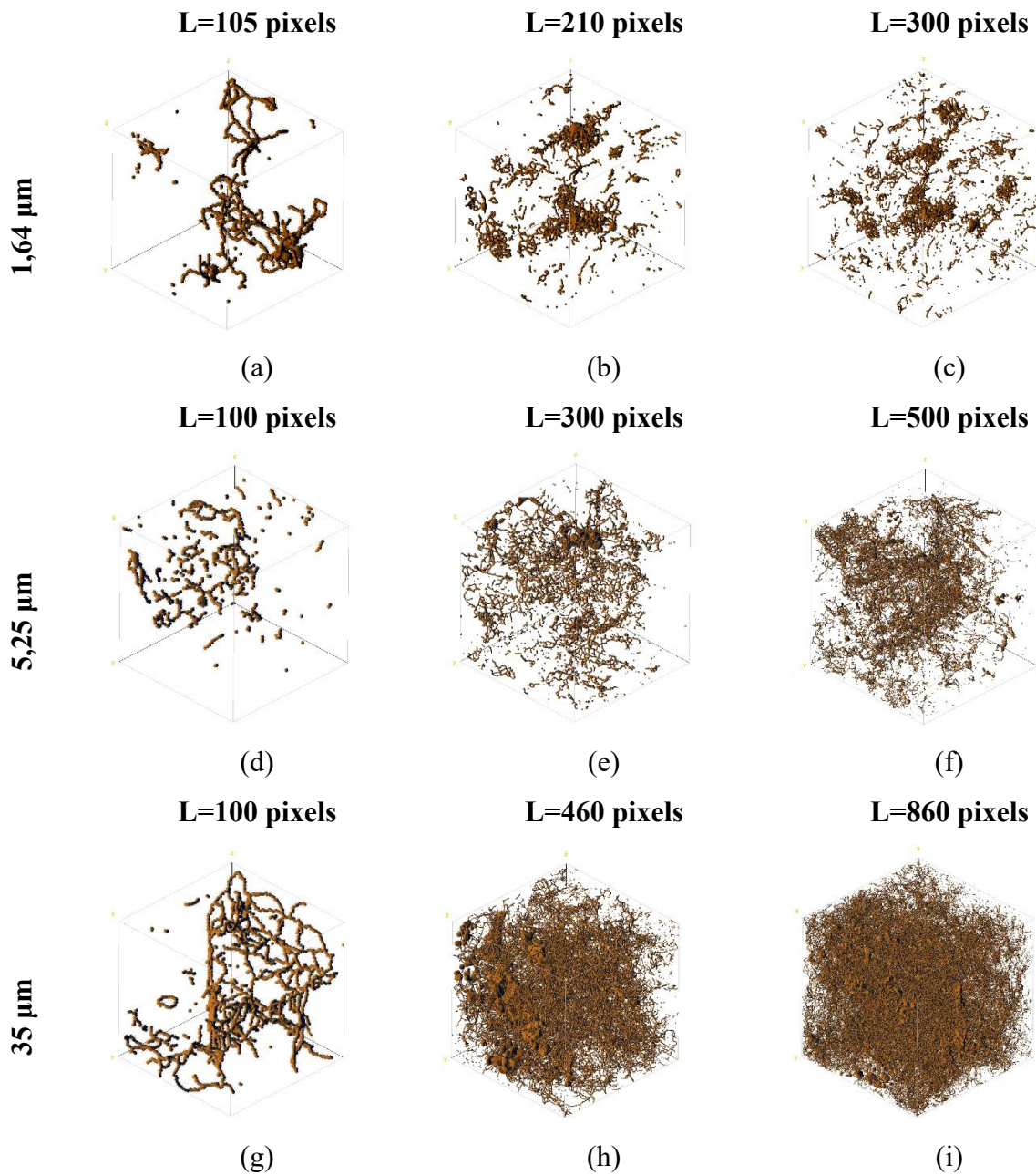


Fonte: Gaspareto et al. (2025).

No caso de PC (Figura 3.4), o menor subvolume apresenta menos poros, e o número de poros aumenta com o aumento do subvolume. Essa variação na quantidade de poros leva a flutuações nos parâmetros físicos que estão sendo analisados. Idealmente, à medida que os subvolumes se aproximam do REV, as propriedades medidas tornam-se mais consistentes, uma tendência observada no maior subvolume para as imagens de 35 μm . Nas resoluções mais altas (1,64 μm e 5,25 μm), as variações na rede de poros são mais pronunciadas. O menor subvolume nessas resoluções continha poros mais isolados. Com o aumento do subvolume, os poros pareciam seguir um padrão de preenchimento, embora permanecessem numerosos aglomerados isolados. Na resolução mais baixa, os poros estavam mais interconectados, e o aumento do subvolume resultou em um preenchimento mais uniforme dos poros.

Para PM (Figura 3.5), foram observadas semelhanças com as imagens de PC, com um aumento no subvolume levando a um maior número de poros. Assim como no PC, a resolução mais baixa (35 μm) mostra a semelhança mais significativa na rede de poros com o aumento dos subvolumes, o que pode resultar em flutuações menores nas propriedades. Os menores subvolumes em resoluções mais altas também exibiram poros mais isolados, como no PC, mas no PM esses poros estavam mais conectados. No entanto, à medida que o tamanho do subvolume aumentava, os poros tendiam a formar aglomerados não uniformes. Na resolução mais baixa, os poros estavam mais conectados, mesmo no menor subvolume, mas estavam concentrados em uma de suas faces. Semelhante à PC, o aumento do tamanho do subvolume leva a uma distribuição de poros mais uniforme e homogênea.

Figura 3.5 Imagens do esqueleto dos poros das amostras sob plantio cultivo mínimo (PM) para resoluções de 1,64 μm (a-c), 5,25 μm (d-f) e 35 μm (g-i). L representa os diferentes comprimentos lineares das caixas (subvolumes).



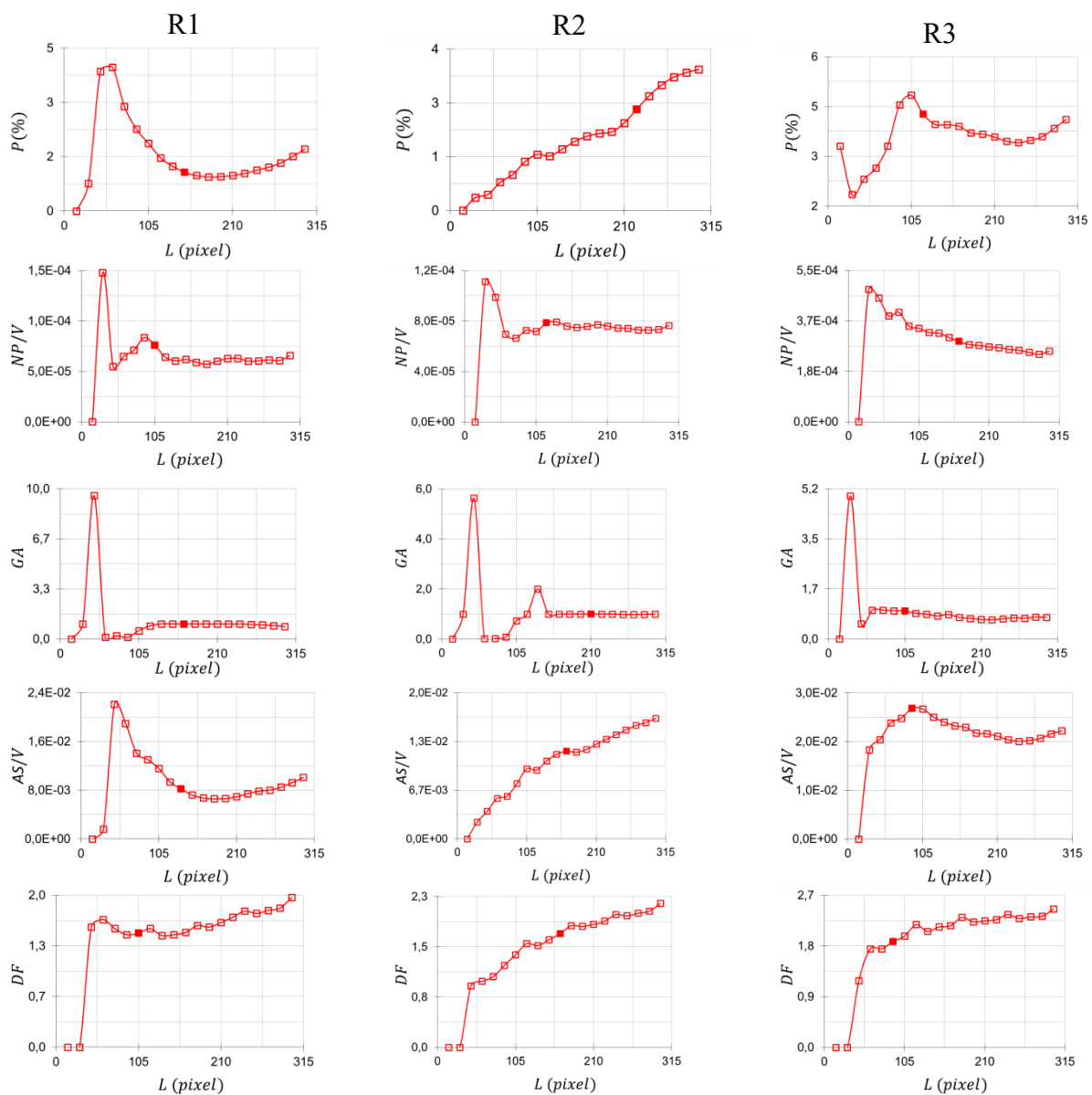
Fonte: Gaspareto et al. (2025).

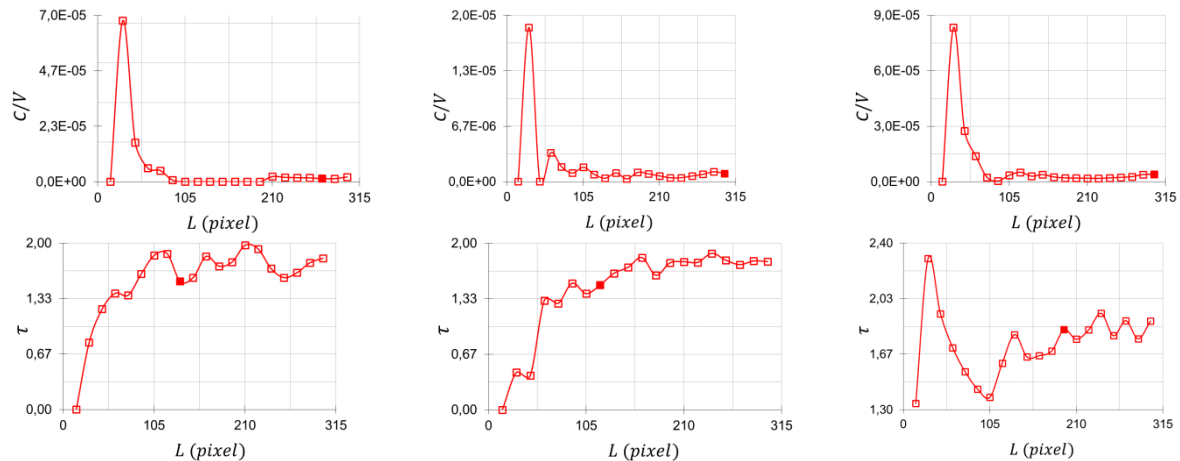
3.3.2 Volume Elementar Representativo em Função das Propriedades Morfológicas Medidas e Resoluções

Os resultados do VER para cada propriedade micromorfológica quantificada, diferentes resoluções e cada amostra para PC são apresentados nas Figuras 3.6 até 3.8. Para a maior resolução (1,64 μm) todas as propriedades físicas analisadas atingiram o VER (Figura 3.6). Para P o VER foi alcançado para a caixa $L = 0,37 \text{ mm}$, para NP/V em $L = 0,27 \text{ mm}$, para GA

em $L = 0,34$ mm, para AS/V em $L = 0,27$ mm, para DF para em $L = 0,27$ mm, para C/V em $L = 0,44$ mm e para τ em $L = 0,32$ mm. No geral, as amostras apresentaram similaridades no comportamento das propriedades analisadas com o aumento do tamanho das caixas, com exceção de R2 para P e AS/V e R3 para τ .

Figura 3.6 Porosidade imageada (P), Número de poros por volume (NP/V), Grau de anisotropia (GA), Área su-perficial por volume (AS/V), Dimensão fractal (DF), Conectividade dos poros por volume (C/V) e Tortuosidade (τ) em função das diferentes escalas de comprimento de janela (L) obtidas a partir de imagens de microtomografia com resolução de $1,64 \mu\text{m}$ do solo sob plantio convencional (PC). R1, R2 e R3 representam as amostras analisadas sob PC.

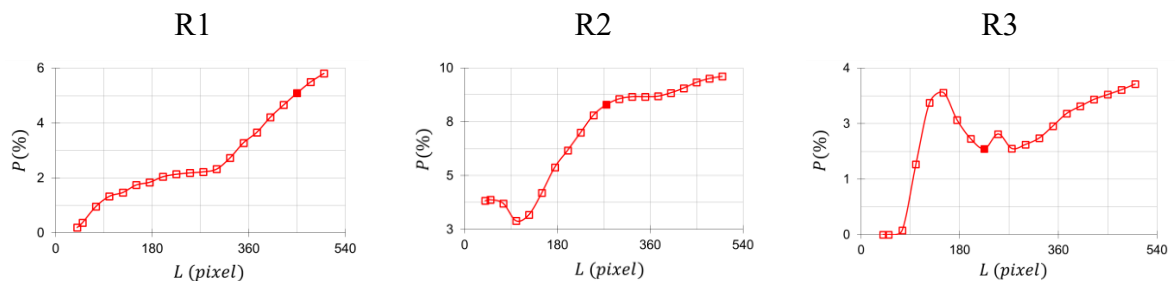


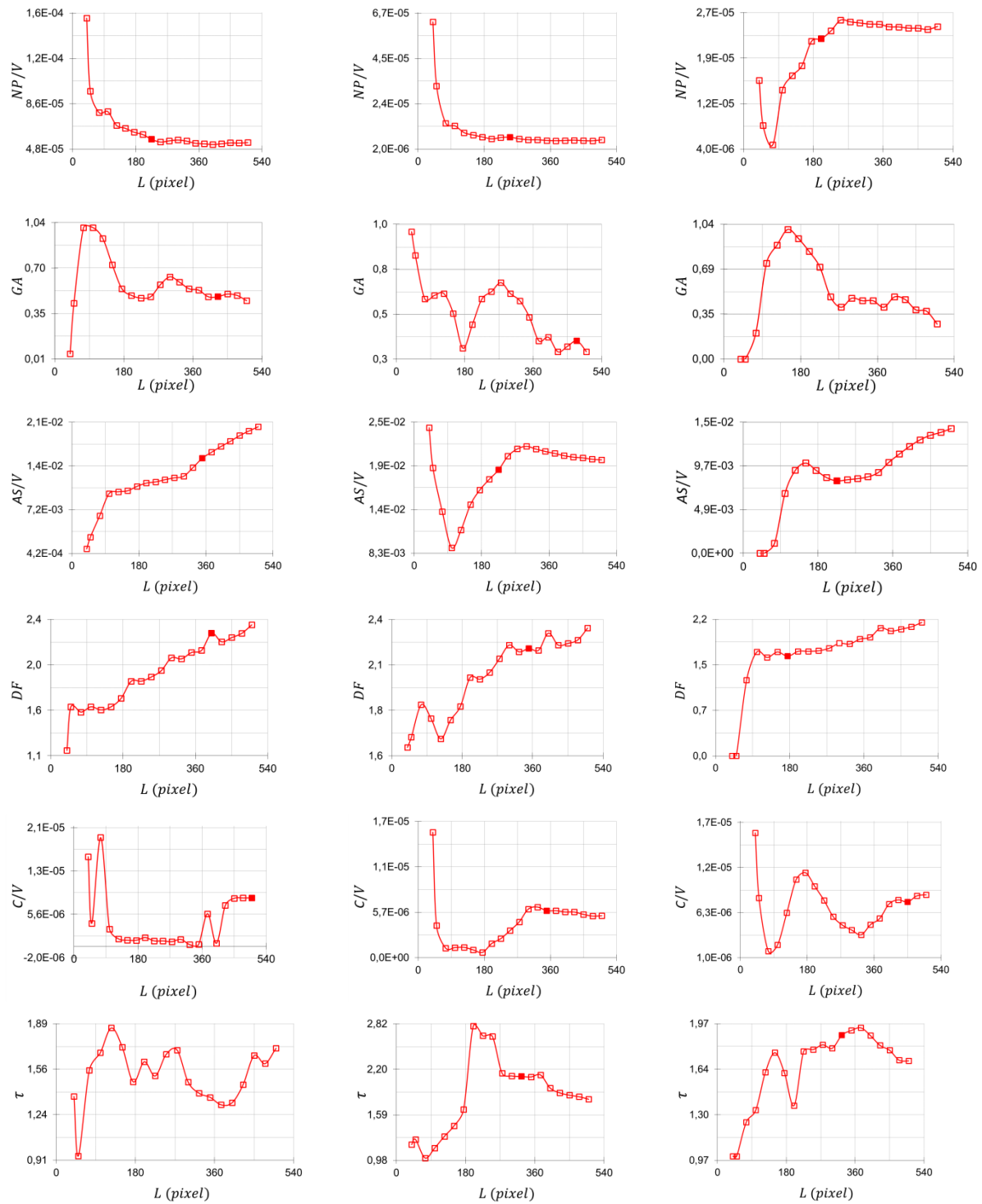


Fonte: Gaspareto et al. (2025).

Para a resolução de $5,25 \mu\text{m}$ (Figura 3.7), uma das amostras sob PC não atingiu o VER para GA (R3) e outra para τ (R1). Este resultado sugere que para estas duas propriedades são necessárias amostras maiores para definir o VER, e por esta razão não foi atribuído um tamanho representativo para elas. No entanto, todas as outras propriedades morfológicas analisadas atingiram o volume elementar representativo. Para P o VER foi alcançado para a caixa $L = 2,39 \text{ mm}$, para NP/V em $L = 1,33 \text{ mm}$, para AS/V em $L = 1,86 \text{ mm}$, para DF em $L = 2,12 \text{ mm}$ e para C/V em $L = 2,65 \text{ mm}$. Para esta resolução, o comportamento das propriedades medidas entre amostras mostra maiores variações entre subvolumes com o aumento do tamanho das caixas.

Figura 3.7 Porosidade imageada (P), Número de poros por volume (NP/V), Grau de anisotropia (GA), Área de superfície por volume (AS/V), Dimensão fractal (DF), Conectividade dos poros por volume (C/V) e Tortuosidade (τ) em função das diferentes escalas de comprimento de janela (L) obtidas a partir de imagens de microtomografia com resolução de $5,25 \mu\text{m}$ do solo sob plantio convencional (PC). R1, R2 e R3 representam as amostras analisadas sob PC.



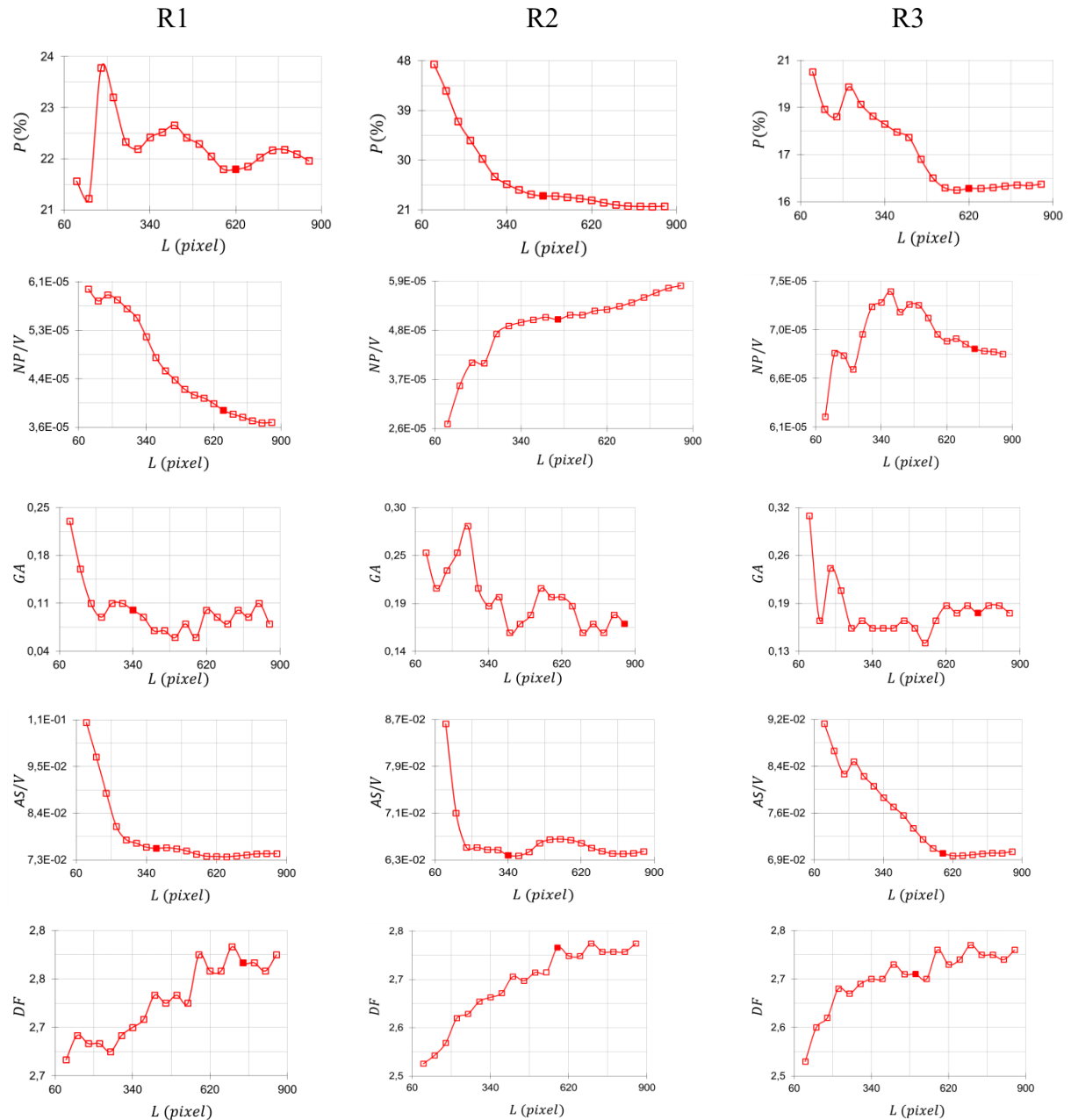


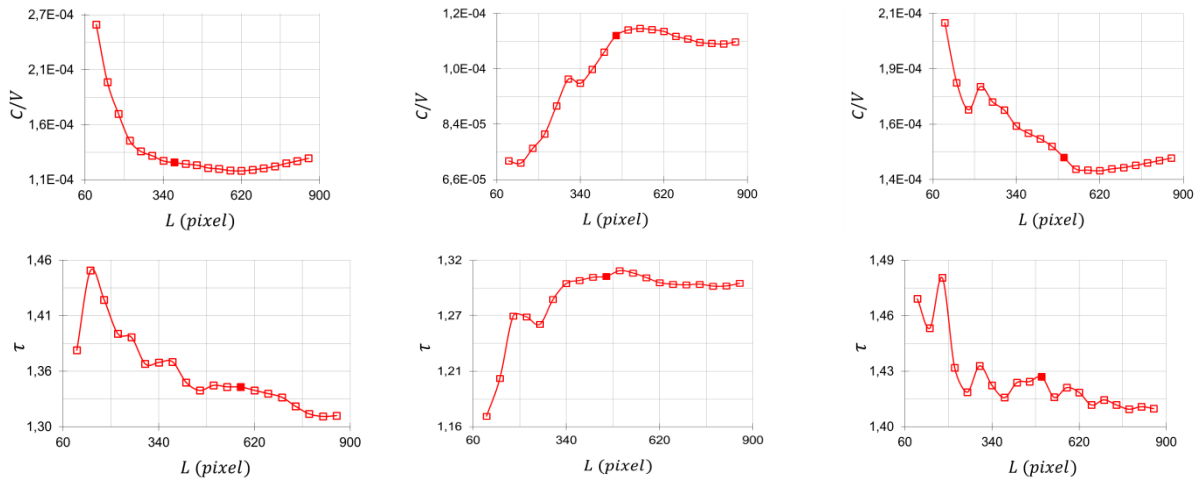
Fonte: Gaspareto et al. (2025).

Para a resolução de $35\ \mu\text{m}$ (Figura 3.8), todas as amostras sob PC atingiram o VER para as diferentes propriedades micromorfológicas analisadas. Para P o VER foi alcançado para a caixa $L = 21,7\ \text{mm}$, para NP/V em $L = 25,9\ \text{mm}$, para GA em $L = 30,1\ \text{mm}$, para AS/V em $L = 20,3\ \text{mm}$, para DF em $L = 25,9\ \text{mm}$, para C/V em $L = 17,5\ \text{mm}$ e para τ em $L = 20,3\ \text{mm}$.

Algumas propriedades exibiram similaridades no comportamento entre as amostras, como GA, AS/V e DF. As demais propriedades micromorfológicas exibiram flutuações entre amostras.

Figura 3.8 Porosidade imageada (P), Número de poros por volume (NP/V), Grau de anisotropia (GA), Área superficial por volume (AS/V), Dimensão fractal (DF), Conectividade dos poros por volume (C/V) e Tortuosidade (τ) em função das diferentes escalas de comprimento de janela (L) obtidas a partir de imagens de microtomografia com resolução de 35 μm do solo sob plantio convencional (PC). R1, R2 e R3 representam as amostras analisadas sob PC.

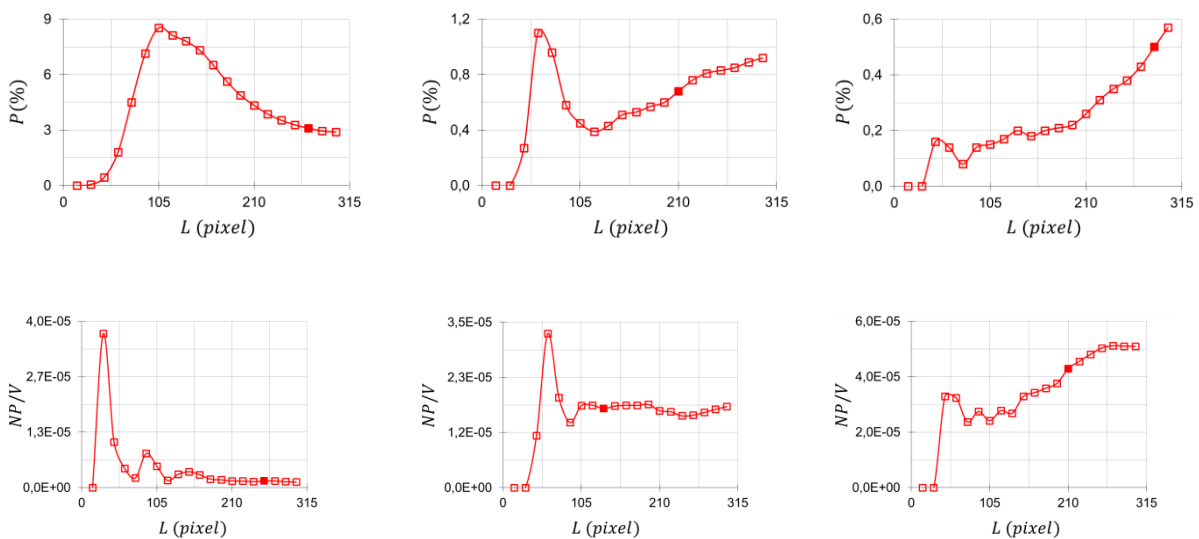


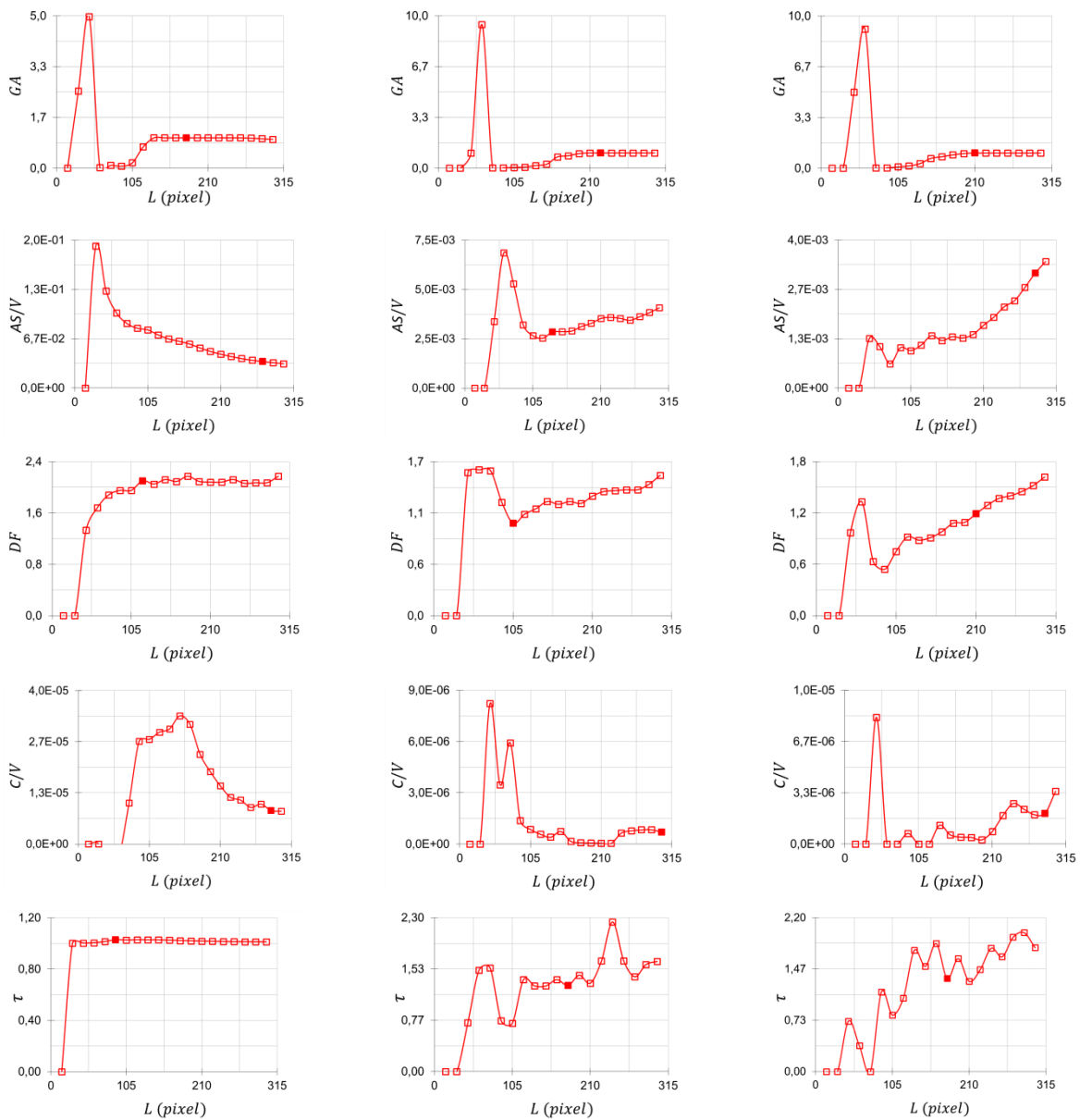


Fonte: Gaspareto et al. (2025).

No caso do solo sob PM e maior resolução ($1,64 \mu\text{m}$), observa-se que o VER foi alcançado para todas as propriedades micromorfológicas estudadas (Figura 3.9). Para P , o VER foi alcançado para a caixa $L = 0,47 \text{ mm}$, para NP/V em $L = 0,42 \text{ mm}$, para GA em $L = 0,37 \text{ mm}$, para AS/V em $L = 0,47 \text{ mm}$, para DF em $L = 0,34 \text{ mm}$, para C/V em $L = 0,49 \text{ mm}$ e para τ em $L = 0,30 \text{ mm}$. No entanto, ao contrário do observado para PC (Figura 3.6), as propriedades analisadas em PM exibiram maiores flutuações entre amostras com o aumento do tamanho da caixa. A única exceção foram os resultados para GA .

Figura 3.9 Porosidade imageada (P), Número de poros por volume (NP/V), Grau de anisotropia (GA), Área superficial por volume (AS/V), Dimensão fractal (DF), Conectividade dos poros por volume (C/V) e Tortuosidade (τ) em função das diferentes escalas de comprimento de janela (L) obtidas a partir de imagens de microtomografia com resolução de $1,64 \mu\text{m}$ do solo sob plantio cultivo mínimo (PM). R1, R2 e R3 representam as amostras analisadas sob PM.

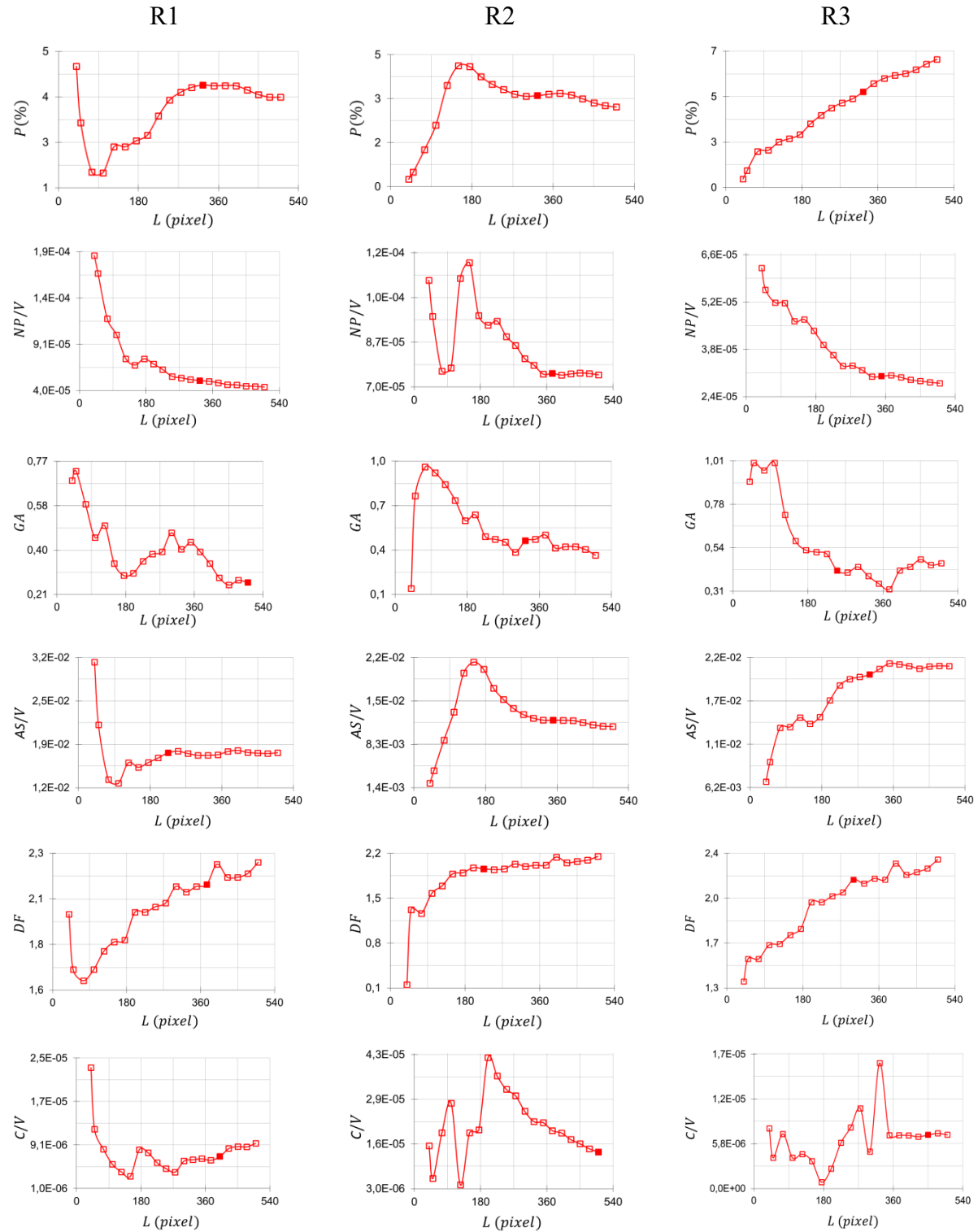


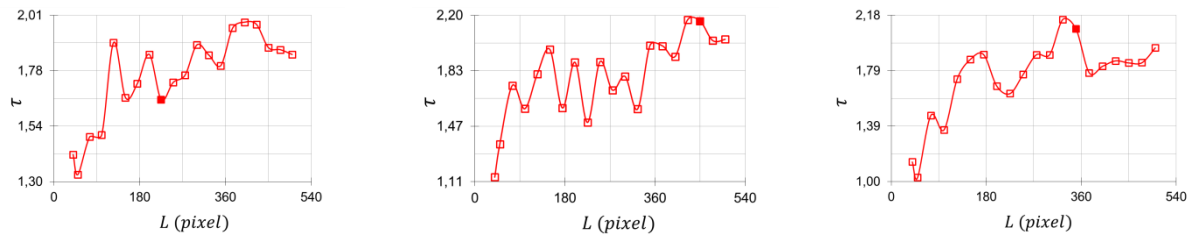


Fonte: Gaspareto et al. (2025).

Ao contrário do observado para PC (Figura 3.7), todas as amostras sob PM atingiram o VER para a resolução de 5,25 μm para as propriedades micromorfológicas analisadas (Figura 3.10). Para P o VER foi alcançado para a caixa $L = 1,72$ mm, para NP/V em $L = 1,99$ mm, para GA em $L = 2,65$ mm, para AS/V em $L = 1,86$ mm, para DF em $L = 1,99$ mm, para C/V em $L = 2,65$ mm e para τ em $L = 2,39$ mm. Em geral, as propriedades analisadas mostraram similaridades entre amostras com aumento do tamanho da caixa para NP/V, DF e τ .

Figura 3.10 Porosidade imageada (P), Número de poros por volume (NP/V), Grau de anisotropia (GA), Área su-perficial por volume (AS/V), Dimensão fractal (DF), Conectividade por volume (C/V) e Tortuosidade (τ) em função das diferentes escalas de comprimento de janela de janela (L) obtidas a partir de imagens de microtomografia com resolução de 5,25 μm do solo sob plantio cultivo mínimo (PM). R1, R2 e R3 representam as amostras analisadas sob PM.

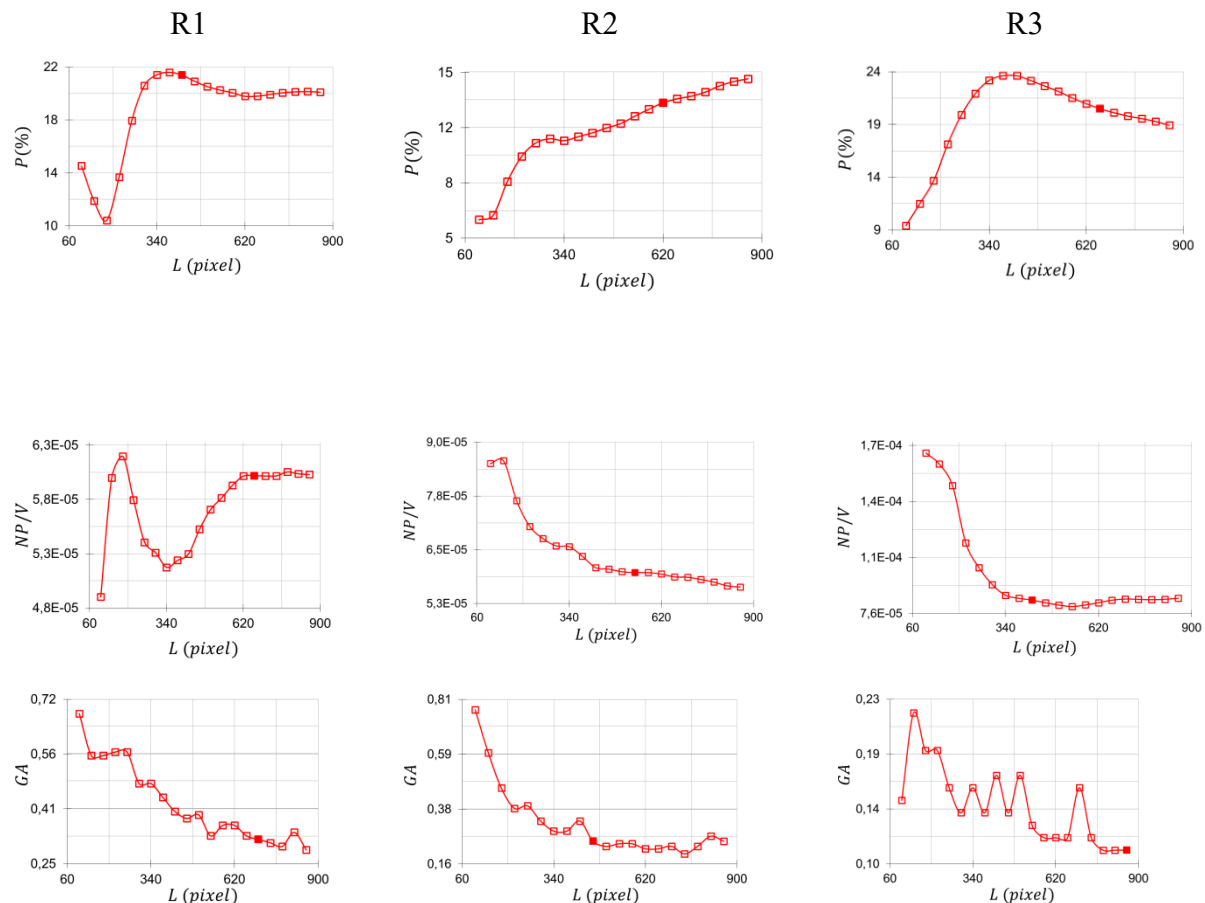


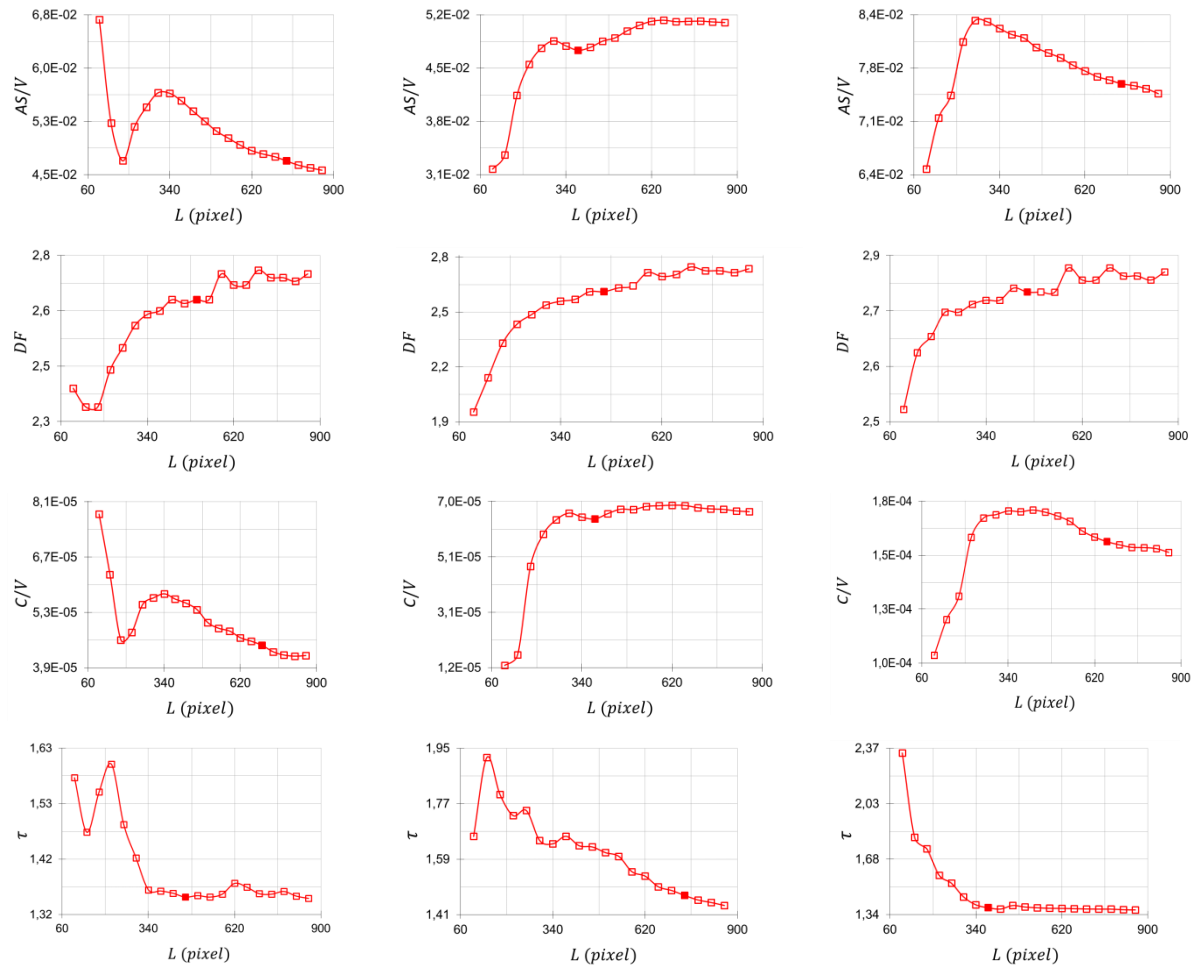


Fonte: Gaspareto et al. (2025).

Para a resolução de 35 μm da imagem do solo sob PM, todas as amostras analisadas atingiram o VER para todas as propriedades micromorfológicas analisadas (Figura 3.11). Para P, o VER foi atingido para a caixa $L = 23,1$ mm, para NP/V em $L = 23,1$ mm, para GA para em $L = 30,1$ mm, para AS/V em $L = 25,9$ mm, para DF em $L = 17,5$ mm, para C/V em $L = 24,5$ mm e para τ em $L = 25,9$ mm. As maiores similaridades no comportamento das flutuações das propriedades medidas com o aumento das caixas foram observadas para GA, DF e τ .

Figura 3.11 Porosidade imageada (P), Número de poros por volume (NP/V), Grau de anisotropia (GA), Área superficial por volume (AS/V), Dimensão fractal (DF), Conectividade dos poros por volume (C/V) e Tortuosidade (τ) em função das diferentes escalas de comprimento de janela (L) obtidas a partir de imagens de microtomografia com resolução de 35 μm do solo sob plantio cultivo mínimo (PM). R1, R2 e R3 representam as amostras analisadas sob PM.





Fonte: Gaspareto et al. (2025).

Comparando as imagens com resolução de 1,64 μm dos diferentes manejos (Figuras 3.6 e 3.9), o VER foi consistentemente menor para PM em relação a PC para P, NP/V, GA, DF e AS/V. Somente τ foi maior para PC em comparação a PM, enquanto para C/V os valores foram os mesmos para ambos os manejos. No caso da resolução de 5,25 μm (Figuras 3.7 e 3.10), o VER foi maior para P e DF para PC na comparação com PM. NP/V apresentou um VER maior para PM em relação a PC, enquanto C/V e AS/V atingiram VER no mesmo tamanho de caixa para ambos os manejos. Para a resolução de 35 μm (Figuras 3.8 e 3.11), os valores de VER para P, AS/V, C/V e τ foram maiores para PM em relação a PC, enquanto para NP/V e DF o oposto foi observado. GA foi a única propriedade micromorfológica que apresentou o mesmo VER para ambos os manejos para a menor resolução.

A Tabela 3.2 apresenta os subvolumes para os quais o VER foi alcançado para cada propriedade micromorfológica analisada e cada manejo do solo.

Tabela 3.2 Volume elementar representativo (VER) para cada resolução analisada (1,64 μm , 5,25 μm e 35 μm) e manejo do solo (plantio convencional – PC e plantio direto – PM). Porosidade imageada (P), Número de poros por volume (NP/V), Grau de anisotropia (GA), Área de superfície por volume (AS/V), Dimensão fractal (DF), Conectividade dos poros por volume (C/V) e Tortuosidade (τ).

Sistema de manejo	Propriedade	VER (mm^3)		
		1,64 μm	5,25 μm	35 μm
PC	P	$5,0 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^1$	$1,0 \times 10^4$
	NP/V	$2,0 \times 10^{-2}$	$2,3 \times 10^0$	$1,7 \times 10^4$
	GA	$4,1 \times 10^{-2}$	-	$2,7 \times 10^4$
	AS/V	$2,0 \times 10^{-2}$	$6,4 \times 10^0$	$8,4 \times 10^3$
	DF	$2,0 \times 10^{-2}$	$9,5 \times 10^0$	$1,7 \times 10^4$
	C/V	$1,2 \times 10^{-1}$	$1,9 \times 10^1$	$5,4 \times 10^3$
	τ	$3,3 \times 10^{-2}$	-	$8,4 \times 10^3$
PM	P	$1,0 \times 10^{-1}$	$5,1 \times 10^0$	$1,2 \times 10^4$
	NP/V	$4,1 \times 10^{-2}$	$7,9 \times 10^0$	$1,2 \times 10^4$
	GA	$5,0 \times 10^{-2}$	$1,9 \times 10^1$	$2,7 \times 10^4$
	AS/V	$1,0 \times 10^{-1}$	$6,4 \times 10^0$	$1,7 \times 10^4$
	DF	$4,1 \times 10^{-2}$	$7,9 \times 10^0$	$5,4 \times 10^3$
	C/V	$1,2 \times 10^{-1}$	$1,9 \times 10^1$	$1,5 \times 10^4$
	τ	$2,6 \times 10^{-2}$	$1,4 \times 10^1$	$1,7 \times 10^4$
	DF	$4,1 \times 10^{-2}$	$7,9 \times 10^0$	$5,4 \times 10^3$

Fonte: Gaspareto et al. (2025).

Para as amostras sob PC e PM, os menores subvolumes para os quais o VER foi atingido ocorreram para as resoluções mais altas (Tabela 3.2). Isso é atribuído aos menores volumes de análise em amostras escaneadas nas maiores resoluções. Em geral, a maioria das propriedades micromorfológicas analisadas exibiu VERs distintos em diferentes resoluções, reforçando o conceito de que o VER varia com a propriedade física analisada. Na resolução mais alta (1,64 μm), geralmente os VERs mais baixos foram obtidos para imagens de amostras sob PC, com exceção de C/V e τ . Para a resolução intermediária (5,25 μm), o VER foi maior para PC apenas para P e DF, e apresentou valor de AS/V e C/V menor ou igual aos valores encontrados para PM. Na resolução mais baixa (35 μm), o VER foi maior para o solo sob PC apenas para NP/V e DF, e apresentou valor de GA menor ou igual aos valores encontrados para PM.

Quando a ideia é usar as amostras para determinar inúmeras propriedades micromorfológicas obtidas pela μTC , o maior subvolume para o qual o VER foi alcançado deve ser selecionado, independentemente da propriedade analisada. Após essa definição, todas as demais propriedades micromorfológicas devem ser calculadas a partir deste VER como será abordado no próximo item.

3.3.3 Propriedades Micromorfológicas a partir da Definição do VER

Com base no VER definido para cada resolução foi calculado o valor médio de cada propriedade micromorfológica, considerando o volume considerado ideal para cada sistema de manejo do solo (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 Valor médio e desvio padrão para cada propriedade micromorfológica estudada para o solo sob plantio convencional (PC) e plantio cultivo mínimo (PM) com base no volume elementar representativo (VER). Porosidade imageada (P), Número de poros por volume (NP/V), Grau de anisotropia (GA), Área de superfície por volume (AS/V), Dimensão fractal (DF), Conectividade dos poros por volume (C/V) e Tortuosidade (τ).

Sistema de manejo	Propriedade	Tamanho de voxel		
		1,64 μm	5,25 μm	35 μm
PC	P	2,4 $\pm$ 1,1	6,1 $\pm$ 2,5	20,2 $\pm$ 2,9
	NP/V	1,4 $\pm$ 1,1 ($\times 10^{-4}$)	2,9 $\pm$ 1,9 ($\times 10^{-5}$)	5,4 $\pm$ 1,3 ($\times 10^{-5}$)
	GA	0,89 $\pm$ 0,15	-	0,14 $\pm$ 0,05
	AS/V	1,4 $\pm$ 0,7 ($\times 10^{-2}$)	1,6 $\pm$ 0,5 ($\times 10^{-2}$)	7,0 $\pm$ 0,3 ($\times 10^{-2}$)
	DF	1,8 $\pm$ 0,3	2,2 $\pm$ 0,1	2,8 $\pm$ 0,1
	C/V	2,0 $\pm$ 1,7 ($\times 10^{-5}$)	5,1 $\pm$ 1,8 ($\times 10^{-5}$)	6,8 $\pm$ 1,1 ($\times 10^{-5}$)
	τ	1,7 $\pm$ 0,1	-	1,4 $\pm$ 0,1
PM	P	1,5 $\pm$ 1,1	4,1 $\pm$ 0,7	17,9 $\pm$ 3,2
	NP/V	2,1 $\pm$ 1,7 ($\times 10^{-5}$)	5,1 $\pm$ 1,8 ($\times 10^{-5}$)	6,8 $\pm$ 1,1 ($\times 10^{-5}$)
	GA	1,0 $\pm$ 0,0	0,37 $\pm$ 0,08	0,22 $\pm$ 0,08
	AS/V	1,4 $\pm$ 1,4 ($\times 10^{-2}$)	1,7 $\pm$ 0,4 ($\times 10^{-2}$)	5,8 $\pm$ 1,3 ($\times 10^{-2}$)
	DF	1,5 $\pm$ 0,4	2,1 $\pm$ 0,1	2,7 $\pm$ 0,1
	C/V	4,2 $\pm$ 3,3 ($\times 10^{-6}$)	1,0 $\pm$ 0,3 ($\times 10^{-6}$)	9,0 $\pm$ 4,9 ($\times 10^{-5}$)
	τ	1,2 $\pm$ 0,1	2,0 $\pm$ 0,1	1,4 $\pm$ 0,1

Fonte: Gaspareto et al. (2025).

Para P, para as amostras sob PC, observou-se que as imagens de maior resolução (35 μm para 1,64 μm) possuem um menor volume de poros acessados pela microtomografia, fazendo com que a porosidade também seja menor (Tabela 3.3). Entretanto, para NP/V, foi encontrado um valor maior para as amostras de menor volume, que são aquelas com as maiores resoluções. Assim, um maior número de poros neste caso não resultou em um valor maior de P para a melhor resolução. O GA foi maior para a imagens de amostras com maior resolução (1,64 μm), o que está associado ao maior número de poros e sua distribuição nas amostras. A AS/V foi maior para a amostra com menor resolução (35 μm). O DF aumentou para as imagens de amostra com maior volume e menor resolução. Entretanto, como estão sendo analisadas estruturas 3D, a DF para a maior resolução não faz sentido. O C/V diminuiu com a diminuição do volume da amostra analisada, apresentando o menor valor para as imagens com maior resolução (1,64 μm). No caso de τ , a rede de poros foi mais tortuosa para a maior resolução. Assim como observado para GA, não foi possível definir um VER para as imagens com resolução de 5,25 μm . Por esse motivo, os valores médios de GA e τ não foram determinados

para o solo sob PC. Para os parâmetros NP/V, AS/V e C/V, foram observados valores de desvio-padrão altos para 1,64 μm , os quais estão associados à variabilidade espacial da rede de poros, principalmente na microescala de análise.

Para o solo sob PM, a mesma tendência de diminuição P foi observada com o aumento da resolução da imagem (Tabela 3.3). Para NP/V, as imagens com maior resolução (1,64 μm) apresentaram os menores valores, contrastando com os resultados observados para PC. Para GA, o resultado obtido para a maior resolução não tem significado físico, pois representa a máxima anisotropia do sistema de poros. No entanto, os menores valores de GA foram observados para as menores resoluções. O AS/V apresentou os menores valores para as maiores resoluções, com desvio padrão alto para 1,64 μm . A DF aumentou para as menores resoluções, embora o valor para a maior resolução não seja consistente com sistemas de poros em 3D. O maior C/V foi observado para a imagem com menor resolução (35 μm), sendo o menor valor para a imagem de maior resolução (1,64 μm). No caso de τ , o menor valor foi encontrado para a imagem com maior resolução, contrastando com os resultados obtidos para PC. Considerando a variabilidade entre amostras, os maiores valores foram observados para P, NP/V, AS/V e C/V para as amostras sob PM na resolução de 1,64 μm .

3.4 DISCUSSÃO

Este estudo utilizou imagens de microtomografia de raios X de alta resolução para avaliar o VER de diferentes propriedades micromorfológicas de amostras de solo sob dois sistemas de manejo em diferentes escalas (tamanho da amostra e resolução da imagem). Uma das hipóteses abordadas foi sobre a capacidade das amostras de solo atingirem o VER independentemente do volume de amostra analisada e da resolução da imagem. Esses resultados são particularmente interessantes quando poros intra e inter-agregados são examinados. Outra hipótese avaliou como os sistemas de manejo afetam o VER. Embora outros estudos tenham examinado a influência de sistemas de manejo no VER (Hubert et al., 2007; Gaspareto et al., 2023), o presente estudo mostra como esses sistemas modificam a rede de poros em diferentes escalas (resoluções) e qual o impacto disto nas propriedades físicas no solo. Finalmente, uma terceira hipótese considerou que, mesmo quando as amostras atingem o VER, dependendo da escala de análise, os resultados das propriedades micromorfológicas determinadas podem não ser representativos.

A análise de imagens do esqueleto dos poros 3D (Figuras 3.4 e 3.5) revela que o aumento do tamanho do subvolume resulta em uma maior quantidade e extensão de poros detec-

tados, conforme observado por Wen et al. (2024). Geralmente, os poucos poros espaçados e desconectados detectados em subvolumes menores demonstram como o tamanho da caixa influencia a variabilidade da rede de poros (Yio et al., 2017). Esse efeito foi mais pronunciado na resolução mais alta (1,64 μm). Os subvolumes intermediários exibiram fusão de poros e, consequentemente, maior conectividade, semelhante ao observado por Koestel et al. (2020). Curiosamente, a distribuição de poros nos menores subvolumes seguiu um padrão de preenchimento, particularmente na resolução mais alta, especialmente para os poros intra-agregados, independentemente do tipo de manejo do solo (Přikryl; Weishauptová, 2010). As semelhanças observadas nas imagens com menor resolução (35 μm) da rede de poros entre os sistemas de manejo no maior subvolume demonstram a influência dos poros inter-agregados na porosidade do solo (Jarvis et al., 2017). No entanto, amostras sob PM (Figura 3.5) mostraram maior agrupamento de poros, provavelmente associado à atividade da fauna do solo e à manutenção dos restos vegetais das culturas agrícolas neste sistema de manejo (Wendel et al., 2022). Nas resoluções mais altas (1,64 μm e 5,25 μm), a maior quantidade de poros isolados em imagens 3D foi principalmente associada às características dos poros intra-agregados (Munkholm et al., 2012).

A determinação do VER mostrou-se dependente da escala de observação, das propriedades micromorfológicas analisadas e do tipo de manejo (Figuras 3.6-3.11). Geralmente, as resoluções mais altas (1,64 μm e 5,25 μm) necessitaram de subvolumes menores para a estabilização das propriedades físicas, enquanto a resolução mais baixa (35 μm) necessitou de volumes maiores. Para imagens de PC com resolução de 5,25 μm (Figura 3.7), τ e GA não atingiram o VER para algumas amostras. Desta forma, o VER não foi definido para essas propriedades, exigindo volumes de amostra maiores (Koestel et al., 2020; Gaspareto et al., 2023). No caso do PC, o revolvimento das camadas superficiais do solo diferencia esse sistema do PM (Kravchenko et al., 2011). Esse procedimento invasivo causa mudanças significativas na estrutura do solo, particularmente entre a profundidade de 20 a 25 cm. Entretanto, neste estudo as amostras foram coletadas aproximadamente seis meses após o revolvimento e preparo do solo, permitindo recuperação parcial de sua estrutura. Embora os efeitos do manejo tendam a ser mais invasivos nos poros maiores (Josa et al., 2013), os poros menores – acessados principalmente em resoluções de 1,64 μm e 5,25 μm – também podem exibir mudanças na continuidade e distribuição (Kravchenko et al., 2011). A reorganização da rede de poros após a quebra dos agregados e a subsequente reestruturação ao longo do tempo (sem mudanças significativas na estrutura devido ao revolvimento) explica os resultados de τ para PC (Wardak et al., 2022). Na resolução mais baixa para o solo sob PC (Figura 3.8), as propriedades depen-

dentes da continuidade dos poros (P , NP/V , C/V e τ) foram afetadas, exigindo tamanhos de caixa maiores para atingir o VER na comparação com as resoluções mais altas. Isso mostra que, embora o solo tenda a se reestruturar ao longo do tempo, as propriedades dependentes da continuidade dos poros permanecem mais afetadas (Vervoort; Cattle, 2003).

No solo sob PM (Figuras 3.9-3.11), o VER foi atingido nos menores tamanhos de caixa e resolução de 1,64 μm para todas as propriedades físicas (Figura 3.9), indicando maior recorrência de poros pequenos mais organizados e estrutura preservada na microescala (Mochizuki et al., 2007). No entanto, a variabilidade da rede de poros das amostras foi mais pronunciada sob PM, exceto para GA cuja estabilidade sugere orientação estrutural (Wang et al., 2024a). A presença de poros mais isolados na resolução mais alta explica a variabilidade observada, particularmente em sistemas que causam menos danos na estrutura do solo como o PM (Meurer et al., 2020). Para as imagens dos agregados com resolução de 5,25 μm (Figura 3.10), a maior uniformidade na variação das propriedades físicas entre amostras indica uma rede de poros mais organizada e contínua (Alaoui et al., 2011; Rian; Asayama, 2016; Liu et al., 2023), onde o aumento do tamanho da caixa demonstra que as propriedades micromorfológicas seguem padrões consistentes entre amostras. Os tamanhos de caixa maiores necessários para atingir o VER sob PM (Figura 3.11), particularmente para P , AS/V , C/V e τ estão principalmente associados a uma maior complexidade da rede de poros na camada superficial sob esse manejo, principalmente devido à atividade biológica (Wendel et al., 2022). Como o PM envolve menor perturbação do solo, ocorre à formação de uma estrutura que favorece o desenvolvimento de poros mais diversos e conectados, aumentando a complexidade da rede de poros, especialmente dos poros maiores (Budhathoki et al., 2022).

Comparando os sistemas de manejo (Tabela 3.2), as imagens com resolução mais alta (1,64 μm) do PC apresentaram VERs menores para a maioria das propriedades micromorfológicas na comparação com PM, exceto para τ . Esses resultados estão condizentes com a maior heterogeneidade esperada na rede de poros em sistemas que sofrem menores intervenções (Li et al., 2020). Nas imagens com resolução de 5,25 μm (Tabela 3.2), não foi observada nenhuma diferença clara no VER entre os manejos. Algumas propriedades como P e DF foram maiores no PC em relação ao PM, indicando maior complexidade e volume de poros. Vários estudos mostraram que o revolvimento da camada superficial do solo aumenta a quantidade de poros maiores (Wolschick et al., 2022; Budhathoki et al., 2022; Pagliai et al., 1984). No entanto, curiosamente, a reorganização da estrutura do solo sob PC contribuiu para distribuições de poros mais complexas, aumentando o VER para a DF (Schjønning et al., 2002; Hubert et al., 2007). Porém, a ausência do VER para τ e GA sob PC indica uma rede de poros

mais fragmentada (Ghanbarian et al., 2023; Gan et al., 2021). Na resolução mais baixa (35 μm , Tabela 3.2), PM apresentou VERs mais altos para P, AS/V, C/V e τ , refletindo maior complexidade da rede de poros provavelmente devido à atividade radicular, resíduos superficiais e atividade biológica (Wendel et al., 2022). Para o PC, os menores VERs para DF e NP/V sugerem que o manejo promoveu homogeneidade dos parâmetros físicos com o aumento do tamanho da caixa, associada a menor diversificação de tamanhos de poros devido à quebra e reorganização dos agregados (Dos Reis et al., 2021).

A partir da definição do VER, as propriedades micromorfológicas estudadas foram determinadas para cada manejo (Tabela 3.3). O foco não foi à comparação do efeito dos manejos na estrutura do solo, mas sim analisar como as propriedades variam em função da escala de análise. A porosidade imageada aumentou com a diminuição da resolução tanto para PM quanto para PC. Nos menores volumes amostrais (1,64 μm e 5,25 μm), foram contabilizados principalmente os poros intra-agregados, que apresentam menor contribuição para P (Munkholm et al., 2012). Os maiores números de poros (NP/V) na resolução de 1,64 μm refletem a presença de poros intra-agregados mais isolados (Tavares Filho; Tessier, 2010). Os menores valores de GA nas resoluções mais baixas, em ambos os sistemas de manejo, indicam maior isotropia dos poros inter-agregados, mostrando uma rede de poros mais homogênea na comparação com os poros intra-agregados (Peth et al., 2008). Poros mais isolados tendem a alterar os padrões de distribuição espacial (Chun et al., 2008), afetando GA em ambos os manejos. O parâmetro AS/V aumentou nas imagens com resolução de 35 μm em ambos os manejos, influenciado principalmente pela P (Munkholm et al., 2012). A DF aumentou nas imagens com resoluções mais baixas (5,25 μm e 35 μm), indicando maior complexidade dos poros, associado também a conectividade dos poros (Wang et al., 2024b; Budhathoki et al., 2022). Os valores mais altos de τ sob PC na resolução de imagem de 1,64 μm refletem poros mais isolados neste manejo (Wang et al., 2012), enquanto PM teve menos poros isolados nesta resolução. Os valores mais baixos de C/V em ambos os manejos se mostraram principalmente influenciados por τ (Gaspareto; Pires, 2024; Deepagoda et al., 2012). No geral, os resultados de P, GA e τ em 35 μm estão em concordância com o estudo de Oliveira et al. (2021) e Pires et al. (2019) para o mesmo tipo de solo, enquanto os resultados de 5,25 μm concordaram com o estudo de Pires et al. (2022). Os altos desvios-padrão para P, NP/V, AS/V e C/V sob PM (e, em menor extensão, sob PC) confirmaram a heterogeneidade da rede de poros, especialmente em altas resoluções (Meurer et al., 2020).

No entanto, após a determinação do VER foram identificadas limitações algorítmicas na quantificação de algumas propriedades micromorfológicas. Na resolução mais alta (1,64 μm), tanto as amostras sob PC quanto sob PM apresentaram valores anômalos de anisotropia ($GA > 1$) e tortuosidade ($\tau < 1$). Isso provavelmente decorre de instabilidades no algoritmo de medida que geram artefatos numéricos em subvolumes apresentando baixa conectividade ou má definição entre as fases analisadas (Iordache et al., 2010; Doube et al., 2010; Gommès et al., 2009; Roque; Costa, 2020). Além disso, enquanto estruturas 3D mostram dimensões fractais entre dois e três (Perret et al., 2003), os valores observados no presente estudo foram menores do que dois, possivelmente devido a limitações de voxelização dos microporos em volumes reduzidos (Dougan; Addison, 2001; Zou et al., 2020). Assim, abordagens complementares como a análise multifractal podem capturar melhor variações na arquitetura dos poros evitando esse tipo de limitação (Ju et al., 2021).

3.5 CONCLUSÕES

Com base nas hipóteses propostas neste estudo, verificou-se que as amostras estudadas, compostas por poros intra-agregados e inter-agregados, atingiram o VER para a maioria das propriedades micromorfológicas medidas. Observou-se que, em todas as resoluções, os subvolumes menores exibiram menores quantidades de poros, que aumentaram conforme o aumento do tamanho do subvolume. Como esperado, os menores subvolumes apresentaram flutuações mais significativas nos parâmetros micromorfológicos analisados. Para as maiores resoluções (1,64 μm e 5,25 μm), as variações nas propriedades apresentaram diferenças mais significativas entre amostras. Os valores de VER foram menores para as resoluções mais altas, indicando maior homogeneidade na rede de poros intra-agregados.

Em relação aos diferentes sistemas de manejo, o solo sob cultivo mínimo, caracterizado por menor perturbação da estrutura, apresentou no geral maiores valores de VER em comparação ao solo sob plantio convencional. Este resultado confirma a segunda hipótese desse estudo, que propôs que solos com menor perturbação física tendem a desenvolver uma rede de poros mais complexa. Além disso, notou-se que algumas propriedades micromorfológicas, mesmo após atingirem o VER, tendem a apresentar valores inconsistentes, como observado para a dimensão fractal e o grau de anisotropia em algumas amostras na resolução mais alta. Este resultado ressalta a importância de se analisar cuidadosamente os dados micromorfológicos obtidos em altas resoluções.

Este estudo mostra que o VER deve ser determinado individualmente para cada propriedade micromorfológica de interesse, como esperado. O maior VER entre as amostras deve ser usado como valor de referência. Se alguma amostra não atender ao VER, amostras maiores devem ser escaneadas para verificar se o VER pode ser alcançado em subvolumes maiores. Além disso, para o mesmo tipo de solo submetido a diferentes usos, o VER deve ser determinado para cada sistema de manejo, uma vez que os efeitos das mudanças causadas na estrutura do solo pelas práticas de manejo tendem a ser distintas.

Vale ainda ressaltar que este estudo examinou um número limitado de amostras para cada manejo do solo. Para um estudo mais completo, sugere-se um número maior de amostras, principalmente para diferentes tipos de solos e práticas de manejo diferentes das abordadas nesse estudo. No caso aqui apresentado, problemas metodológicos, como a perda de amostras durante o preparo e o acesso limitado aos sistemas de tomografia, limitaram o número de amostras escaneadas. Outro ponto interessante a se ressaltar seria a análise de um mesmo conjunto de amostras para todas as resoluções.

REFERÊNCIAS

- ABROSIMOV, K. N. et al. Otsu's algorithm in the segmentation of pore space in soils based on tomographic data. **Eurasian Soil Science**, v. 54, n. 4, p. 560-571, 2021.
- ALAOUI, A.; LIPIEC, J.; GERKE, H. H. A review of the changes in the soil pore system due to soil deformation: A hydrodynamic perspective. **Soil and Tillage Research**, v. 115, p. 1-15, 2011.
- AL-RAOUSH, R. I.; WILLSON, C. S. Extraction of physically realistic pore network properties from three-dimensional synchrotron X-ray microtomography images of unconsolidated porous media systems. **Journal of Hydrology**, v. 300, n.1-4, p. 44-64, 2005.
- 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.
- BAVEYE, P. et al. Effect of sampling volume on the measurement of soil physical properties: Simulation with X-ray tomography data. **Science and Technology**, v. 13, n. 5, p. 13775, 2022.
- BEAR, J. **Dynamics of Fluids in Porous Media**. New York, NY, USA: American Elsevier Pub. Co. 1972.
- BORGES, J.A.R. et al. X-ray microtomography analysis of representative elementary volume (REV) of soil morphological and geometrical properties. **Soil and Tillage Research**, v. 182, p. 112-122, 2018.

BUDHATHOKI, S. et al. Impact of land use and tillage practice on soil macropore characteristics inferred from X-ray computed tomography. **Catena**, v. 210, p. 105886, 2022.

CHUN, H. C.; GIMÉNEZ, D.; YOON, S. W. Morphology, lacunarity and entropy of intra-aggregate pores: Aggregate size and soil management effects. **Geoderma**, v. 146, n. 1-2, p. 83-93, 2008.

CNUDDÉ, V.; BOONE, M. N. High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: A review of the current technology and applications. **Earth-Science Reviews**, v. 123, p. 1–17, 2013.

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, 2011.

DE OLIVEIRA, J. A.; CÁSSARO, F. A.; PIRES, L. F. Quantification of the pore size distribution of a Rhodic Hapludox under different management systems with X-ray microtomography and computational simulation. **Soil and Tillage Research**, v. 209, p. 104941, 2021.

DEEPAGODA, T. C. et al. Variable pore connectivity model linking gas diffusivity and air-phase tortuosity to soil matric potential. **Vadose Zone Journal**, v. 11, n. 1, 2012.

DOS REIS, A. M. H. et al. Micromorphological analysis of soil porosity under integrated crop-livestock management systems. **Soil and Tillage Research**, v. 205, p. 104783, 2021.

DOUBE, M. et al. BoneJ: free and extensible bone image analysis in ImageJ. **Bone**, v. 47, n. 6, p. 1076-1079, 2010.

DOUGAN, L. T.; ADDISON, P. S. Estimating the cut-off in the fractal scaling of fractured concrete. **Cement and concrete research**, v. 31, n. 7, p. 1043-1048, 2001.

FERREIRA, T. R. et al. How can pore characteristics of soil aggregates from contrasting tillage systems affect their intrinsic permeability and hydraulic conductivity? **Soil and Tillage Research**, v. 230, p. 105704, 2023.

FERREIRA, T. R.; BORGES, J. A.; 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, 2015.

GAN, J. et al. Two-dimensional soil geometric tortuosity model based on porosity and particle arrangement. **Minerals**, v. 12, n. 1, p. 43, 2021.

GASPARETO, J. V. **Microtomografia na caracterização do sistema poroso do solo sob integração lavoura-pecuária**. 2018. 115 f. Dissertação (Mestrado em Física) – Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2018.

GASPARETO, J. V. et al. Representative Elementary Volume as a Function of Land Uses and Soil Processes Based on 3D Pore System Analysis. **Agriculture**, v. 13, n. 3, p. 736, 2023.

GASPARETO, J. V.; PIRES, L. F. X-ray Microtomography Analysis of Integrated Crop–Livestock Production’s Impact on Soil Pore Architecture. **AgriEngineering**, v. 6, n. 3, p. 2249–2268, 2024.

GHANBARIAN, B.; LIN, Q.; PIRES, L. F. Scale dependence of tortuosity in soils under contrasting cultivation conditions. **Soil and Tillage Research**, v. 233, p. 105788, 2023.

GOMMES, C. J. et al. Practical methods for measuring the tortuosity of porous materials from binary or gray-tone tomographic reconstructions. **AIChE Journal**, v. 55, n. 8, p. 2000–2012, 2009.

HUANG, R.; HERRING, A. L.; SHEPPARD, A. Effect of saturation and image resolution on representative elementary volume and topological quantification: An experimental study on Bentheimer sandstone using micro CT. **Transport in Porous Media**, v. 137, p. 489–518, 2021.

HUBERT, F. et al. Pore morphology changes under tillage and no-tillage practices. **Geoderma**, v. 142, n. 1–2, p. 226–236, 2007.

IORDACHE, D. A. et al. Complex computer simulations, numerical artifacts, and numerical phenomena. **International Journal of Computers Communications & Control**, v. 5, n. 5, p. 744–754, 2010.

JARVIS, N.; LARSBO, M.; KOESTEL, J. Connectivity and percolation of structural pore networks in a cultivated silt loam soil quantified by X-ray tomography. **Geoderma**, v. 287, p. 71–79, 2017.

JOSA, R. et al. Influence of tillage on soil macropore size, shape of top layer and crop development in a sub-humid environment. **Biologia**, v. 68, n. 6, p. 1099–1103, 2013.

JU, X. et al. Morphology and multifractal characteristics of soil pores and their functional implication. **Catena**, v. 196, p. 104822, 2021.

KADYROV, R. I. Multiple cubes growth algorithms for simple representative elementary volume determination on 3D binary images. **Scientific Visualization**, v. 16, n. 1, p. 124–135, 2024.

KOESTEL, J.; LARSBO, M.; JARVIS, N. Scale and REV analyses for porosity and pore connectivity measures in undisturbed soil. **Geoderma**, v. 366, p. 114206, 2020.

KRAVCHENKO, A. N. et al. Long-term differences in tillage and land use affect intra-aggregate pore heterogeneity. **Soil Science Society of America Journal**, v. 75, n. 5, p. 1658–1666, 2011.

LI, Y. et al. Residue retention promotes soil carbon accumulation in minimum tillage systems: Implications for conservation agriculture. **Science of the Total Environment**, v. 740, p. 140147, 2020.

LIU, W. et al. Representative elementary volume evaluation of coal microstructure based on CT 3D reconstruction. **Fuel**, v. 336, p. 126965, 2023.

LORENSEN, W.E.; CLINE, H.E. Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm. **Computer Graphics**, v. 21, n. 4, p. 163–169, 1987.

MEURER, K. et al. A framework for modelling soil structure dynamics induced by biological activity. **Global change biology**, v. 26, n. 10, p. 5382-5403, 2020.

MOCHIZUKI, M. J. et al. Overcoming compaction limitations on cabbage growth and yield in the transition to reduced tillage. **HortScience**, v. 42, n. 7, p. 1690-1694, 2007.

MUNKHOLM, L. J.; HECK, R. J.; DEEN, B. Soil pore characteristics assessed from X-ray micro-CT derived images and correlations to soil friability. **Geoderma**, v. 181, p. 22-29, 2012.

NIELSON, G.M.; HAMANN, B. The asymptotic decider: Resolving the ambiguity in marching cubes Proceedings Visualization. **Computer Science**, v. 91, p. 83–91, 1991.

PAGLIAI, M. et al. Effects of zero and conventional tillage on the length and irregularity of elongated pores in a clay loam soil under viticulture. **Soil and tillage research**, v. 4, n. 5, p. 433-444, 1984.

PERRET, J. S.; PRASHER, S. O.; KACIMOV, A. R. Mass fractal dimension of soil macropores using computed tomography: from the box-counting to the cube-counting algorithm. **European Journal of Soil Science**, v. 54, n. 3, p. 569-579, 2003.

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. 897-907, 2008.

PIRES, L. F. et al. 3D analysis of the soil porous architecture under long term contrasting management systems by X-ray computed tomography. **Soil and Tillage Research**, v. 191, p. 197-206, 2019.

PIRES, L. F. et al. A comparison of the differences in soil structure under long-term conservation agriculture relative to a secondary forest. **Agriculture**, v. 12, n. 11, p. 1783, 2022.

PIRES, L. F. et al. X-ray microtomography analysis of soil pore structure dynamics under wetting and drying cycles. **Geoderma**, v. 362, p. 114103, 2020.

PŘIKRYL, R.; WEISHAUPTOVÁ, Z. Hierarchical porosity of bentonite-based buffer and its modification due to increased temperature and hydration. **Applied Clay Science**, v. 47, n. 1-2, p. 163-170, 2010.

QIAN, Y. et al. Estimating the permeability of soils under different tillage practices and cropping systems: Roles of the three percolating pore radii derived from X-ray CT. **Soil and Tillage Research**, v. 235, p. 105676, 2024.

RIAN, I. M.; ASAYAMA, S. Computational Design of a nature-inspired architectural structure using the concepts of self-similar and random fractals. **Automation in Construction**, v. 66, p. 43-58, 2016.

ROQUE, W. L.; COSTA, R. R. A plugin for computing the pore/grain network tortuosity of a porous medium from 2D/3D MicroCT image. **Applied computing and geosciences**, v. 5, p. 100019, 2020.

SADEGHNEJAD, S. et al. Minkowski functional evaluation of representative elementary volume of rock microtomography images at multiple resolutions. **Advances in Water Resources**, v. 179, p. 104501, 2023.

SCHJØNNING, P. et al. Soil quality aspects of humid sandy loams as influenced by organic and conventional long-term management. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 88, n. 3, p. 195-214, 2002.

SCHNEIDER, C. A.; RASBAND, W. S.; ELICEIRI, K. W. NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. **Nature methods**, v. 9, n. 7, p. 671-675, 2012.

TAVARES FILHO, J.; TESSIER, D. Effects of different management systems on porosity of oxisols in Paraná, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 899-906, 2010.

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, 1999.

VERVOORT, R. W.; CATTLE, S. R. Linking hydraulic conductivity and tortuosity parameters to pore space geometry and pore-size distribution. **Journal of Hydrology**, v. 272, n. 1-4, p. 36-49, 2003.

WANG, S. et al. Soil Biopores and Non-Biopores Responses to Different Tillage Treatments in Sugarcane Fields in Guangxi, China. **Agronomy**, v. 14, n. 7, p. 1378, 2024a.

WANG, W. et al. Intra-aggregate pore characteristics: X-ray computed microtomography analysis. **Soil Science Society of America Journal**, v. 76, n. 4, p. 1159-1171, 2012.

WANG, Z. et al. Effects of microplastics on the pore structure and connectivity with different soil textures: Based on CT scanning. **Environmental Technology and Innovation**, v. 36, p. 103791, 2024b.

WARDAK, D. L. R. et al. Zero tillage has important consequences for soil pore architecture and hydraulic transport: A review. **Geoderma**, v. 422, p. 115927, 2022.

WEN, T. et al. Effects of representative elementary volume size on three-dimensional pore characteristics for modified granite residual soil. **Journal of Hydrology**, v. 643, p. 132006, 2024.

WENDEL, A. S. et al. Root-rhizosphere-soil interactions in biopores. **Plant and Soil**, v. 475, n. 1, p. 253-277, 2022.

WOLSCHICK, N. H. et al. The effect of soil management on pore size distribution and water infiltration. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 64, p. e21190602, 2022.

YIO, M. H. N.; WONG, H. S.; BUENFELD, N. R. Representative elementary volume (REV) of cementitious materials from three-dimensional pore structure analysis. **Cement and Concrete Research**, v. 102, p. 187-202, 2017.

ZHANG, D. et al. Pore scale study of flow in porous media: Scale dependency, REV, and statistical REV. **Geophysical Research Letters**, v. 27. n. 8, p. 1195–1198, 2000.

ZOU, G. et al. Two-dimensional SEM image-based analysis of coal porosity and its pore structure. **International Journal of Coal Science and Technology**, v. 7, p. 350-361, 2020.

4 ESTABILIDADE DA REDE DE POROS INTRA-AGREGADOS APÓS CICLOS DE UMEDECIMENTO E SECAMENTO EM UM LATOSSOLO SOB DIFERENTES MANEJOS

O trabalho deste capítulo foi publicado na revista científica *Agriculture*: Andrade, E.d.; Ferreira, T.R.; Gaspareto, J.V.; Pires, L.F. Intra-Aggregate Pore Network Stability Following Wetting-Drying Cycles in a Subtropical Oxisol Under Contrasting Managements. *Agriculture* **2025**, 15, 1725. <https://doi.org/10.3390/agriculture15161725>

Contribuições dos autores: E.d.A.: Conceitualização, Curadoria de dados; Análise formal, Investigação, Metodologia, Administração de projetos, Software, Visualização, Redação — rascunho original, Redação — revisão e edição; T.R.F.: Conceitualização, Curadoria de dados; Investigação; Metodologia, Recursos, Software, Supervisão, Validação, Visualização, Redação — rascunho original, Redação — revisão e edição J.V.G.: Investigação, Metodologia, Visualização, Redação — rascunho original; L.F.P.: Conceitualização, Aquisição de financiamento, Investigação, Metodologia, Administração de projetos, Recursos, Supervisão, Redação — rascunho original, Redação — revisão e edição.

RESUMO

Um tipo de poro fundamental para a dinâmica da água é o poro intra-agregado, que retém água essencial para o desenvolvimento das plantas e do sistema radicular, principalmente em solos de textura mais fina, como argilas. A distribuição dos poros intra-agregados também influencia a redistribuição de água. Assim, é importante estudar a dinâmica da rede de poros intra-agregados sob processos como ciclos de umedecimento e secamento (U-S). Mudanças nesses tipos de poros podem desempenhar papéis essenciais na proteção da matéria orgânica, movimento da água, atividade microbiana e estabilidade dos agregados. Até o momento, existem poucos estudos analisando o impacto dos ciclos de U-S na dinâmica dos poros intra-agregados. Este estudo visa fornecer resultados a esse respeito, analisando mudanças na arquitetura dos poros de um Latossolo subtropical sob plantio direto (PD), plantio convencional (PC) e floresta (F) após a aplicação dos ciclos U-S. Imagens tridimensionais de microtomografia de raios X de amostras de agregados de solo (2–4 mm) submetidas a 0 e 12 U-S foram analisadas. Os resultados mostraram que os ciclos de U-S não afetaram ($p > 0,05$) a porosidade imageada, número de poros, dimensão fractal, tortuosidade e conectividade dos poros para os diferentes tipos de manejo do solo. Para analisar a permeabilidade e a condutividade hidráulica do sistema de poros do solo, o poro mais volumoso (PMV) foi examinado. Não foram observadas diferenças na porosidade imageada, fração de agregado ocupada pelo PMV, conectividade, tortuosidade, raio hidráulico, permeabilidade e condutividade hidráulica entre 0 e 12 ciclos de U-S para o PMV. Comparando os tipos de manejo do solo após 12 U-S, por exemplo, as amostras F tornaram-se mais porosas do que as amostras PC e PD. Em contraste, o sistema de poros do PD teve uma dimensão fractal menor e foi mais tortuoso do que o das amostras PC e F. Os resultados mostram que, para solos altamente intemperizados, como o Latossolo Brasileiro estudado, a rede de poros intra-agregados se mostrou resistente a mudanças com os ciclos de U-S, independentemente do tipo de manejo adotado.

ABSTRACT

Intra-Aggregate Pore Network Stability Following Wetting-Drying Cycles in a Subtropical Oxisol Under Contrasting Managements

One type of pore fundamental to water dynamics is the intra-aggregate pore, which holds water vital for plant and root system development, mainly in finer-textured soils such as clays. The distribution of intra-aggregate pores also influences redistribution of water. Thus, it is important to study the dynamics of the intra-aggregate pore network under processes such as wetting and drying cycles (WDC). Changes in these pore types can play essential roles in organic matter protection, water movement, microbial activity, and aggregate stability. To date, there are few studies analyzing the impact of WDC on intra-aggregate pore dynamics. This study aims to provide results in this regard, analyzing changes in the pore architecture of a subtropical Oxisol under no-tillage (NT), conventional tillage (CT), and forest (F) after WDC application. Three-dimensional X-ray microtomography images of soil aggregate samples (2-4 mm) subjected to 0 and 12 WDC were analyzed. The results showed that WDC did not affect ($p>0.05$) the imaged porosity, number of pores, fractal dimension, tortuosity, and pore connectivity for the different soil management types. To analyze the permeability and hydraulic conductivity of the soil pore system, the most voluminous pore (MVP) was examined. No differences were observed in the imaged porosity, fraction of aggregate occupied by the MVP, connectivity, tortuosity, hydraulic radius, permeability, and hydraulic conductivity between 0 and 12 WDC for the MVP. Comparing soil management types after 12 WDCs, for example, F samples became more porous than CT and NT samples. In contrast, the pore system of NT had a lower fractal dimension and was more tortuous than that of CT and F samples. Our results show that for highly weathered soils such as the Brazilian Oxisol studied, the intra-aggregate pore network proved resistant to changes with WDC, regardless of the type of management adopted.

4.1 INTRODUÇÃO

Diferentes estratégias de manejo podem levar a mudanças significativas nas propriedades hidráulicas e estruturais do solo (Lampurlanes; Cantero-Martinez, 2006). Particularmente, a escolha de um sistema de uso da terra apropriado desempenha um papel crucial na produtividade e sustentabilidade dos sistemas agrícolas. Entre as opções disponíveis, três sistemas de uso da terra amplamente utilizados em todo o mundo são floresta sustentável (F), plantio convencional do solo (PC) e plantio direto (PD) (Kumar et al., 2013; Colombo et al., 2015). Floresta sustentável é uma prática de manejo baseada na manutenção de uma cobertura florestal densa e diversificada, cuja vegetação protege o solo da erosão, retém água e nutrientes e promove a biodiversidade do solo (Galindo et al., 2022). Estudos como Klooster (2020) e Masera (2000) destacam os benefícios das florestas na conservação do solo, restauração de áreas degradadas e mitigação das mudanças climáticas. No entanto, para fins econômicos, seus resultados são de longo prazo. O PC é caracterizado pelo uso de produtos químicos,

cos, como fertilizantes, e perturbação do solo causada por aração e gradagem (Houshyar; Grundmann, 2017). Embora amplamente utilizada na agricultura convencional, essa prática pode, às vezes, levar a problemas como compactação do solo, erosão, perda de biodiversidade e degradação dos recursos naturais (Lal, 2015). No entanto, o PC pode frequentemente ser empregado para o controle mecânico de plantas daninhas, reduzindo o uso de herbicidas. Outro manejo importante é o PD, caracterizado por produzir perturbação mínima na estrutura do solo e por manter os resíduos vegetais na camada superficial do solo. O PD é considerado uma prática agrícola sustentável, mostrando importante impacto na conservação do solo devido à melhor taxa de infiltração de água, água disponível para as plantas e diminuição do escoamento superficial (Galdos et al., 2019). No entanto, inadequações como a falta de rotação de culturas, a falta de consórcio, entre outras, pode causar um desequilíbrio na população de artrópodes e microrganismos patogênicos, uma alta incidência de pragas e doenças levando ao uso intensivo de inseticidas e fungicidas. Portanto, a seleção de um sistema de uso da terra apropriado depende das características do campo, dos objetivos do agricultor e das condições ambientais.

Vários processos podem afetar a estrutura do solo, como a influência dos ciclos de umedecimento e secamento (U-S). Esses ciclos são comuns em solos e desempenham um papel fundamental na dinâmica do solo e no funcionamento dos ecossistemas terrestres (Morrillas et al., 2013). O U-S refere-se à alternância entre períodos de aumento da umidade do solo devido à entrada de água da chuva, irrigação ou ascensão capilar, e períodos de secamento devido à perda de água por evaporação e transpiração das plantas (Shekhar et al., 2019). A água entra no solo e preenche os poros durante o umedecimento, frequentemente alterando sua estrutura. Esse processo pode levar a mudanças na disponibilidade de água e nutrientes para as plantas, na atividade biológica do solo, na distribuição da matéria orgânica e nas propriedades físicas do solo (Ma et al., 2015; Diel et al., 2019). Por outro lado, durante a secamento, a perda de água pode levar à retração do solo dependendo de sua composição mineralógica, o que afeta sua porosidade, permeabilidade e resistência à penetração das raízes (Fang et al., 2018). Compreender os efeitos do U-S na estrutura do solo é crucial para o desenvolvimento de estratégias de conservação que otimizem a irrigação e selecionem culturas mais adequadas a essas condições (Carrijo et al., 2018). Esse conhecimento é essencial para o manejo eficaz do solo em vários sistemas agrícolas. Além de influenciar a estabilidade estrutural do solo, o U-S também pode afetar as frações de carbono orgânico do solo e os processos envolvidos na renovação dos agregados do solo (Liu et al., 2024). Portanto, pesquisas focadas no impacto do U-S na estrutura do solo podem fornecer insights valiosos sobre as interações

solo-planta-água e seu papel na promoção da sustentabilidade dos sistemas agrícolas (Price et al., 2013).

Além disso, a análise de propriedades físicas é fundamental para a compreensão dos processos no sistema de poros do solo. O estudo de propriedades como porosidade, dimensão fractal, número de poros, conectividade, tortuosidade e permeabilidade pode fornecer informações importantes sobre a qualidade estrutural do solo (Reddi et al., 2000; Tseng et al., 2018; Soto-Gomez et al., 2020). Porosidade refere-se à razão entre o volume total de uma determinada amostra de solo e o volume de seus poros, e é diretamente afetada por mudanças na estrutura do solo (Piccoli et al., 2017). A dimensão fractal é usada para caracterizar a complexidade ou irregularidade de um objeto. Medir a dimensão fractal de qualquer sistema ou meio poroso é crucial, pois indica seu nível de heterogeneidade (Soto-Gomez et al., 2020). A conectividade está relacionada à continuidade dos poros no solo, o que influencia a capacidade do solo de permitir a infiltração de água, a distribuição de nutrientes e o movimento de gases (Carson et al., 2010). A tortuosidade mede a irregularidade e a sinuosidade dos poros, afetando a infiltração e a redistribuição de água pelo perfil do solo (Ghanbarian et al., 2013). Permeabilidade refere-se à capacidade do solo de transmitir água e gases, sendo influenciada principalmente pela porosidade do solo e pela tortuosidade dos poros (Lu et al., 2023). Assim, analisar como as práticas de manejo do solo afetam as propriedades morfológicas e topológicas do solo pode fornecer informações para a seleção da melhor estratégia de manejo do solo, a conservação dos recursos naturais e a otimização da produtividade agrícola.

Nesse sentido, uma técnica frequentemente usada para estudar as propriedades físicas, morfológicas e topológicas mencionadas acima é a tomografia computadorizada de raios X (TCX) (Dal Ferro et al., 2013; Kravchenko et al., 2015; Jarvis et al., 2017). A TCX permite a análise não destrutiva da estrutura interna dos materiais, o que é ideal para estudar sistemas porosos como o solo. A técnica permite a aquisição de imagens de alta qualidade com diferentes resoluções, permitindo o estudo da porosidade interagregada e intra-agregada. Os poros intra-agregados consistem principalmente de microporos, que são fundamentais para a retenção de água no solo (Hillel, 2003). Esses poros atuam retendo água que, dependendo da escala, está prontamente disponível para as plantas. Os poros intra-agregados regulam múltiplos processos do solo em microescala essenciais para as interações bioquímicas que influenciam indiretamente a macroestrutura do solo. Esses poros são indispensáveis à estabilidade física da estrutura do solo devido às interações químicas, físicas e biológicas em microescala. Processos externos, como o U-S, também podem afetar as atividades bioquímicas e microbianas que ocorrem na microescala, formando indiretamente os agregados do solo e, conseqüentemente,

o espaço poroso dentro dos agregados (Yudina; Kuzyakov, 2023). Diferenças no manejo do solo podem afetar os poros intra-agregados, o que pode influenciar processos como retenção de água, movimentação de microrganismos e condução da solução do solo (Wang et al., 2012; Ferreira et al., 2023). No entanto, poucos estudos examinaram a tomografia na escala de poros intra-agregados, particularmente no que diz respeito a como esses tipos de poros mudam durante o U-S. Portanto, compreender o papel desses tipos de poros nos processos do solo é essencial para aprimorar o conhecimento sobre retenção e movimentação de água em pequenos agregados do solo (Ma et al., 2015; Diel et al., 2019; Tang et al., 2023).

Uma série de estudos examinou os efeitos de diferentes sistemas de preparo do solo nas propriedades dos poros do solo, com foco nas mesmas áreas de Latossolo Vermelho distrófico (Oxisolo) no Brasil, mas em várias escalas de análise (Borges et al., 2019; Pires et al., 2022; Ferreira et al., 2023). O estudo de Ferreira et al. (2023) investigou especificamente os efeitos dos sistemas de manejo nos poros intra-agregados, utilizando tomografia computadorizada de raios X baseada em síncrotron para atingir a alta resolução espacial necessária. Em contraste, o presente estudo avança esta pesquisa ao investigar como o mesmo solo sob manejo contrastante é afetado pelo U-S na escala dos poros intra-agregados. Assim, este estudo testará as seguintes hipóteses: (1) as propriedades morfológicas e hidráulicas dos poros intra-agregados em um Latossolo Vermelho distrófico subtropical permanecem estruturalmente estáveis quando submetidos à U-S, e (2) diferentes sistemas de manejo do solo podem influenciar o impacto do U-S na rede de poros do solo.

4.2 MATERIAIS E MÉTODOS

4.2.1 Amostragem de Solo

Amostras indeformadas foram coletadas em 2018 da camada superficial do solo (0–10 cm) de um Latossolo Vermelho Distrófico (Dos Santos et al., 2018) localizado em sítios experimentais (25°16' S, 50°15' W, 875 m acima do nível do mar) próximo a Ponta Grossa, Brasil. O solo apresenta textura argilosa, composta por 58% de argila, 29% de silte e 13% de areia (Hillel, 2003). Para este estudo, o solo foi submetido a três manejos contrastantes de longo prazo: PD, PC e F. As amostras foram coletadas na linha de cultivo para evitar possíveis regiões compactadas devido ao tráfego agrícola (Shaheb et al., 2021). Mais informações sobre os sítios experimentais e o preparo do solo podem ser encontradas em Pires et al. (2022).

A amostragem do solo foi realizada antes do preparo do solo para a produção de novas culturas e próximo à sua capacidade de campo para evitar danos à estrutura do solo devido à

amostragem (Provenzano et al., 2016). Parte das amostras coletadas foi submetida a 12 U-S, e outras não (0 U-S). Amostras que não passaram por U-S foram analisadas em Ferreira et al. (2023) e são usadas no presente estudo como referência para avaliar os efeitos dos U-S na arquitetura dos poros intra-agregados do solo. Amostras não submetidas a U-S foram coletadas em monólitos (Ferreira et al., 2023), enquanto aquelas submetidas a 12 U-S foram coletadas em anéis volumétricos, necessários para realizar o U-S por ascensão capilar, conforme descrito na Seção 2.2. Após a amostragem, as amostras destinadas ao 12 U-S tiveram o excesso de solo fora dos anéis volumétricos aparado. Este procedimento foi feito para garantir um volume de solo semelhante ao volume interno do cilindro. Vale ressaltar que, embora os métodos de coleta tenham sido diferentes, os agregados selecionados para análise tomográfica foram muito menores (2–4 mm) do que o volume das amostras coletadas, mesmo para os anéis volumétricos. Além disso, os agregados selecionados para tomografia foram obtidos após peneiramento das porções mais internas das amostras, especialmente aquelas selecionadas nos anéis volumétricos. Este procedimento foi realizado principalmente para atenuar os efeitos das paredes durante a coleta de solo nos cilindros. Portanto, o fato de as amostras sob 0 U-S terem sido coletadas em monólitos (volumes entre 50 e 100 cm³) e 12 U-S (5 cm de altura × 5 cm de diâmetro) não influenciou os resultados obtidos.

4.2.2 Ciclos de Umedecimento-Secamento e Preparação de Amostras

Após a preparação das amostras, cinco amostras de cada manejo de solo foram submetidas à U-S. Um pano permeável foi fixado com anéis de borracha na base das amostras para permitir a permeabilidade à água, mas reter partículas de solo. No procedimento de umedecimento (U), as amostras foram saturadas por ascensão capilar. Este procedimento foi realizado lentamente adicionando cerca de 0,5 cm de água, a cada duas horas, a uma bandeja contendo as amostras até atingir um nível de água na metade da altura da amostra. Após 24 h, outros 0,5 cm de água foram adicionados até cerca de 80 a 90% da altura do cilindro. O procedimento de saturação durou aproximadamente 48 h. O procedimento de secamento (S) foi feito com as amostras colocadas em uma mesa de sucção (Eijkelkamp — modelo 08.01 SandBox) sob uma pressão (h) de 6 kPa. Esta pressão significa que um diâmetro de até aproximadamente 50 μm (equação de Young-Laplace) das amostras é drenado (Hillel, 2013). Este tamanho de poro foi escolhido por representar o tamanho que separa os poros de armazenamento dos de transmissão (Greenland, 1977). As amostras de solo foram mantidas na mesa de sucção por aproximadamente 3 a 5 dias, quando a água cessou o fluxo para fora delas (equilíbrio hidráulico

termodinâmico). Após o equilíbrio, as amostras foram submetidas novamente a um novo umedecimento.

Ao final do décimo segundo U-S, as amostras foram secas em estufa por cerca de duas semanas a 40 °C. Em seguida, foram cuidadosamente extraídas dos anéis volumétricos, desagregadas e passadas por peneiras com malhas entre 2 e 4 mm, conforme realizado para amostras sob 0 U-S (Ferreira et al., 2023). Um pequeno agregado (tamanho de aproximadamente 3 mm) foi selecionado de cada amostra de solo sob os manejos de solo contrastantes, levando em consideração 0 e 12 U-S. Assim, trinta amostras foram escaneadas por tomografia computadorizada (5 agregados $\times$ 2 níveis de U-S $\times$ 3 manejos de solo). É importante reconhecer que o alto custo das análises e os requisitos computacionais significativos para avaliar com precisão as propriedades morfológicas do solo por meio da microtomografia tornam impraticável o manuseio de um grande número de amostras. Fatores como o acesso limitado a equipamentos de tomografia, as despesas associadas à análise, a necessidade de infraestrutura computacional robusta e o grande volume de dados gerados normalmente resultam em um baixo número de amostras escaneadas em muitos estudos neste campo (Kravchenko et al., 2015; Ma et al., 2015; Jarvis et al., 2017; Fang et al., 2018; Diel et al., 2019; Galdos et al., 2019).

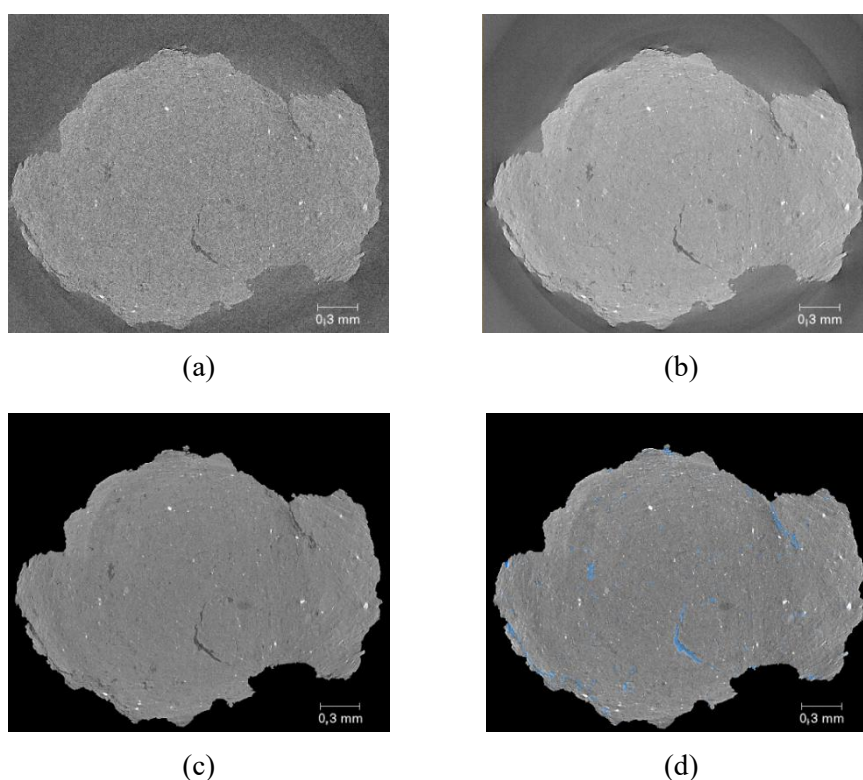
4.2.3 Tomografia Computadorizada de Raios X Baseada em Síncrotron: Aquisição e Segmentação de Imagens

Cada agregado de solo foi escaneado usando tomografia computadorizada de raios X síncrotron no Laboratório Nacional de Fontes de Luz Síncrotron (LNLS/CNPEN) usando a Linha de Luz IMX (Campinas, Brasil). Um conjunto de imagens de 16 bits (tipo raw) com uma matriz máxima de $2048 \times 2048 \times 2048$ voxels foi adquirido. Assim, cada imagem tinha um volume de $3,36 \times 3,36 \times 3,36 \text{ mm}^3$ com um comprimento de lado do voxel de 1,64 μm .

A segmentação de imagens foi baseada em aprendizado de máquina combinado com a segmentação local tradicional. As etapas utilizando aprendizado de máquina foram realizadas por meio do software Annotat3D, desenvolvido pela equipe do LNLS/CNPEN (Spina et al., 2018; Vasconcelos et al., 2018). Este software foi projetado com base em técnicas de Computação de Alto Desempenho. A segmentação da imagem foi realizada seguindo várias etapas: (1) Filtragem de imagem para suavizar ruído (filtro de média não local no modo GPU Adaptive Manifold 3D - desvio padrão espacial: 1; desvio padrão de intensidade: 0,3; janela de pesquisa: 10 voxels; vizinhança local: 5 voxels) e realçar bordas (máscara de nitidez – tamanho da borda: 4 voxels; contraste da borda: 0,7; limite de brilho: 0); (2) Segmentação do fundo utilizando ferramentas de limiarização e erosão/dilatação até atingir as sementes no fundo e

no agregado, seguida pelo método da bacia hidrográfica (Beucher e Lantuejoul, 1979); (3) Escolha dos parâmetros de aprendizado de máquina (extração de características: todos os filtros selecionados; superpixels: os valores de espaçamento e compacidade das sementes foram definidos como 3 e 10, respectivamente; e classificador: Floresta Aleatória com 200 árvores) (VasconceloS et al., 2018); (4) Declarar as fases (fundo, matriz sólida e poros); (5) Adicionar anotações para as três fases em diferentes cortes da imagem SRXCT; (6) Treinar e executar o classificador; e (7) Definir as sementes com base nos rótulos resultantes deste processo e realizar uma segmentação final da bacia hidrográfica. As etapas (1), (2) e (7) foram realizadas usando o software Avizo. A Figura 4.1 mostra um exemplo de imagens geradas a partir do procedimento de segmentação realizado. Mais informações sobre o procedimento de segmentação podem ser encontradas em Ferreira et al. (2022).

Figura 4.1 Processamento de imagens de tomografia computadorizada. (a) Imagem original ou em tons de cinza, (b) após aplicação de filtros específicos, (c) após aplicação da máscara de fundo e (d) imagem segmentada (a cor azul representa os poros).



Fonte: Andrade et al. (2025).

4.2.4 Análise Morfológica

A porosidade baseada na imagem (P) foi calculada como a razão entre o volume dos poros (V_p) e o volume total da amostra (V_t). O módulo *Volume fraction* (software Avizo 9.7)

foi empregado para determinar V_p e sólidos, que juntos fornecem V_t nas imagens segmentadas. A seguinte equação foi utilizada para calcular (P).

$$P(\%) = \left(\frac{V_p}{V_t} \right) 100 \quad (4.1)$$

O número de poros dividido pelo volume (NP/V), definido como o número total de poros não conectados e o volume de poros isolados, foi obtido usando o módulo *Label Analysis* (software Avizo). O módulo *Fractal Dimension* (software Avizo) foi empregado para caracterizar o sistema poroso dos agregados com base em sua complexidade. Este módulo fornece números entre 2 e 3, com números próximos a 2 representando superfícies bidimensionais (Soto-Gomez et al., 2020). Para uma imagem 3D, a dimensão fractal é um indicador eficaz para medir e comparar a irregularidade de uma superfície. No caso de imagens segmentadas de sistemas porosos, essa superfície pode ser entendida como as paredes dos poros. Quanto menos regular a superfície (o que caracteriza um sistema poroso mais complexo), maior a dimensão fractal (Soto-Gomez et al., 2020).

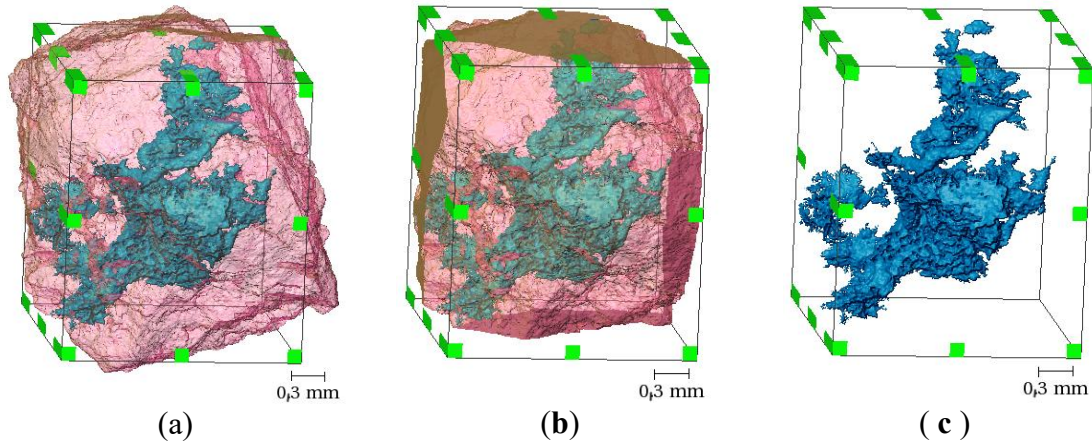
A conectividade dos poros (Número de Euler, NE) e a tortuosidade global (τ) foram determinadas aplicando os módulos *Euler 3D* e *Centroid Path Tortuosity* (software Avizo) em todo o sistema de poros de cada agregado. Em relação à tortuosidade, um poro retilíneo possui valor 1, enquanto poros tortuosos são caracterizados por valores maiores que 1 (Ferreira et al., 2023). O número de Euler indica o quão conectado um poro está a outros poros: quanto menor (mais negativo) o número de Euler, maior a conectividade (Lehmann et al., 2006).

A permeabilidade (k) foi avaliada seguindo a parametrização baseada em imagem da equação de Kozeny-Carman (IBP-KC), descrita em detalhes em Ferreira et al. (2022) e Ferreira et al. (2023). Para isso, o poro mais volumoso (PMV) de cada amostra foi selecionado usando a função *Sieve Analysis* do software Avizo (Figura 4.2). A seguinte equação foi utilizada para calcular (k).

$$k = \frac{P_{PMV} R^2}{\beta \tau_{PMV}^2} = \frac{P_{PMV} \left(\frac{V_{PMV}}{A_{PMV}} \right)^2}{\beta \tau_{PMV}^2} \quad (4.2)$$

em que P_{PMV} é a porosidade de um subvolume do agregado (Figura 4.2), que inclui o PMV, ou seja, a razão entre o volume do PMV (V_{PMV}) e o subvolume do agregado que contém o PMV (V_{sb}). Observe que para que ocorra percolação contínua, os limites ortogonais de V_{sb} devem interceptar o PMV. Isso é inerente ao método. Assim, o PMV é usado porque a permeabilidade só pode ser medida usando este método quando o poro percola os limites de V_{sb} . R é o raio hidráulico (μm), β é um fator de forma adimensional que depende da geometria do espaço poroso e τ_{PMV} é a tortuosidade do PMV.

Figura 4.2 Ilustração do processo de seleção de um subvolume de um agregado contendo o poro mais volumoso (PMV). (a) Agregado e PMV, (b) subvolume do agregado contendo o PMV, e (c) PMV (a cor azul representa o PMV e a cor marrom avermelhada o agregado).



Fonte: Andrade et al. (2025).

O fator R foi obtido a partir da razão entre o volume do PMV (V_{PMV}) e sua área de superfície interna (A_{PMV}) (Ferreira et al., 2022), que foi determinada usando a função *Label Analysis* no Avizo. Como as seções transversais obtidas eram irregulares, o fator β foi tomado como 2,5, considerando um valor de dois para o fluxo através de um pequeno tubo capilar e três para o fluxo sobre uma placa plana infinita (Brooks; Corey, 1966). A τ_{PMV} foi determinado usando a função *Centerline Tree* no software Avizo por meio da técnica de esqueletização. Os parâmetros do tubo (*slope* e *zeroVal*) foram definidos como 5 e 4, respectivamente, e o número de partes (segmentos) foi definido como 70, seguindo a mesma metodologia usada em Ferreira et al. (2022) e Ferreira et al. (2023). Este método fornece um esqueleto representando a estrutura de poros 3D e calcula a tortuosidade e o raio para cada segmento do esqueleto. Portanto, a tortuosidade de cada segmento foi obtida pela razão entre o comprimento sinuoso entre as extremidades do segmento (L_e) e o comprimento de uma reta conectando as extremidades desse segmento (L). A tortuosidade média de todos os segmentos (τ_{PMV}) foi aplicada na Equação 4.2 para estimar k para cada agregado. O critério de convergência entre o raio R e um raio hidráulico médio alternativo R' , proposto por Ferreira et al. (2023), foi adotado para identificar outliers, ou seja, amostras para as quais o método IBP-KC não foi adequado; onde R' é calculado como a razão entre o volume de cada segmento e a área superficial ($2\pi r L_e$, r representando o raio médio do segmento).

Por sua vez, a condutividade hidráulica saturada (K) foi obtida com base nos dados de permeabilidade (Zhang; Schaap, 2019) de acordo com a seguinte equação:

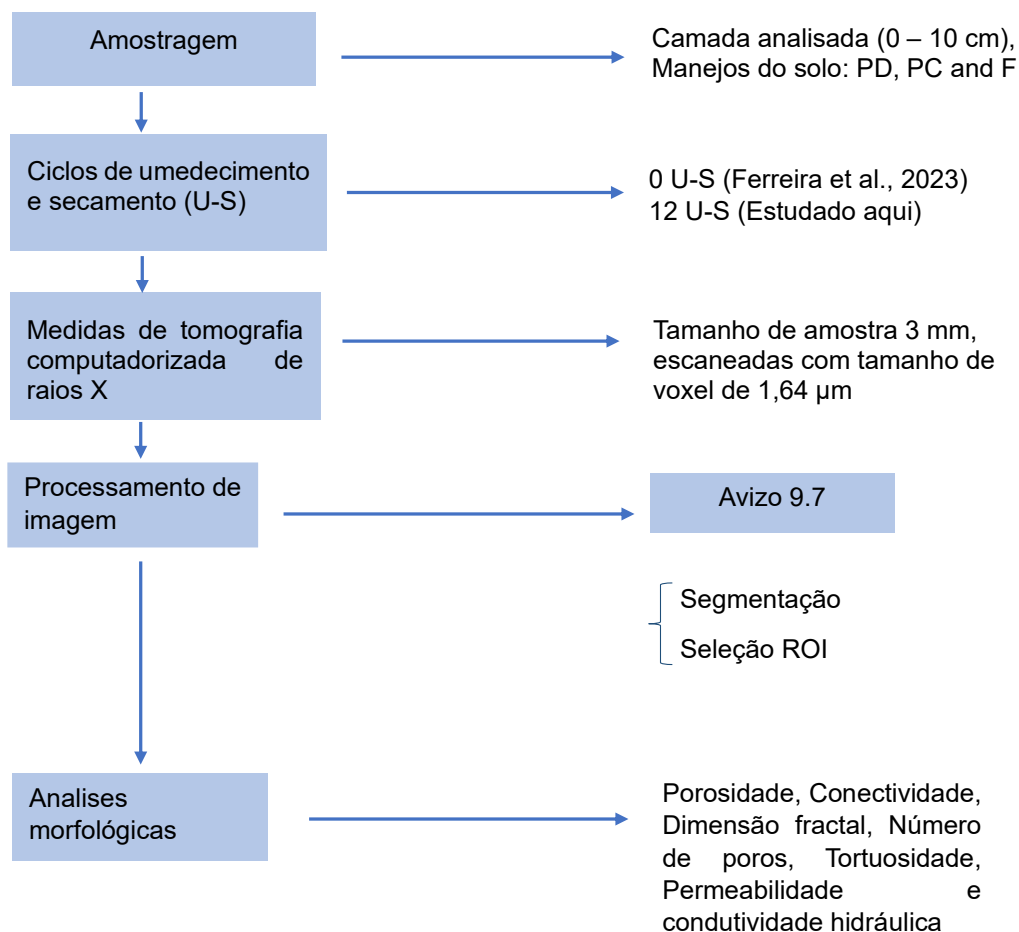
$$K = \frac{k\rho g}{\mu} \quad (4.3)$$

onde ρ , g e μ são a densidade da água ($0,998 \text{ g cm}^{-3}$), a aceleração da gravidade ($978,7 \text{ cm s}^{-2}$) e a viscosidade dinâmica da água ($1,005 \cdot 10^{-2} \text{ g cm}^{-1} \text{ s}^{-1}$ para $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$), respectivamente.

A fração do agregado ocupada pelo PMV (FA_{PMV}) foi determinada como a razão entre V_{PMV} e V_t . O Número de Euler também foi avaliado para o PMV. A variabilidade entre amostras de diferentes manejos de solo e U-S foi analisada por meio das distribuições de raio e tortuosidade do segmento.

A análise estatística foi conduzida utilizando o software PAST3 (PAleontological Statistics). Foram analisadas as diferenças entre os sistemas de manejo do solo utilizando uma ANOVA unidirecional ($p \leq 0,05$), seguida por testes post hoc de HSD de Tukey. Para comparar as diferenças entre os U-Ss, o teste t ($p \leq 0,05$) foi utilizado. Também se verificou a normalidade e a homogeneidade dos dados após o diagnóstico dos resíduos. Quando necessário, foi realizada a transformação dos dados. As médias e os desvios-padrão também foram calculados para ilustrar as diferenças entre os sistemas de manejo. Um diagrama esquemático dos procedimentos realizados nesse estudo são mostrados a seguir:

Figura 4.3 Diagrama dos procedimentos adotados para as análises. Os dados de F, PC e PD para 0 U-S foram abordados em Ferreira et al. (2023) e são usados aqui para fins de referência.



Fonte: Andrade et al. (2025).

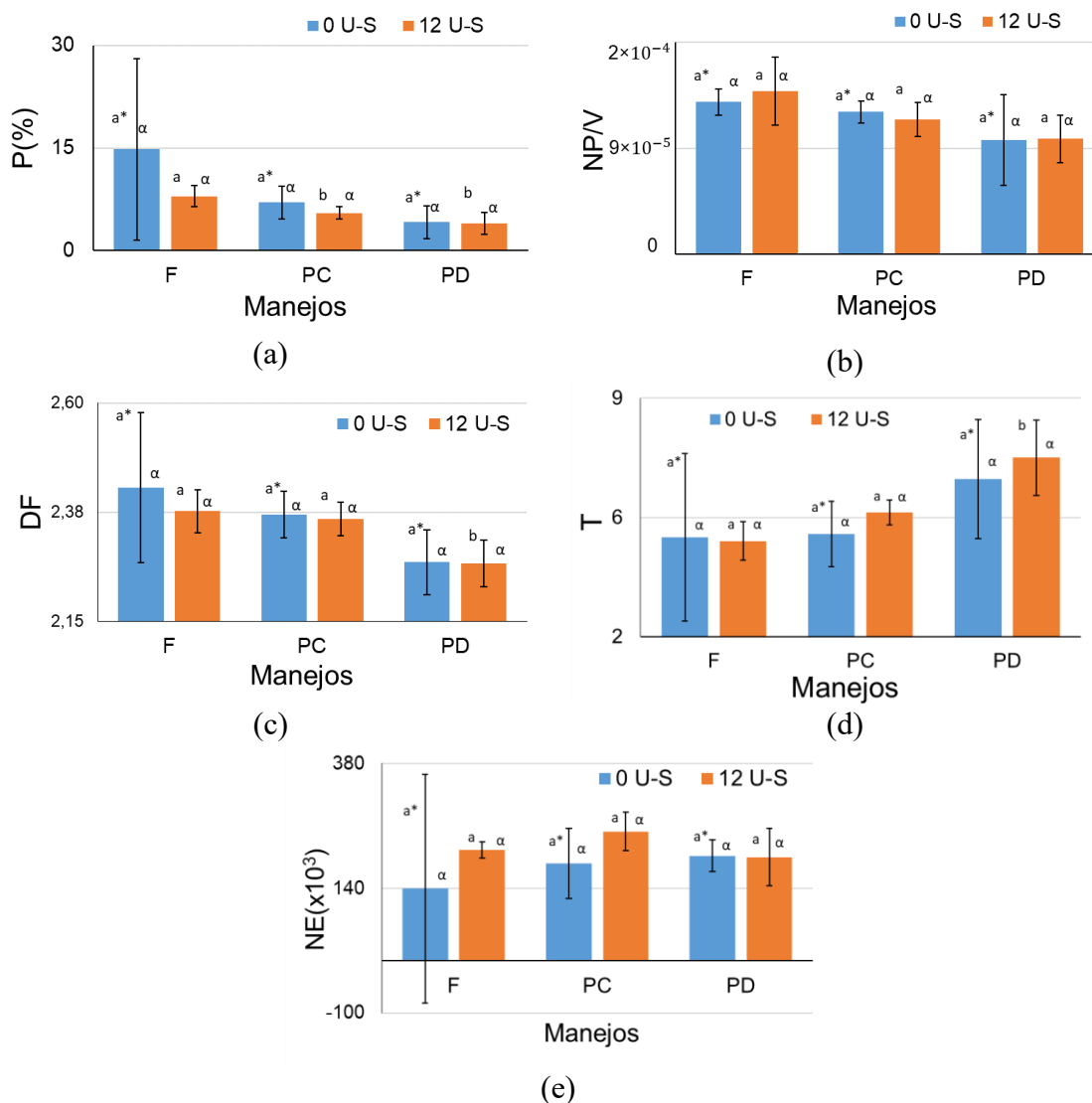
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados apresentados neste estudo visam comparar o efeito do U-S nas propriedades morfológicas e hidráulicas de agregados em um solo subtropical. Embora tenha sido aplicado análise estatística entre manejos do solo, o foco do estudo não foi comparar a arquitetura dos poros entre os manejos do solo. Uma comparação entre esses diferentes manejos do solo já foi estudada em detalhes por Ferreira et al. (2023). No entanto, foi aplicado estatísticas entre os usos antes e depois do U-S para verificar o efeito do U-S na estrutura do solo entre os usos, especialmente após 12 U-S. Nesse sentido, apenas diferenças específicas para algumas das propriedades analisadas foram observadas, conforme mostrado a seguir.

4.3.1 Análise morfológica Considerando Todos os Poros em cada Agregado

A porosidade imageada não apresentou diferenças significativas entre os manejos do solo antes da aplicação do U-S (Figura 4.4a), o que está associado principalmente à alta variabilidade de P para as amostras sob F. No entanto, 12 U-S diminuiu significativamente a P em 31% (PC) e 28% (PD) em comparação com F ($p \leq 0,05$), enquanto não foram encontradas diferenças entre PC e PD. Os valores médios de porosidade imageados mostraram a seguinte tendência após 12 U-S entre os manejos do solo ($F > PC = PD$). Curiosamente, a variabilidade de P entre as amostras foi reduzida após o umedecimento e secamento contínuos em todos os manejos do solo. Quando o efeito do U-S é analisado para cada manejo do solo, apenas pequenas variações foram observadas ($p > 0,05$). Embora as amostras sob F tenham reduzido o P em aproximadamente 46%, a alta variabilidade na porosidade por imagem, especialmente para as amostras com 0 U-S, influenciou os resultados. No caso das amostras sob PC, a redução no P foi de aproximadamente 22%, enquanto, para as amostras sob PD, foi de apenas aproximadamente 4%.

Figura 4.4 Alterações em: (a) porosidade da imagem (P), (b) número de poros dividido pelo volume (NP/V), (c) dimensão fractal (DF), (d) tortuosidade dos poros (τ) e (e) Número de Euler (NE) para as amostras submetidas a 0 e 12 ciclos de umedecimento e secamento (U-S). τ e NE são análises globais, ou seja, consideram todos os poros de cada agregado. Os diferentes manejos do solo investigados foram floresta secundária (F), plantio convencional (PC) e plantio direto (PD). Diferentes valores médios representados por letras latinas com asterisco e sem asterisco indicam diferenças significativas ($p \leq 0,05$) entre os manejos do solo para as amostras sob 0 e 12 U-S, respectivamente. Os valores médios representados por letras gregas indicam diferenças significativas ($p \leq 0,05$) entre 0 e 12 U-S dentro do mesmo manejo do solo. Dados de P e NE para 0 U-S sob F, PC e PD foram abordados em Ferreira et al. (2023) e são usados aqui para fins de referência.



Fonte: Andrade et al. (2025).

Outros autores observaram que os U-Ss frequentemente favorecem a agregação do solo alterando a P, especialmente em solos argilosos (Fernandez-Ugalde et al., 2013; Regelink et al., 2015). A ação de forças capilares dentro dos poros nos agregados também foi um fator na alteração da estrutura do solo após o U-S (Schluter et al., 2016). No presente estudo, embora não tenha havido diferenças significativas de cada fator isoladamente (tipo de manejo do solo e número de U-Ss), efeitos associados interessantes foram identificados, ou seja, amos-

tras de F sob U-S contínuos tornam-se mais porosas do que amostras de PC e PD sob as mesmas condições. O maior P para a área sob F está principalmente associado à matéria orgânica em decomposição e à ação das raízes das árvores, o que também explica a maior variabilidade de P para 0 U-S (Spaccini et al., 2001; Ferreira et al., 2023). O solo sob PD apresentou maior estabilidade em termos de variabilidade de P com U-S, o que seria esperado devido à falta de perturbação do solo e à manutenção da cobertura vegetal e resíduos de culturas na superfície do solo, o que aumenta a estabilidade dos agregados (Su et al., 2007; Galdos et al., 2019). Em relação à PC, foi encontrada menor estabilidade em agregados de solo de tamanhos variados sob este manejo, quando comparados a solos com maior teor de matéria orgânica, como PD e F, que é responsável por aumentar a coesão entre as partículas (Park; Smucker, 2005). Portanto, mesmo a hidratação lenta durante o U-S pode reduzir significativamente a porosidade do solo. Os resultados mostram, no entanto, que as amostras de PC foram resistentes às alterações de P devido ao U-S, o que foi um tanto inesperado.

As imagens do sistema poroso 3D podem ser avaliadas qualitativamente na Figura 4.5, onde as regiões brancas são atribuídas à ausência de poros; ou seja, uma maior aparência de regiões brancas através da estrutura de poros azuis representa amostras menos porosas. Embora as amostras F0-4 e F0-5 tenham sido responsáveis pelo alto desvio encontrado nos resultados de P, qualitativamente, apenas F0-4 apresentou uma diferença notável quando comparada às outras amostras de F e PC (para 0 e 12 U-S). As amostras sob PD pareceram visualmente menos porosas em comparação com PC e F, tanto para 0 quanto para 12 U-S, o que concorda com os resultados quantitativos. Em relação aos efeitos do U-S, a análise qualitativa se mostra difícil, uma vez que as amostras são bastante semelhantes entre os mesmos manejos de solo.

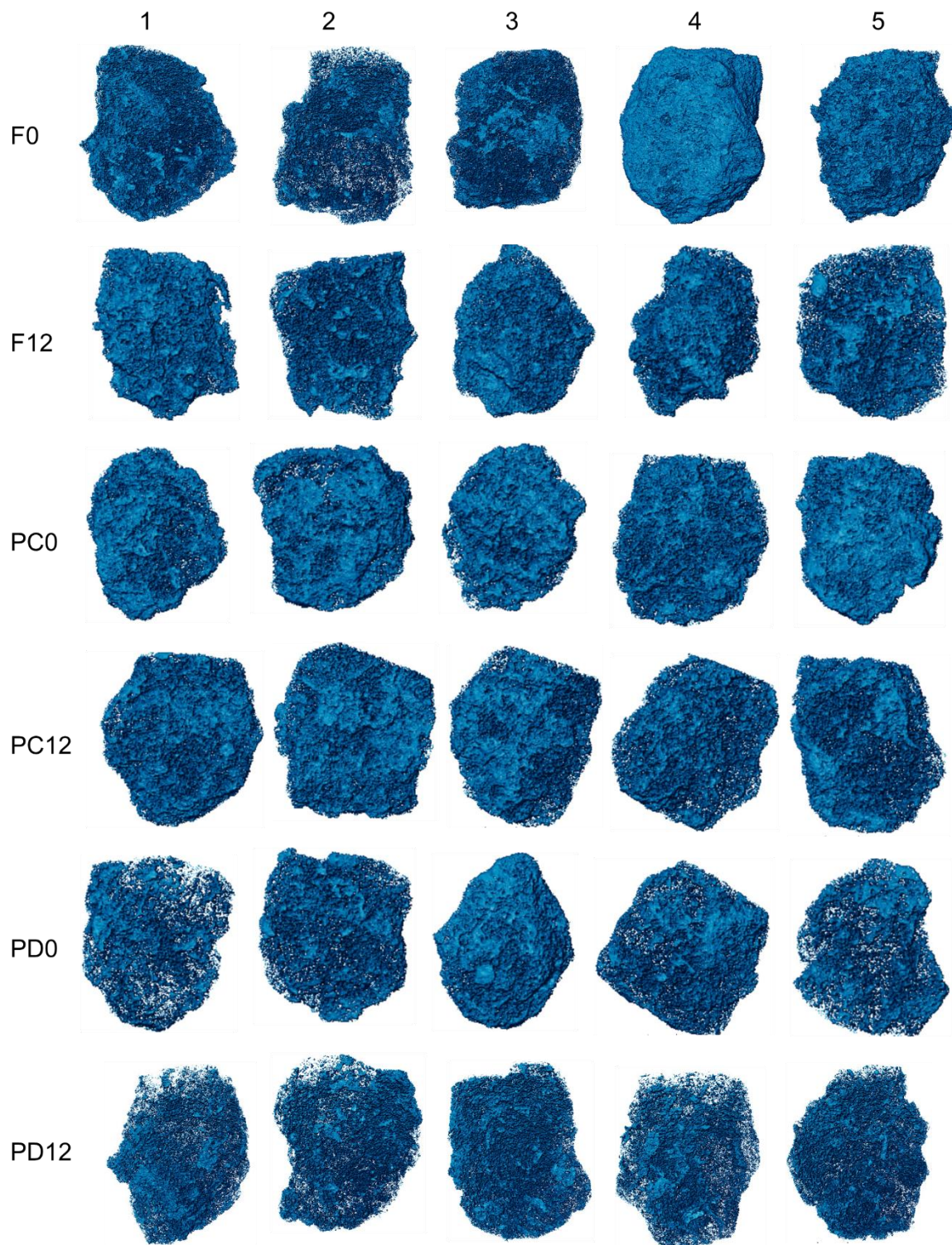
A relação NP/V seguiu o mesmo padrão do P para amostras não submetidas à U-S (Figura 4.4b). Este achado indica uma relação estreita entre P e NP/V para os diferentes manejos de solo investigados para 0 U-S. Apenas pequenas variações ($p > 0,05$) foram observados em NP/V para 0 e 12 U-S quando os manejos de solo contrastantes foram comparados (PC e PD diminuíram 6% e 25% em comparação com F após 0 U-S e diminuíram em 17% (PC) e 29% (PD) em comparação com F após 12 U-S). A análise do efeito U-S para cada um dos manejos de solo contrastantes mostra que nenhum apresentou diferenças significativas ($p \leq 0,05$). As amostras sob F e PD aumentaram em 7% e 1% respectivamente, enquanto as amostras sob PC diminuíram em 6%. Para F, o aumento em NP/V é uma indicação da presença de poros menores e mais isolados após a ação do U-S (Ma et al., 2015). No caso do PC, a diminuição em P foi acompanhada por uma diminuição em NP/V. Para PD, os agregados apresentaram praticamente os mesmos valores de NP/V após o U-S, mostrando que NP/V,

assim como P, não é muito sensível a mudanças após 12 U-S nessa faixa de tamanho de poro (R entre 0,5 e 25 μm). Outros autores demonstraram que o U-S pode causar mudanças no número de poros isolados, mas geralmente, quando poros maiores são analisados (Wen et al., 2022; Guo et al., 2023). Assim, os resultados mostram que na escala de poros intra-agregado, NP/V não é influenciado pelo U-S em cada manejo do solo, nem entre os manejos do solo associados ao U-S.

A DF provou ser uma propriedade essencial para verificar a complexidade e heterogeneidade de sistemas porosos (Soto-Gomez et al., 2020; De Oliveira et al., 2022). Os valores de DF identificados no presente estudo estão alinhados com os achados da literatura científica referentes à análise tridimensional de poros do solo (Munoz et al., 2014; Zhang et al., 2018; Gaspareto et al., 2023). Ao comparar diferentes sistemas de manejo, as amostras que apresentaram os maiores valores de DF também apresentaram os valores de P, indicando uma relação entre essas duas propriedades micromorfológicas, conforme observado em outros estudos (Dal Ferro et al., 2013; Zhang et al., 2018; Ferreira et al., 2019). Os maiores valores de DF em áreas sob F estão ligados à complexa rede de raízes, buracos de minhoca e à redução da interferência humana, o que contribui para uma estrutura de poros mais complexa e heterogênea (Spaccini et al., 2001; Soto-Gomez et al., 2020).

O DF não apresentou diferenças significativas ($p > 0,05$) entre os manejos de solo quando as amostras não foram submetidas ao U-S (Figura 4.4c). As amostras sob PC e PD apresentaram valores de DF 2% e 6% menores que F, considerando 0 U-S ($p > 0,05$ em ambos os casos). Para 12 U-S, as diferenças foram de 1% (PC) e 5% (PD) ($p \leq 0,05$ no último). Quando se analisa o efeito do U-S para cada um dos manejos do solo, observam-se apenas pequenas variações para as amostras submetidas a ciclos contínuos de umedecimento e secamento ($p > 0,05$). Essa descoberta significa que a aplicação de U-S por si só não influencia a complexidade do sistema de poros do solo de cada manejo do solo, na escala de poros intra-agregados. No entanto, efeitos associados foram identificados, ou seja, o sistema de poros de amostras PD sob U-S contínuo torna-se menos complexo do que o de amostras PC e F sob as mesmas condições. Comparado a F, a justificativa pode ser que PD tem menos heterogeneidade natural do que F, possivelmente tendo menos modificações/ramificações no caminho do fluido na escala intra-agregado. Comparado a PC, PD sofre menos perturbação, ou seja, a quebra de agregados durante o preparo do solo em PC pode estar associada a uma maior complexidade do sistema de poros, particularmente confirmada pela diferença significativa entre esses dois manejos de solo após 12 U-S (De Oliveira et al., 2022).

Figura 4.5 Representações 3D do sistema poroso (azul) de amostras agregados (aproximadamente 3 mm) de cada manejo de solo: Floresta (F), plantio convencional (PC) e plantio direto (PD), sob 0 e 12 U-S (ciclos de umedecimento e secamento). Amostras de 0 e 12 U-S dentro do mesmo manejo de solo não são as mesmas.



Fonte: Andrade et al. (2025).

Amostras de 0 U-S não apresentaram diferenças ($p > 0,05$) no τ dos poros para os diferentes manejos do solo (Figura 4.4d). Este achado está relacionado principalmente à alta variabilidade de τ sob F, semelhante ao resultado de P. Por outro lado, a aplicação de 12 U-S afete

tou τ quando os manejos contrastantes do solo foram analisados. Por exemplo, diferenças significativas foram observadas entre F e PD e entre PC e PD ($p \leq 0,05$). Para amostras sob 0 U-S, PC e PD apresentaram valores para τ de 2% e 35% maiores em comparação com F ($p > 0,05$ em ambos os casos). Para 12 U-S, essas diferenças foram ainda mais consideráveis, sendo 17% (PC) e 51% (PD) em comparação com F ($p \leq 0,05$ neste último). A menor variabilidade causada pelo U-S, ou seja, menores desvios entre amostras sob 12 U-S, certamente contribuiu para revelar diferenças significativas. Quando o efeito do U-S no τ dos poros é analisado para cada um dos manejos do solo, apenas pequenas variações foram observadas ($p > 0,05$) (Figura 4.4d). Com a aplicação do U-S, a tortuosidade dos poros diminuiu em aproximadamente 2% para amostras sob F, enquanto para amostras sob PC e PD, aumentou em aproximadamente 13% e 10%, respectivamente. Portanto, embora não tenha havido diferenças significativas para cada fator isoladamente (manejo do solo e número de U-S), efeitos associados foram observados, ou seja, o sistema de poros das amostras de PD sob U-S contínuo tornou-se mais tortuoso do que o das amostras de PC e F sob as mesmas condições.

Curiosamente, parece haver uma correlação oposta entre DF ($F > PC > PD$) e τ ($F < PC < PD$), tanto para 0 quanto para 12 U-S, ou seja, poros mais tortuosos parecem estar associados a uma menor complexidade. Poucos estudos comparam DF e τ , que não apresentam uma relação linear. Quando comparados, P e DF seguem o mesmo comportamento; ou seja, DF aumenta com o aumento de P (Lee; Lee, 2013). Por outro lado, P e τ apresentam uma relação inversa; ou seja, quando P aumenta, τ diminui (Matyka; Koza, 2012; Zhang et al., 2021). Embora a relação inversa entre DF e τ encontrada no estudo seja contraintuitiva, vale ressaltar que uma estrutura mais complexa (DF maior) significa maior preenchimento de um determinado espaço por esta estrutura (Duhour et al., 2009). Além disso, ramos tortuosos altamente complexos podem formar esta estrutura.

O cálculo de tortuosidade leva em consideração o centro de massa da imagem. Como resultado, mesmo para uma estrutura de poros caracterizada como complexa, poros tortuosos podem apresentar menor tortuosidade quando avaliados como um todo. É importante notar que a DF calculada usando o método de contagem de caixas também avalia a estrutura globalmente. A DF pode ser entendida como uma medida de quanto espaço uma estrutura ocupa à medida que é examinada em escalas progressivamente menores (Scott et al., 1992). Portanto, os valores de DF obtidos por meio do método de contagem de caixas podem não ser os mais eficazes para identificar complexidades em partes específicas da estrutura analisada. Ferramentas como a análise multifractal podem produzir resultados mais perspicazes para comparar a relação entre propriedades como DF e τ (De Oliveira et al., 2022).

Além disso, os resultados de τ mais semelhantes para os agregados sob F com 0 e 12 U-S indicam uma maior estabilidade estrutural às mudanças na tortuosidade dos poros no manejo do solo com um sistema poroso mais complexo, dado seu maior DF (Figura 4.4c). Em relação ao PC, os resultados de τ diferiram daqueles encontrados na literatura, em que a tortuosidade foi maior para PC do que em solos com maior quantidade de matéria orgânica (Peth et al., 2008). Para PD, o teor orgânico tipicamente maior pode favorecer mudanças no volume dos agregados devido à coalescência afetando os menores poros (Leij et al., 2002), o que pode favorecer um aumento na tortuosidade. Vale ressaltar também que os valores de τ encontrados aqui (Figura 4.4d), para poros intra-agregados, são maiores do que aqueles encontrados em estudos anteriores das mesmas áreas de solo quando as amostras contêm poros inter-agregados (Borges et al., 2019; Pires et al., 2022). Deve-se notar, porém, que esta não é uma comparação adequada, visto que os estudos referenciados analisaram a tortuosidade com métodos diferentes (Ferreira et al., 2023). Por outro lado, aplicando o mesmo método aqui utilizado para os poros intra-agregados de outro solo, esses autores encontraram valores variando em uma faixa semelhante aos resultados encontrados aqui.

O NE não foi significativamente afetado por manejos contrastantes do solo para 0 e 12 U-S, nem pelo U-S para cada um dos manejos contrastantes do solo ($p > 0,05$) (Figura 4.4e). Novamente, a grande variabilidade nos valores de NE, especialmente para amostras de F com 0 U-S, pode explicar a falta de diferença significativa entre os manejos do solo. Entre as amostras não submetidas a U-S, embora não tenham sido observadas diferenças significativas, o menor NE médio (maior conectividade) foi encontrado para F, seguida por PC (26%) e PD (31%). Por outro lado, a aplicação de 12 U-S fez com que amostras sob PD apresentassem a menor NE (maior conectividade), seguida por F (6%) e PC (17%). O 12 U-S aumentou NE (diminuiu a conectividade) para amostras sob F (54%) e PC (33%), enquanto manteve NE estável para PD (aumento de 1%). Durante o umedecimento e a secamento, a água pode carregar partículas soltas ou agregados de subunidades do processo de decomposição ou homogeneização do solo e levar ao entupimento dos poros, o que pode explicar o aumento do NE (diminuição da conectividade) para PC entre 0 e 12 U-S. Isso mostra que a ausência de preparo do solo, a manutenção da cobertura vegetal, o conteúdo de matéria orgânica na superfície do solo e o sistema radicular da planta sob U-S contínuo em PD tendem a promover uma conectividade intra-agregado semelhante em comparação com F e uma estrutura de poros intra-agregados ligeiramente mais conectada em comparação com PC, favorecendo assim a infiltração de água e o transporte de nutrientes (Udawatta et al., 2006; Kravchenko et al., 2015). Em última análise, ao contrário do que seria esperado (Ma et al., 2005; Zhang et al., 2008), o 12 U-S

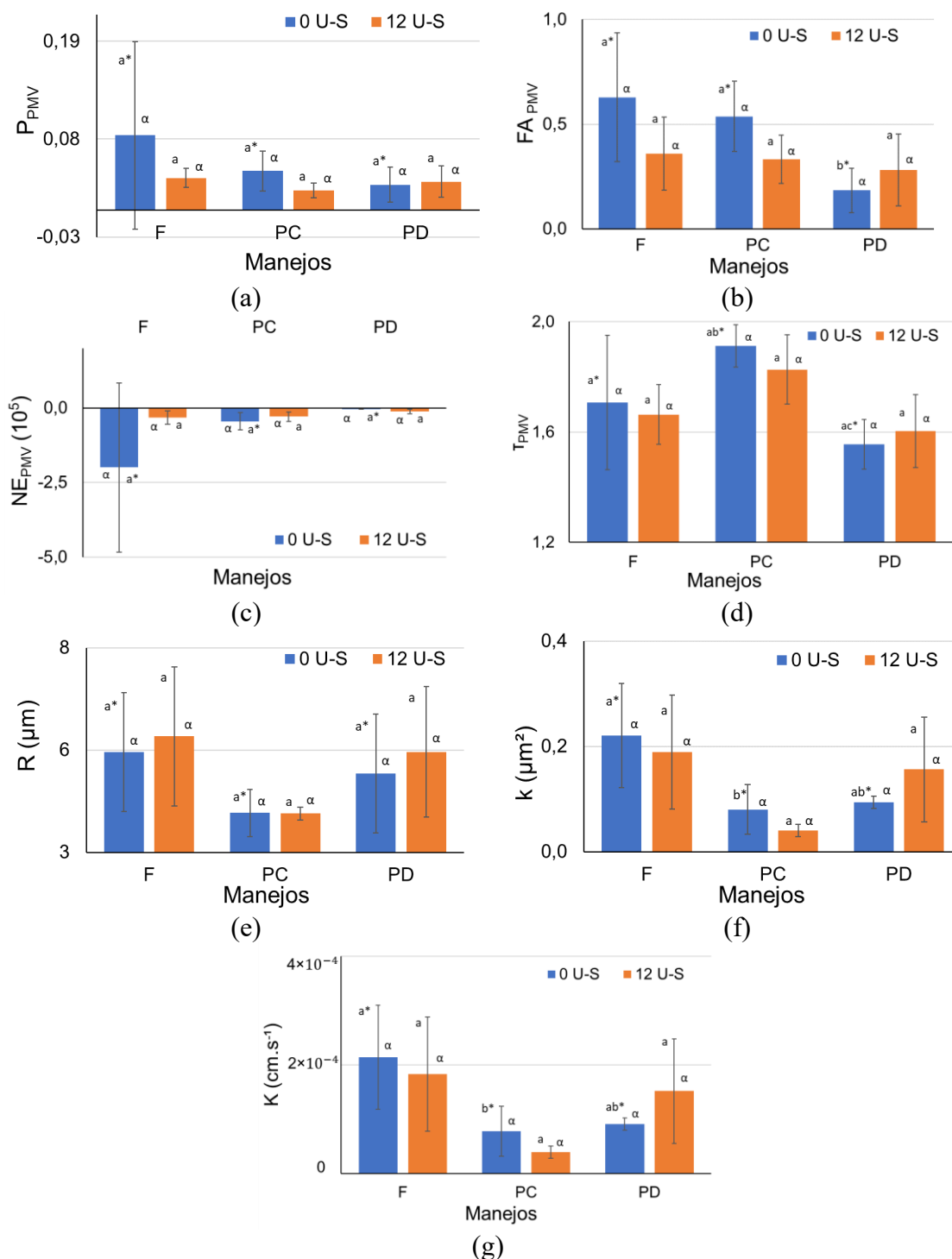
analisados aqui não favoreceu novas conexões entre poros que refletiriam em um aumento do NE para todos os manejos do solo.

4.3.2 Permeabilidade e Condutividade Hidráulica Considerando o Poro Mais Volumoso (PMV) em cada Agregado

O U-S não influenciou significativamente o P_{PMV} entre os manejos do solo para 0 U-S e 12 U-S ($p > 0,05$). Conforme discutido em Ferreira et al. (2023), o P_{PMV} (Figura 4.6a) seguiu o mesmo comportamento da porosidade do agregado, considerando os diferentes manejos do solo sob 0 U-S, $F > PC > PD$ (Figura 4.4a). Por outro lado, quando as amostras foram submetidas a 12 U-S, houve um maior valor de P_{PMV} para PD em comparação a PC ($p > 0,05$). Ao comparar os ciclos entre os mesmos manejos de solo, não foram encontradas diferenças significativas ($p > 0,05$), embora tenha havido uma redução na P_{PMV} de 57% em F e 50% em PC e um aumento de 10% em PD. Curiosamente, de acordo com Pires et al. (2019) e Ferreira et al. (2023), o teor de argila entre os manejos de solo contrastantes no presente estudo variou em um intervalo estreito (53–61%), seguindo a sequência: $PC > F > PD$. Portanto, nossa hipótese é que PC e F foram mais propensos ao transporte de material mais fino (partículas de argila) durante o umedecimento e secamento do solo, levando a uma redução da P_{PMV} devido ao entupimento dos poros na escala de poros intra-agregado (Tseng et al., 2018).

Em relação a FA_{PMV} (Figura 4.6b), para as amostras de 0 U-S, PD diferiu significativamente de F e PC ($p \leq 0,05$) (Ferreira et al., 2023). Para 12 amostras de U-S, no entanto, não foram encontradas diferenças significativas em FA_{PMV} em relação aos manejos do solo, ou seja, esse parâmetro tornou-se mais similar entre os manejos do solo após 12 U-S. Os ciclos não afetaram FA_{PMV} dentro do mesmo manejo do solo ($p > 0,05$). Este resultado apoia a hipótese da estabilidade estrutural do sistema poroso na escala intra-agregada, particularmente o PMV. Uma variação significativa no FA_{PMV} indicaria uma mudança no tamanho do PMV em relação ao agregado. Notavelmente, o PMV é o poro dominante para condução de água dentro do agregado (Ferreira et al., 2023). Além disso, o fato de não haver diferença entre FA_{PMV} significa que não há diferenças nas contribuições do PMV para cada manejo após os ciclos, mitigando assim possíveis discrepâncias que poderiam ser encontradas ao usar o PMV para estimar a permeabilidade hidráulica. No entanto, semelhante ao P_{PMV} , houve uma tendência de queda no FA_{PMV} quando os ciclos foram aplicados para F e PC de 33% e 40%, respectivamente, e um aumento para PD de 33%.

Figura 4.6 Alterações em: (a) porosidade da imagem do poro mais volumoso (P_{PMV}), (b) fração do agregado ocupada pelo PMV (FA_{PMV}), (c) Número de Euler do poro mais volumoso (NE_{PMV}), (d) tortuosidade do PMV determinada por uma análise local baseada na esqueletização do PMV (τ_{PMV}), (e) raio hidráulico (R) do PMV, (f) permeabilidade (k) calculada para o PMV e (g) condutividade hidráulica (K) calculada para o PMV para as amostras submetidas a 0 e 12 ciclos de umedecimento e secamento (U-S). Os diferentes manejos de solo investigados foram floresta secundária (F), plantio convencional (PC) e plantio direto (PD). Diferentes valores médios representados por letras latinas com asterisco e sem asterisco indicam diferenças significativas ($p \leq 0,05$) entre as práticas de manejo para as amostras sob 0 e 12 U-S. Os valores médios representados por letras gregas diferentes indicam diferenças significativas ($p \leq 0,05$) entre 0 e 12 U-S dentro da mesma prática de gestão. Dados de P_{PMV} , FA_{PMV} , τ_{PMV} , R , k e K para 0 U-S sob F, PC e PD foram abordados em Ferreira et al. (2023) e são usados aqui para fins de referência.



Fonte: Andrade et al. (2025).

O número de Euler do PMV (NE_{PMV}) não apresentou diferenças significativas entre os ciclos e manejos do solo ($p > 0,05$), mas seguiu a sequência $PD > PC > F$ para 0 U-S e 12 U-S, onde quanto maior o NE_{PMV} , menor a conectividade PMV (Figura 4.6c). Embora não significativo, os ciclos proporcionaram um aumento de NE_{PMV} de 84% e 35% (diminuição da conectividade) em F e PC, respectivamente, e uma diminuição de 68% (aumento da conectividade) em PD, reproduzindo o mesmo padrão observado para NE considerando todos os poros (Figura 4.4e). Foi observada uma relação direta entre a porosidade (P e P_{PMV}) e a conectividade dos poros, ou seja, a diminuição em P e P_{PMV} ao comparar 0 e 12 U-S foi seguida por uma redução da conectividade dos poros (aumento de NE e NE_{PMV}) para F e PC; e vice-versa para PD (Figuras 4.4a,e e 4.6a,c). Essa descoberta indica que, nesse nível de análise, a conectividade dos poros está vinculada a mudanças na porosidade (Jarvis et al., 2017; An et al., 2022; Ferreira et al., 2023). Vale ressaltar que o PMV pode ser originado da junção de vários outros poros menores (Zhang et al., 2020), que pode ser reduzido quando o agregado é submetido à U-S, resultando em poros mais isolados e menos conectados (Wen et al., 2022). Conforme observado aqui, isso corrobora que a U-S pode reduzir a fração de poros de condução que afeta a conectividade e a tortuosidade dos poros (Messing; Jarvis, 1993).

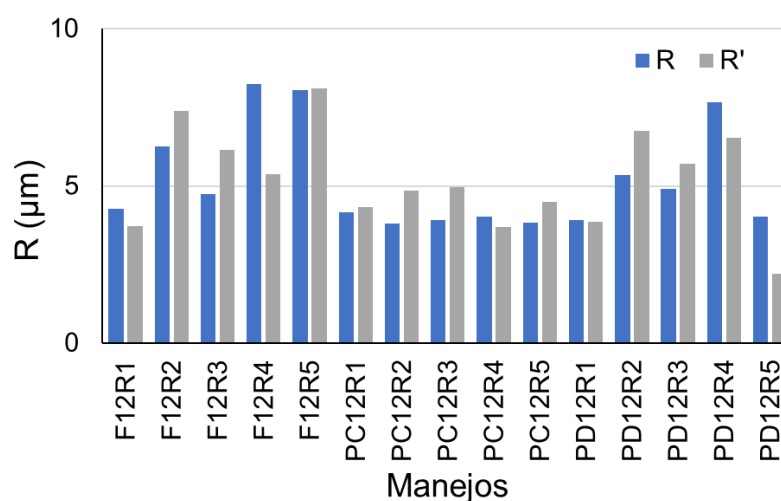
Para a determinação da permeabilidade, consideramos a tortuosidade do PMV (τ_{PMV}) calculada com base em uma análise local usando o procedimento de esqueletização (Equação (4.2)). Esta decisão seguiu o mesmo raciocínio adotado em Ferreira et al. (2023) para permitir uma comparação adequada considerando os efeitos do U-S em amostras de diferentes manejos de solo. O τ_{PMV} baseado na análise local, representado na Figura 4.6d, seguiu o comportamento $PC > F > PD$ para 0 e 12 U-S. Amostras sob PD mostraram uma diferença significativa em relação ao PC ($p \leq 0,05$) apenas para 0 U-S, discutido anteriormente em Ferreira et al. (2023). Para 12 U-S, não foram encontradas diferenças significativas quanto ao τ_{PMV} entre os manejos do solo; ou seja, similarmente ao FA_{PMV} , este parâmetro tornou-se mais similar entre os manejos do solo após 12 U-S. Com a aplicação dos ciclos, o τ_{PMV} foi reduzido ($p > 0,05$) em F e PC em apenas 3% e 4%, respectivamente, e aumentou em 2% para PD.

Entretanto, o comportamento de τ_{PMV} (Figura 4.6d) difere daquele observado para τ (Figura 4.4d). Ou seja, enquanto PD apresentou os maiores valores de τ , PC apresentou os maiores valores de τ_{PMV} . Portanto, ao analisar o maior poro em cada agregado, que é o poro que domina o fluxo de fluido nessa escala, descobriu-se que PC apresenta um sistema de poros mais tortuoso, o que é uma informação crucial para avaliar a permeabilidade e a condutividade hidráulica. Em relação aos efeitos do U-S, pode-se dizer a partir das análises de tortuosidade que F é estruturalmente mais estável a mudanças de τ e τ_{PMV} , uma vez que a sobreposi-

ção em desvios é mais claramente definida para F do que para PC e PD (Figura 4.6d). No entanto, foi considerado que o τ_{PMV} é uma abordagem mais detalhada para considerar as variações locais da tortuosidade.

O raio hidráulico do PMV (R) não apresentou diferenças significativas ($p > 0,05$) entre os manejos do solo e o U-S (Figura 4.6e). A faixa de R avaliada para todos os manejos do solo se enquadra na classificação de poros de armazenamento (ou seja, R entre 0,5 e 25 μm) (Greenland, 1977), conforme corroborado pela distribuição de frequência do raio médio do segmento do PMV (Figura 4.8). Os poros de armazenamento retêm água contra a gravidade, de modo a não drenar facilmente, e contribuem para o fornecimento de água às plantas (Pagliani et al., 2004; Lal, 2004). Na escala intra-agregada, embora não tenham sido observadas diferenças significativas, o PC apresentou R menor e, portanto, poros que retêm água mais fortemente na escala considerada do que os outros manejos do solo. Ao analisar o efeito dos ciclos dentro do mesmo manejo do solo, apenas pequenas diferenças ($p > 0,05$) foram observados entre os valores de R. Houve aumentos de 7% e 11% para as amostras sob F e PD, respectivamente, de 0 a 12 U-S, enquanto permaneceu estável para PC. É importante notar que o critério para identificar amostras outliers envolveu o cálculo da razão entre R e R' (Ferreira et al., 2023). Se essa razão ultrapassasse 35%, a amostra era excluída da análise. Como resultado, apenas as amostras F12-R4 e PD12-R5 foram desconsideradas na avaliação de k e K devido à divergência significativa entre R e R' (Figura 4.7). Este valor de corte foi escolhido com base em critérios estatísticos que levaram em consideração a variabilidade da rede de poros nas amostras analisadas.

Figura 4.7 Comparação entre os raios hidráulicos R e R' para amostras sob floresta (F), plantio convencional (PC) e plantio direto (PD), e entre amostras sob 12 U-S. Um valor equivalente pode ser encontrado em Ferreira et al. (2023) para amostras sob 0 U-S e o mesmo manejo do solo.



Fonte: Andrade et al. (2025).

O k do PMV (Figura 4.6f) apresentou um padrão semelhante entre R e P_{PMV} e oposto a τ_{PMV} , ou seja, com $F > PD > PC$, como esperado com base na Equação (4.2). Aqui, deve-se enfatizar que se a análise global de tortuosidade (τ) considerando todos os poros de cada agregado da Figura 4.4d fosse usada, a análise de permeabilidade seria tendenciosa. Vale ressaltar que o método escolhido para a quantificação se deve entre outros fatores ao menor custo computacional, no entanto, outros modelos que são amplamente usados e consolidados poderiam ser utilizados como o método de Lattice Boltzmann (Camargo et al., 2012) ou os métodos de Elementos finitos e Volumes finitos (Andrä et al., 2013; Mostaghimi et al., 2013) entre outros que podem ser melhor aplicados para cada caso de interesse. Como resultado, é necessário cuidado para evitar a interpretação errônea dos dados. Embora simulações de dinâmica de fluidos computacional possam ser empregadas para essa avaliação, elas tendem a selecionar um caminho contínuo através do volume imageado, que normalmente corresponde ao poro dominante (Gerke; Karsanina, 2023). É importante notar que se as proporções de fluxo e volume de massa (FA_{PMV}) forem significativamente diferentes do PMV, isso pode resultar em comparações imprecisas. Entretanto, isso não foi um problema no presente estudo, conforme ilustrado na Figura 4.6b. Além disso, deve-se observar que esse método pode, às vezes, superestimar a permeabilidade em comparação com outras técnicas (Elhakim, 2016; Ferreira et al., 2022); entretanto, tal comparação não era o objetivo de nossa pesquisa.

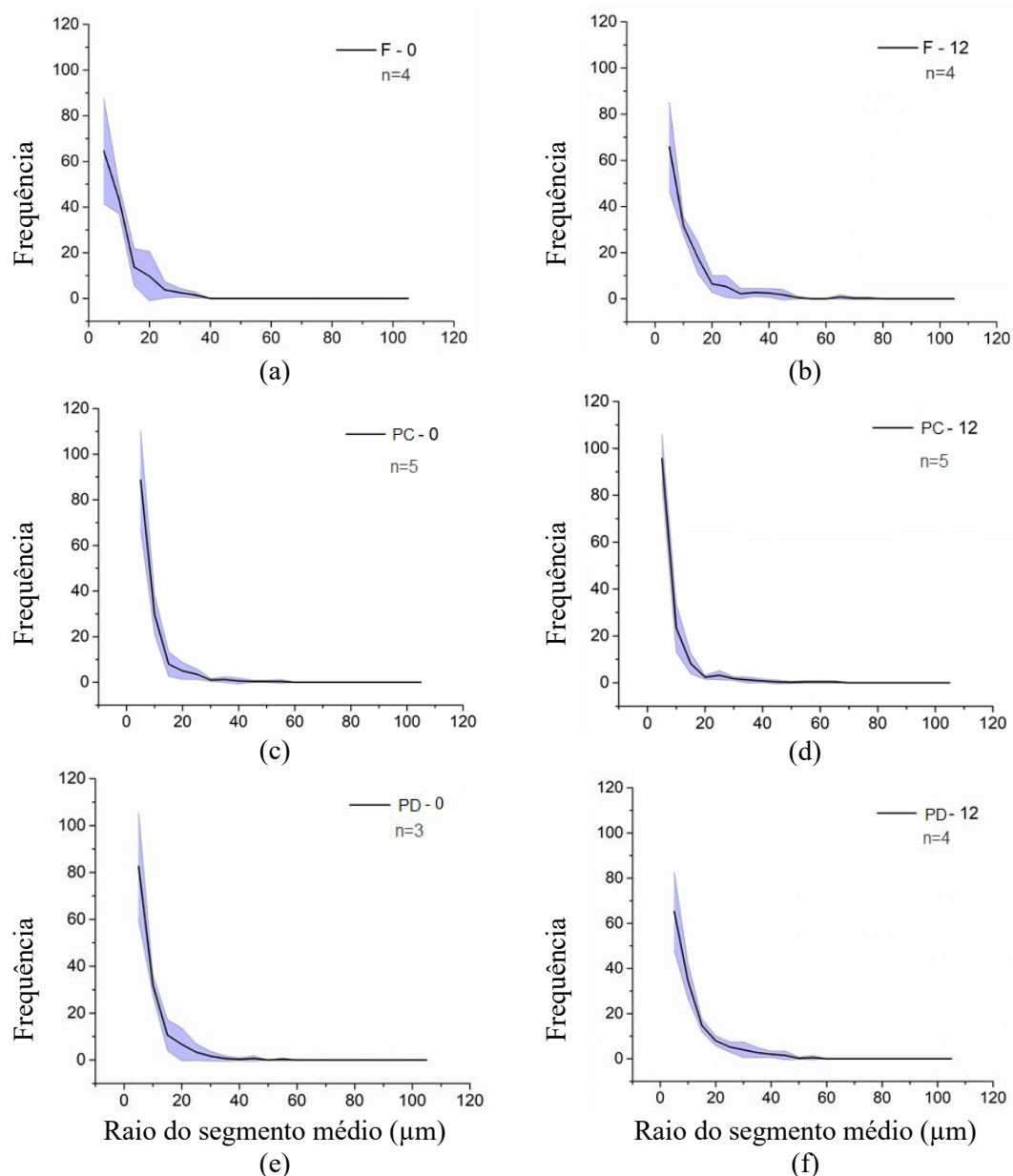
O K do PMV (Figura 4.6g) seguiu o mesmo padrão de k , uma vez que essas duas propriedades estão diretamente relacionadas, conforme mostrado na Equação (4.3). Uma diferença significativa em K ($p \leq 0,05$) ocorreu apenas entre PC em relação a F, considerando 0 U-S (Ferreira et al., 2023). Curiosamente, K foi associado à conectividade do PMV, ou seja, um aumento no NE_{PMV} (diminuição da conectividade) está associado a uma diminuição em K entre 0 e 12 U-S, para F e PC, e vice-versa para PD, corroborando os achados de An et al. (2022).

Embora não tenham sido encontradas diferenças significativas quando os efeitos do U-S dentro do mesmo manejo do solo foram analisados ($p > 0,05$), observa-se que K diminuiu para F (14%) e PC (50%) e aumentou para PD (42%). Comportamentos semelhantes para sistemas de plantio convencional e conservacionista foram observados por Horn (2004) ao longo de cerca de oito anos. No mesmo estudo, para o PC, a diminuição em K foi acompanhada por uma redução na resistência interna do solo e coesão, que estão associadas à homogeneização do sistema de poros no PC durante a decomposição do solo. Por outro lado, para o preparo conservacionista, o aumento em K foi acompanhado por um aumento na resistência e coesão do solo (Horn, 2004). Embora o sistema de poros no PD tenha sofrido menos pertur-

bação do que no PC ao longo dos anos, ele ainda sofre rearranjo de partículas. Consequentemente, os resultados não permitem determinar claramente a diferença na eficiência de permeabilidade entre os manejos após U-Ss. Isso destaca a necessidade de análises adicionais para tirar conclusões confiáveis.

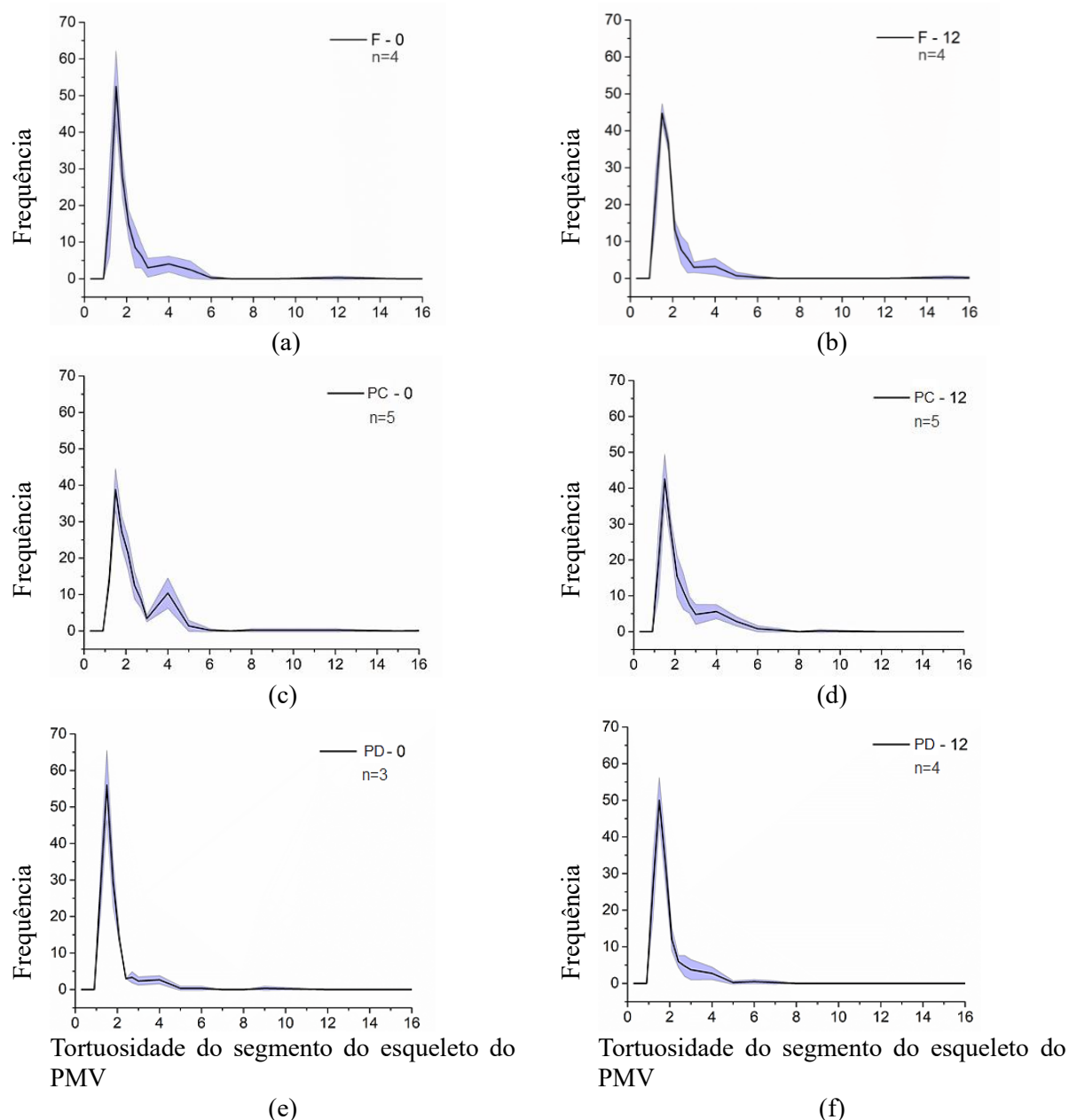
Para uma avaliação mais detalhada da variabilidade do sistema de poros do solo na escala dos agregados estudados, as distribuições do tamanho dos poros foram analisadas em relação ao raio médio do segmento (Figura 4.8) e à tortuosidade do segmento (Figura 4.9) determinadas pela análise de esqueletização do PMV. No caso de amostras de F com 0 U-S, a variabilidade mais substancial para o raio médio do segmento entre amostras foi encontrada até $\sim 40 \mu\text{m}$. A aplicação de 12 U-S tendeu a reduzir a variabilidade entre amostras de F, mas ocorreu até $\sim 50 \mu\text{m}$ (Figura 4.8a,b). Para as amostras sob PC (Figura 4.8c,d) e PD (Figura 4.8e,f), foi observada menor variabilidade entre as amostras, que ocorreu principalmente para o raio médio do segmento até $\sim 40 \mu\text{m}$, para 0 e 12 U-S. Portanto, embora os poros intra-agregados sejam, em geral, estruturalmente estáveis a mudanças (Ferreira et al., 2023), os presentes resultados mostram que amostras de F parecem ser as menos estáveis a modificações nos raios do PMV causadas pela aplicação de U-S. Este resultado é interessante porque, anteriormente no texto, foi discutido como F foi o manejo de solo mais estável, entre aqueles estudados aqui, em resposta a mudanças em τ e τ_{PMV} devido ao U-S (Figuras 4.4d e 4.6d). Integrando essas observações, os poros intra-agregados de amostras de F tendem a ser mais estáveis a mudanças de tortuosidade (de análises globais e locais) e, contrastantemente, mais propensos a mudanças nos raios do PMV (de uma análise local) do que PC e PD devido à aplicação de U-S. Além disso, também se discutiu anteriormente que os resultados parecem mostrar que DF e τ são inversamente relacionados. Portanto, também pode-se dizer que os poros intra-agregados de amostras de F tendem a ser mais complexos e menos tortuosos (com base em análises globais) do que PC e PD. Curiosamente, a curva de frequência do raio médio do segmento é mais íngreme em PC do que em F e PD, tanto em 0 quanto em 12 U-S, mostrando a prevalência de segmentos de poros menores em PC (Figura 4.8), o que está de acordo com o menor raio hidráulico encontrado para PC em 0 e 12 U-S (Figura 4.6e).

Figura 4.8 Distribuição de frequência média do raio médio do segmento do esqueleto do poro mais volumoso (PMV) de amostras de agregados de solo sob (a, b) floresta (F), (c, d) plantio convencional (PC) e (e, f) plantio direto (PD). As amostras foram submetidas a 0 (coluna da esquerda) e 12 (coluna da direita) ciclos de umedecimento e secamento (U-S). Os desvios-padrão são mostrados como áreas preenchidas. O número diferente de amostras (n) analisadas para cada prática de manejo é devido à exclusão de outliers. (a, c, e) Os dados de Ferreira et al. (2023) são apresentados aqui para fins de referência.



Fonte: Andrade et al. (2025).

Figura 4.9 Distribuição de frequência média da tortuosidade do segmento do esqueleto do poro mais volumoso (PMV) de amostras de agregados de solo sob (a, b) floresta (F), (c, d) plantio convencional (PC) e (e, f) plantio direto (PD). As amostras foram submetidas a 0 (coluna da esquerda) e 12 (coluna da direita) ciclos de umedecimento e secamento (U-S). Os desvios-padrão são mostrados como áreas preenchidas. O número diferente de amostras (n) analisadas para cada uso da terra é devido à exclusão de outliers. (a, c, e) Os dados de Ferreira et al. (2023) são apresentados aqui para fins de referência.



Fonte: Andrade et al. (2025).

Em relação à distribuição de frequência para τ dos segmentos do esqueleto PMV (Figura 4.9), pequena variabilidade geral entre amostras com uma ligeira tendência para uma distribuição bimodal foi encontrada para F sob 0 e 12 U-S (Figura 4.9a, b). Para 0 e 12 U-S, o valor mais comum de τ foi 2, e deve-se lembrar que os valores médios dessas distribuições são aqueles apresentados na Figura 4.9d. No caso das amostras sob PC (Figura 4.9c, d), a bi-

modalidade da distribuição τ foi mais evidente entre as amostras, especialmente para o 0 U-S (Ferreira et al., 2023). O valor mais frequente para o primeiro pico foi próximo de 2, enquanto para o segundo pico foi próximo de 4. Para PC, uma variabilidade mais substancial entre amostras foi observada perto do segundo pico, embora com uma frequência menor em relação ao primeiro pico. O fato de o PMV apresentar dois ou mais picos para τ (por segmento de esqueleto) indica que o PMV em agregados deste manejo de solo possui segmentos mais tortuosos, conforme refletido na τ_{PMV} (Figura 4.6d). No caso das amostras sob PD (Figura 4.9e,f), o caráter bimodal na distribuição de τ foi o menos pronunciado entre os manejos de solo. As distribuições para essas amostras foram mais semelhantes às de F (Figura 4.9a,b). Conforme observado para as amostras de F, o valor mais comum de τ para PD foi em torno de 2. A distribuição mais ampla dos valores de τ para as amostras sob PC (Figura 4.9c,d) indica que o sistema poroso do PMV tende a dificultar o fluxo de solutos (Vogel, 1997). Este resultado concorda com os menores valores de K (Figura 4.6g) observados para PC (Ferreira et al., 2023). Em Gharedaghloo (2018), condutividades mais baixas também foram encontradas em meios porosos mais tortuosos, de acordo com os presentes resultados. Segundo esses autores, a diminuição das conexões entre os poros tende a aumentar τ , influenciando diretamente K. Essa influência entre conectividade e K para o PMV dos poros intra-agregados também foi observada aqui, conforme relatado anteriormente.

4.4 CONCLUSÕES

Os resultados do atual estudo confirmam nossa primeira hipótese de que os U-Ss não afetam a rede de poros intra-agregados, mesmo quando diferentes sistemas de manejo são analisados, o que nega nossa segunda hipótese. Várias propriedades foram investigadas na escala intra-gregada, e nenhuma apresentou diferenças significativas entre 0 e 12 U-Ss para cada tipo de manejo do solo, entre elas: porosidade imageada, número de poros, dimensão fractal, tortuosidade (global para todos os poros e local para PMV), conectividade, fração do agregado ocupada pelo PMV, raio hidráulico, permeabilidade e condutividade hidráulica. No entanto, alguns efeitos associados interessantes foram encontrados, ou seja, comparando os manejos do solo após 12 U-Ss. Por exemplo, sob 12 U-Ss, as amostras F tornaram-se mais porosas do que as amostras PC e PD; o sistema de poros das amostras PD tornou-se menos complexo (DF) e mais tortuoso (a partir de uma análise global considerando todos os poros) do que as amostras PC e F. Por outro lado, alguns parâmetros que apresentaram diferenças significativas entre os manejos do solo sob 0 U-S tornaram-se não significativos sob 12 U-S,

por exemplo, a fração do agregado ocupada pelo PMV, a tortuosidade do PMV (análise local), a permeabilidade e a condutividade hidráulica.

Embora não sejam estatisticamente significativas quando se comparam amostras após U-S, algumas observações destacam a necessidade de estudos futuros que considerem os efeitos dos sistemas de manejo do solo e do U-S na estrutura dos poros intra-agregados do solo. Por exemplo, a aplicação contínua de U-S em sistemas PD promoveu conectividade dos poros intra-agregados semelhante à do F e uma estrutura de poros ligeiramente mais conectada do que a do PC. Em contraste, o PC apresentou um raio hidráulico menor, que retém água de forma mais eficaz na escala considerada, bem como menor permeabilidade e condutividade hidráulica.

Especificamente, embora não estatisticamente significativas, a permeabilidade e a condutividade hidráulica diminuíram aproximadamente 50% em PC e aumentaram cerca de 42% em PD devido à aplicação de U-S. De acordo com a literatura existente, essas variações podem estar relacionadas a diferenças na resistência do solo. A faixa de raio hidráulico observada aqui se enquadra na classificação de poros de armazenamento. No entanto, as distribuições do raio médio do segmento derivadas da esqueletização do PMV revelaram raios variando até 50 μm , com alguns tamanhos classificados como poros de transmissão.

Neste contexto, o sistema F apresentou a menor estabilidade estrutural às mudanças nos raios do PMV devido à aplicação de U-S, enquanto as curvas de distribuição do PC indicaram uma predominância de poros menores. Além disso, uma distribuição mais ampla da tortuosidade dos segmentos foi observada no esqueleto do PMV para o PC. Embora alguns resultados sugiram que o tipo de manejo do solo PC esteja associado a um transporte de fluidos menos eficiente e a uma qualidade física mais baixa, mais investigações são necessárias para validar essas observações. Isso deve incluir um número maior de amostras e diferentes tipos de solo para melhor compreender o impacto do U-S.

Manter a estabilidade contra mudanças após o U-S pode ajudar a preservar a estrutura física do solo. Isso, por sua vez, proporciona porosidade adequada para infiltração e retenção de água, mesmo em condições climáticas adversas, reduzindo a compactação e a erosão. Também pode promover maior resistência mecânica e proteção contra a perda de solo.

REFERÊNCIAS

AN, R. et al. Effects of dry-wet cycles on three-dimensional pore structure and permeability characteristics of granite residual soil using X-ray micro computed tomography. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 14, p. 851–860, 2022.

ANDRÄ, H. et al. Digital rock physics benchmarks - Part II: Computing effective properties. **Computers & Geosciences**, v. 50, p.33-43, 2013.

BORGES, J.A. et al. X-ray computed tomography for assessing the effect of tillage systems on topsoil morphological attributes. **Soil and Tillage Research**, v. 189, p. 25–35, 2019.

BROOKS, R.H.; COREY, A.T. Properties of porous media affecting fluid flow. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, v. 92, p. 61–88, 1966.

CAMARGO, M.A.; FACIN, P.C.; PIRES, L.F. Lattice Boltzmann Method for Evaluating Hydraulic Conductivity of Finite Array of Spheres. **The ScientificWorld Journal**, v. 2012(6), p.8, 2012.

CARRIJO, D.R. et al. Impacts of variable soil drying in alternate wetting and drying rice systems on yields, grain arsenic concentration and soil moisture dynamics. **Field Crops Research**, v. 222, p. 101–110, 2018.

CARSON, J.K. et al. Low pore connectivity increases bacterial diversity in soil. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 76, p. 3936–3942, 2010.

COLOMBO, F. et al. Impact of forest management practices on soil bacterial diversity and consequences for soil processes. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 94, p. 200–210, 2015.

DAL FERRO, N.; CHARRIER, P.; MORARI, F. Dual-scale micro-CT assessment of soil structure in a long-term fertilization experiment. **Geoderma**, v. 204, p. 84–93, 2013.

DE OLIVEIRA, J.A. et al. Soil pore network complexity changes induced by wetting and drying cycles—A study using X-ray microtomography and 3D multifractal analyses. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 19, p. 10582, 2022.

DIEL, J.; VOGEL, H.; SCHLUTER, S. Impact of wetting and drying cycles on soil structure dynamics. **Geoderma**, v. 345, p. 63–71, 2019.

DUHOUR, A. et al. Response of earthworm communities to soil disturbance: Fractal dimension of soil and species' rank-abundance curves. **Applied Soil Ecology**, v. 43, p. 83–88, 2009.

ELHAKIM, A.F. Estimation of soil permeability. **Alexandria Engineering Journal**, v. 55, p. 2631–2638, 2016.

FANG, H. et al. Interaction between contrasting rice genotypes and soil physical conditions induced by hydraulic stresses typical of alternate wetting and drying irrigation of soil. **Plant Soil**, v. 430, p. 233–243, 2018.

FERNANDEZ-UGALDE, O. et al. Clay mineralogy differs qualitatively in aggregate-size classes: Clay-mineral-based evidence for aggregate hierarchy in temperate soils. **European Journal of Soil Science**, v. 64, p. 410–422, 2013.

FERREIRA, T.R. et al. How can pore characteristics of soil aggregates from contrasting tillage systems affect their intrinsic permeability and hydraulic conductivity? **Soil and Tillage Research**, v. 230, p. 105704, 2023.

FERREIRA, T.R. et al. Lime application effects on soil aggregate properties: Use of the mean weight diameter and synchrotron-based X-ray μ CT techniques. **Geoderma**, v. 338, p. 585–596, 2019.

FERREIRA, T.R.; ARCHILHA, N.L.; PIRES, L.F. An analysis of three XCT-based methods to determine the intrinsic permeability of soil aggregates. **Journal of Hydrology**, 612, 128024, 2022.

GALDOS, M.V. et al. Assessing the long-term effects of zero-tillage on the macroporosity of Brazilian soils using X-ray Computed Tomography. **Geoderma**, v. 337, p. 1126–1135, 2019.

GALINDO, V. et al. Land use conversion to agriculture impacts biodiversity, erosion control, and key soil properties in an Andean watershed. **Ecosphere**, v. 13, p. 3979, 2022.

GASPARETO, J.V. et al. Representative Elementary Volume as a Function of Land Uses and Soil Processes Based on 3D Pore System Analysis. **Agriculture**, v. 13, p. 736, 2023.

GERKE, K.M.; KARSANINA, M.V. Pore-Scale Modelling of Flow and Transport Phenomena in Soils. **Encyclopedia of Soils in the Environment**, v. 5, p. 25–34, 2023.

GHANBARIAN, B. et al. Tortuosity in porous media: A critical review. **Soil Science Society of America Journal**, v. 77, p. 1461–1477, 2013.

GHAREDAGHLOO, B. et al. Evaluating the hydraulic and transport properties of peat soil using pore network modeling and X-ray micro computed tomography. **Journal of Hydrology**, v. 561, p. 494–508, 2018.

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

GUO, X.M.; GUO, N.; LIU, L. Effects of Wetting-Drying Cycles on the CT-Measured Macropore Characteristics under Farmland in Northern China. **Eurasian Soil Science**, v. 56, p. 1–9, 2023.

HILLEL, D. **Introduction to Environmental Soil Physics**. San Diego, CA, USA: Elsevier Science, 2003.

HORN, R. Time dependence of soil mechanical properties and pore functions for arable soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, p. 1131–1137, 2004.

HOUSHYAR, E.; GRUNDMANN, P. Environmental impacts of energy use in wheat tillage systems: A comparative life cycle assessment (LCA) study in Iran. **Energy**, v. 122, p. 11–24, 2017.

JARVIS, N.J.; LARSBO, M.; KOESTEL, J. Connectivity and percolation of structural pore networks in a cultivated silt loam soil quantified by X-ray tomography. **Geoderma**, v. 287, p. 71–79, 2017.

KLOOSTER, D.; MASERA, O. Community forest management in Mexico: Carbon mitigation and biodiversity conservation through rural development. **Global Environmental Change**, v. 10, p. 259–272, 2000.

KRAVCHENKO, A.N. et al. Protection of soil carbon within macro-aggregates depends on intra-aggregate pore characteristics. **Scientific Reports**, v. 5, p. 16261, 2015.

KUMAR, V. et al. Effect of different tillage and seeding methods on energy use efficiency and productivity of wheat in the Indo-Gangetic Plains. **Field Crops Research**, v. 142, p. 1–8, 2013.

LAL, R. Restoring soil quality to mitigate soil degradation. **Sustainability**, v. 7, p. 5875–5895, 2015.

LAL, R.; SHUKLA, M.K. **Principles of Soil Physics**. FL, USA, CRC Press: Boca Raton, 2004.

LAMPURLANES, J.; CANTERO-MARTINEZ, C. Hydraulic conductivity, residue cover and soil surface roughness under different tillage systems in semiarid conditions. **Soil and Tillage Research**, v. 85, p. 13–26, 2006.

LEE, B.H.; LEE, S.K. Effects of specific surface area and porosity on cube counting fractal dimension, lacunarity, configurational entropy, and permeability of model porous networks: Random packing simulations and NMR micro-imaging study. **Journal of Hydrology**, v. 496, p. 122–141, 2013.

LEHMANN, P. et al. Tomographical imaging and mathematical description of porous media used for the prediction of fluid distribution. **Vadose Zone Journal**, v. 5, p. 80–97, 2006.

LEIJ, F.J.; GHEZZEHEI, T.A.; OR, D. Modeling the dynamics of the soil pore-size distribution. **Soil and Tillage Research**, v. 64, p. 61–78, 2002.

LIU, S. et al. Drying-wetting cycles affect soil structure by impacting soil aggregate transformations and soil organic carbon fractions. **Catena**, v. 243, p. 108188, 2024.

LU, S.F. et al. On measuring methods and influencing factors of air permeability of soils: An overview and a preliminary database. **Geoderma**, v. 435, p. 116509, 2023.

MA, R. et al. Evaluation of soil aggregate microstructure and stability under wetting and drying cycles in two Ultisols using synchrotron-based X-ray micro-computed tomography. **Soil and Tillage Research**, v. 149, p. 1–11, 2015.

MATYKA, M.; KOZA, Z. How to Calculate Tortuosity Easily? **AIP Conference Proceedings**, v. 1453, p. 17–22, 2012.

MESSING, I.; JARVIS, N.J. Temporal variation in the hydraulic conductivity of a tilled clay soil as measured by tension infiltrometers **Journal of Soil Science**, v. 44, p. 11–24, 1993.

MORILLAS, L.; PORTILLO-ESTRADA, M.; GALLARDO, A. Wetting and drying events determine soil N pools in two Mediterranean ecosystems. **Applied Soil Ecology**, v. 72, p. 161–170, 2013.

MOSTAGHIMI, P.; BLUNT, M.J.; BIJELJIC, B. Computations of Absolute Permeability on Micro-CT Images. **Mathematical Geosciences**, v. 45(1), p.103-125, 2013.

MUNOZ, F.J.; SAN JOSE MARTINEZ, F.; CANIEGO, F.J. Fractal parameters of pore space from CT images of soils under contrasting management practices. **Fractals**, v. 22, p. 1440011, 2014.

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

PARK, E.J.; SMUCKER, A.J.M. Saturated Hydraulic Conductivity and Porosity within Macroaggregates Modified by Tillage. **Soil Science Society of America Journal**, v. 69, p. 38–45, 2005.

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, p. 897–907, 2008.

PICCOLI, I. et al. Conservation agriculture had a poor impact on the soil porosity of Veneto low-lying plain silty soils after a 5-year transition period. **Land Degradation and Development**, v. 28, p. 2039–2050, 2017.

PIRES, L.F. et al. 3D analysis of the soil porous architecture under long term contrasting management systems by X-ray computed tomography. **Soil and Tillage Research**, v. 191, p. 197–206, 2019.

PIRES, L.F. et al. A comparison of the differences in soil structure under long-term conservation agriculture relative to a secondary forest. **Agriculture**, v. 12, p. 1783, 2022.

PRICE, A.H. et al. Alternate wetting and drying irrigation for rice in Bangladesh: Is it sustainable and has plant breeding something to offer? **Food and Energy Security**, v. 2, p. 120–129, 2013.

PROVENZANO, G.; RALLO, G.; GHAZOUANI, H. Assessing field and laboratory calibration protocols for the diviner 2000 probe in a range of soils with different textures. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 142, p. 04015040, 2016.

REDDI, L. et al. Permeability reduction of soil filters due to physical clogging. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 126, p. 236–246, 2000.

REGELINK, I.C. et al. Linkages between aggregate formation, porosity and soil chemical properties. **Geoderma**, v. 247, p. 24–37, 2015.

SCHLUTER, S. et al. X-ray microtomography analysis of soil structure deformation caused by centrifugation. **Solid Earth**, v. 7, p. 129–140, 2016.

SCOTT, W.T.; STEPHEN, W.; WHEATCRAFT, S.W. Fractal scaling of soil particle-size distributions: Analysis and limitations. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, p. 362–369, 1992.

SHAHEB, M.R.; VENKATESH, R.; SHEARER, S.A. A review on the effect of soil compaction and its management for sustainable crop production. **Journal of Biosystems Engineering**, v. 46, p. 417–439, 2021.

SHEKHAR, S. et al. Hydrus-1D model for simulating water flow through paddy soils under alternate wetting and drying irrigation practice. **Paddy Water Environ**, v. 18, p. 73–85, 2019.

DOS SANTOS, H. G. et al. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SOTO-GOMEZ, D. et al. 3D multifractal characterization of computed tomography images of soils under different tillage management: Linking multifractal parameters to physical properties. **Geoderma**, v. 363, p. 114129, 2020.

SPACCINI, R. et al. Car-bohydrites in water-stable aggregates and particle size fractions of forested and cultivated soils in two contrasting tropical ecosystems. **Biogeochemistry**, v. 53, p. 1–22, 2001.

SPINA, T.V. et al. Towards Real Time Segmentation of Large-Scale 4D Micro/Nanotomography Images in the Sirius Synchrotron Light Source. **Microscopy and Microanalysis**, 24, 92–93, 2018.

SU, Z. et al. Effects of conservation tillage practices on winter wheat water-use efficiency and crop yield on the Loess Plateau, China. **Agricultural Water Management**, v. 87, p. 307–314, 2007.

TANG, C.S. et al. Investigation on microstructure evolution of clayey soils: A review focusing on wetting/drying process. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 15, p. 269–284, 2023.

Tseng, C.L.; ALVES, M.C.; CRESTANA, S. Quantifying physical and structural soil properties using X-ray microtomography. **Geoderma**, v. 318, p. 78–87, 2018.

UDAWATTA, R.P. et al. Agroforestry and grass buffer influence on macropore characteristics: A computed tomography analysis. **Soil Science Society of America Journal**, v. 70, p. 1763–1773, 2006.

VOGEL, H.J. Morphological determination of pore connectivity as a function of pore size using serial sections. **European Journal of Soil Science**, v. 48, p. 365–377, 1997.

WANG, W. et al. Intra-aggregate pore characteristics: X-ray computed microtomography analysis. **Soil Science Society of America Journal**, v. 76, p. 1159–1171, 2012.

WEN, T.; CHEN, X.; SHAO, L. Effect of multiple wetting and drying cycles on the macropore structure of granite residual soil. **Journal of Hydrology**, v. 614, p. 128583, 2022.

YUDINA, A.; KUZUYAKOV, Y. Dual nature of soil structure: The unity of aggregates and pores. **Geoderma**, v. 434, p. 116478, 2023.

ZHANG, L. et al. Three-dimensional pore characterization of intact loess and compacted loess with micron scale computed tomography and mercury intrusion porosimetry. **Scientific Reports**, v. 10, p. 8511, 2020.

ZHANG, S.J. et al. Effects of seasonal water-level fluctuation on soil pore structure in the Three Gorges Reservoir, **Journal of Mountain Science**, v. 15, p. 2192–2206, 2018.

ZHANG, Y. et al. Comparison of soil tortuosity calculated by different methods. **Geoderma**, v. 402, p. 115358, 2021.

ZHANG, Y.; SCHAAP, M.G. Estimation of saturated hydraulic conductivity with pedotransfer functions: A review. **Journal of Hydrology**, v. 575, p. 1011–1030, 2019.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 RECAPITULAÇÃO DOS OBJETIVOS E PERSPECTIVAS DE ANÁLISES

Os principais objetivos gerais do presente estudo foram avaliar a influência de variáveis como, diferentes tipos de manejos, esquemas de seleção de volume, ciclos de umedecimento e secamento e escalas de resolução de imagens microtomográficas na obtenção do VER de propriedades físicas de um Latossolo. Além disso, avaliar a resiliência a mudanças da estrutura porosa na escala intra-agregada de amostras com tamanhos de aproximadamente 3 mm. Os objetivos específicos foram: (1) Segmentar as imagens tomográficas; (2) Gerar e quantificar os dados das propriedades físicas para o solo sob diferentes tipos de manejos, ciclos de umedecimento e secamento, esquemas de seleção e escalas de resolução.

A perspectiva de análise possibilitou identificar a relação entre as variáveis estudadas, assim como, verificar as hipóteses que nortearam o estudo.

5.2 CONSOLIDAÇÃO DOS RESULTADOS POR UNIDADE DE ANÁLISE

Constatou-se a influência dos diferentes tipos de manejos, ciclos de umedecimento e secamento, e os esquemas de seleção na obtenção do VER de amostras de solos. A análise dos diferentes esquemas de seleção demonstrou que outros critérios além dos fatores físicos devem ser levados em conta para se obter o VER de maneira apropriada.

Em relação a outros fatores que poderiam influenciar no VER, verificou-se que diferentes escalas de resolução das imagens de tomografia das amostras utilizadas para a sua determinação influenciaram nos valores obtidos. Em relação aos manejos analisados por meio das imagens com diferentes escalas de resolução os solos com menor perturbação física tenderam a desenvolver uma rede de poros mais complexa. Além disso, notou-se que algumas propriedades micromorfológicas, mesmo após atingirem o VER, tenderam a apresentar valores inconsistentes, como observado para a dimensão fractal e o grau de anisotropia em algumas imagens de amostras na resolução mais alta.

A respeito da avaliação da estrutura porosa formada por poros inter-agregados, os resultados demonstraram a alta estabilidade dessa rede de poros quando submetidos a ciclos de umedecimento e secamento mesmo para diferentes manejos do solo. Embora alguns resultados sugiram que o tipo de manejo do solo PC esteja associado a um transporte de fluidos menos eficiente e a uma qualidade física mais baixa, mais investigações são necessárias para validar essas observações.

5.2.1 Conexões entre os Resultados

O uso da tomografia computadorizada permitiu a reconstrução em 3D do sistema poroso, assim como, a quantificação e distinção entre várias propriedades de um latossolo, solo que cobre uma área em torno de 39% do território brasileiro, sob diferentes formas de manejos como, o plantio direto que corresponde ao em torno de 59% do uso em lavouras no país, e plantio convencional que somado ao plantio mínimo ao em torno de 39%. Uma ampla análise e discussão foi realizada a respeito da obtenção do VER para cada propriedade estudada desse tipo de solo. As análises e discussões realizadas trouxeram novos insights sobre algumas variáveis que podem influenciar na determinação do VER e foram publicadas em artigos científicos. Foi possível identificar que o VER foi afetado pelos diferentes tipos de manejos, após a aplicação dos ciclos de umedecimento e secamento e quando usados diferentes esquemas de seleção de volume. Contudo, quando comparadas as propriedades antes e depois dos ciclos de umedecimento e secamento, na escala dos poros intra-agregados, o sistema poroso se apresentou estável a alterações.

Esses resultados são fundamentais para a agricultura, pois o VER estabelece o menor volume de solo necessário para que as análises de propriedades físicas como, porosidade, densidade e fluxo de água entre outras, sejam confiáveis e representativas de toda uma área. A correta determinação do VER é crucial, uma vez que amostras com volume inadequado levam a medições incorretas e, conseqüentemente, a diagnósticos errados sobre a qualidade do solo. Essa precisão é essencial para o manejo hídrico, otimizando o uso de água em sistemas de irrigação, além disso, garante a sustentabilidade ao ajudar a prever e reduzir a erosão e a infiltração preferencial de solutos e pesticidas, elementos essenciais para um planejamento agrícola eficiente.

5.3 AVALIAÇÃO CRÍTICA: HIPÓTESES E CONSISTÊNCIA DOS RESULTADOS

Somente a hipótese sobre a influência do impacto dos ciclos de umedecimento e secamento nos poros intra-agregados não foi confirmada, no entanto, a estabilidade em relação aos ciclos sim. As demais que supunham a influência dos diferentes manejos do solo, ciclos de umedecimento e secamento, esquemas de seleção de volume, e imagens com diferentes resoluções na obtenção do VER foram confirmadas.

Portanto, a metodologia e análises se mostraram suficientes para responder com consistência aos problemas investigados.

5.4 PRINCIPAIS LIMITAÇÕES

- número limitado de amostras para cada manejo do solo
- número de métodos de seleção de volume
- Análise das escalas realizadas no mesmo solo, mas em diferentes amostras

Embora existam restrições, os resultados permanecem válidos, indicando a importância de um aprofundamento na temática.

5.5 CONTRIBUIÇÕES DA TESE

- Avanço metodológico, fornecendo uma base mais precisa para a pesquisa em Física do Solo e a compreensão da microestrutura porosa.
- Análise aprofundada que contribui para a literatura, oferecendo dados específicos sobre como as práticas agrícolas afetam a estrutura de solo comum no Brasil.
- Fundamentos metodológicos para a amostragem agrícola, prevenindo medições incorretas e diagnósticos errados sobre a qualidade do solo.
- novos insights sobre algumas variáveis que podem influenciar na determinação do VER e compreensão da resiliência da estrutura do solo.
- Fundamentos metodológicos para um planejamento agrícola mais eficiente e ambientalmente responsável.

5.6 TRABALHOS FUTUROS

Analisando o estudo realizado foi possível identificar alguns potenciais pontos para agregar e contribuir ainda mais com os resultados apresentados, por exemplo;

- Realizar análises em diferentes escalas de resolução para mesmas amostras de solos, e para diferentes manejos e ciclos de umedecimento e secamento.
- Avaliar a relação entre a análise multifractal e o VER para diferentes amostras de solos.
- Aplicar simulações computacionais de permeabilidade hidráulica nas amostras de agregados para avaliar e comparar os resultados obtidos neste trabalho.
- Propor um coeficiente ou equação de ajuste para o VER que relacione as transições entre a micro e macro escala.