UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS - CTG
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

CÁSSIA BEZERRA MACHADO

CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA DE UMA PEDOSEQUÊNCIA COM LAMELAS UTILIZANDO TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS X

Recife
2019

CÁSSIA BEZERRA MACHADO

CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA DE UMA PEDOSEQUÊNCIA COM LAMELAS UTILIZANDO TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS X

Tese apresentada à Universidade Federal de Pernambuco, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil - Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, com ênfase em Recursos Hídricos.

Área de Concentração: Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos

Orientador: Alfredo Ribeiro Neto
Coorientador: Antonio Celso Dantas Antonino
Orientador Externo: Richard Heck

Recife
2019

Catalogação na fonte
Bibliotecário Gabriel Luz, CRB-4 / 2222

M147c Machado, Cassia Bezerra.
Caracterização da microestrutura de uma pedosequência com lamelas utilizando tomografia computadorizada de raios X / Cassia Bezerra Machado - 2019.
69 folhas, Il.; Tabs.

Orientador: Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto.
Coorientador: Prof. Dr. Antonio Celso Dantas Antonino.
Orientador externo: Prof. Dr. Richard John Heck.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2019.
Inclui Referências.

1. Engenharia Civil. 2. µTC. 3. Estrutura do solo. 4. Análise da imagem. 5. Segmentação. 6. Semivariograma I. Ribeiro Neto, Alfredo (Orientador). II. Antonino, Antonio Celso Dantas (Coorientador). III. Heck, Richard John (Orientador externo). IV. Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.) BCTG/2019 - 226

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

A comissão examinadora da Defesa de Tese de Doutorado

CARACTERIZAÇÃO DA MICROESTRUTURA DE UMA PEDOSEQUÊNCIA COM LAMELAS UTILIZANDO TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS X

defendida por

Cássia Bezerra Machado

Considera a candidata APROVADA

Recife, 28 de fevereiro de 2019

Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto – UFPE – Orientador Interno _____

Prof. Dr. Richard John Heck, UG – Orientador Externo _____

Prof. Dr. Antonio Celso Dantas Antonino – UFPE – Coorientador _____

Banca Examinadora:

_____
Prof. Dr. Antonio Celso Dantas Antonino - UFPE
(coorientador)

_____
Prof.ª Dr.ª Lívia Previatello da Silva - UFPE
(examinadora externa)

_____
Prof.ª Dr.ª Rejane Magalhães de Mendonça Pimentel – UFRPE
(examinadora externa)

_____
Prof. Dr. Marcelo Metri Corrêa – UFRPE
(examinador externo)

_____
Prof. Dr. Enivaldo Santos Barbosa – UFPE
(examinador externo)

In *Memorian* a Jonas José da Silva e João Pereira Machado.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela minha vida, oportunidades (principalmente estudo), pelas pessoas amigas e preciosas que colocou no meu caminho e principalmente por nunca me abandonar.

A minha família pelo total apoio e por me ajudar em tudo que precisei para me formar. Principalmente a meus pais, Joseane e Francisco pelo apoio incondicional e irrevogável amor. Aos meus irmãos, Tássia, Clara e Túlio, por sempre estarem comigo, mesmo que a alguns quilômetros de distância. Aos meus avós, em especial Doracy, pela sabedoria passada. E a meu marido, Salomão, pela paciência e apoio.

A todos os professores que contribuíram para minha formação, em especial ao Professor Antonio Celso Dantas Antonino e Professor Richard Heck, pela oportunidade, confiança, paciência e orientação.

Aos amigos do departamento e todos que participaram dessa pesquisa que fazem/fizeram parte do Laboratório de Tomografia. Ao proprietário do Sítio Várzea do Barro, José Cícero, pela cessão da área experimental.

À Universidade Federal de Pernambuco que deu condições, através de seu laboratório, para que a pesquisa fosse realizada e também pela contribuição na minha formação. A funcionários e técnicos que, sempre comprometidos, estavam dispostos a ajudar no que fosse preciso.

À Universidade of Guelph que me acolheu durante o doutorado sanduíche, deu condições para que a pesquisa fosse realizada e também pela contribuição na minha formação. À equipe que faz/fez parte do Laboratório.

Agradecemos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de recursos financeiros e bolsa de doutorado e à Coordenação de Aperfeicoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de doutorado sanduíche.

RESUMO

A estrutura do solo pode ser definida como o arranjo de partículas do solo e seu espaço poroso; ela é importante para a manutenção da porosidade, da aeração, do crescimento das plantas e microrganismos. A utilização da microtomografia computadorizada (μTC) de raios X promove um avanço no estudo da microestrutura do solo. O estudo teve como objetivo analisar a microestrutura de um solo arenoso com lamelas e um solo argiloso em uma pedosequência. As amostras foram obtidas no Sítio Várzea do Barro, Município de São João-PE em quatro perfis (P1, P2, P3 e P4), quatro profundidades: S (0-7,5cm), A (10-17,5cm), B (21-28,5cm) e C (30-37,5cm). Para avaliar a microestrutura foi aplicada a metodologia de segmentação de imagens, utilizando o programa *ImageJ*. A maior porosidade obtida para todos os perfis foi na superfície. É perceptível também que, à medida que a proporção de poros médio aumenta, mais próximo se está da parte baixa da pedosequência (P4). Quanto à forma, todos os perfis apresentaram uma maior porcentagem de poros complexos. Quando comparados aos semivariogramas dos solos com e sem lamela quando úmidos e secos, é notada uma maior anisotropia para os solos úmidos e mais estruturado com a presença das lamelas.

Palavras-chave: μTC. Estrutura do solo. Análise da imagem. Segmentação. Semivariograma.

ABSTRACT

The soil structure can be defined as the arrangement of soil particles and their porous space; it is important for the maintenance of porosity, aeration, growth of plants and microorganisms. The use of X-ray computerized microtomography (μCT) promotes an advance in the study of soil microstructure. This study had the aims to study the microstructure of an entisols with lamellaes and an ultisol in a pedosequence's soil. The samples were obtained at the Várzea do Barro Farm, in São João-PE, in four sites (P1, P2, P3, P4) and in for depths: S(0-7.5cm), A(10-17.5cm), B(21-28.5cm) e C(30-37.5cm). To evaluate the microstructure, the image segmentation methodology was applied using the *ImageJ* program. The highest porosity obtained for all profiles was on the surface. It is also noticeable that as the mean pore ratio increases, the closer it is to the lower pedosquence (P4). Regarding the shape, all profiles had a higher percentage of complex pores. When comparing the semivariograms of the soils when wet and dry, a greater anisotropy is noticed for the wet soils and a better structure when with lamellaes.

Keywords: μCT. Soil structure. Image analysis. Segmentation. Semivariogram.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema de solos: a) Composição de um solo quando em boas condições para o crescimento das plantas e b) Solo trifásico, com suas relações de volume e massa. 15
Figura 2 – Esboço de agregados e seus constituintes, onde a) sua composição e b) arranjamento. 16
Figura 3 – Configuração cônica de um micro CT. 22
Figura 4 – Detalhes da tomografia computadorizada para uma amostra cilíndrica: (a) uma fatia representando a porção mensurada a amostra, definida como uma função f(x,y) da espessura Δz. (b) sistema de coordenadas usadas para descrever o método de reconstrução da imagem. 22
Figura 5 – Detalhes do programa ImageJ. 23
Figura 6 – Semivariograma com características próximas do ideal. 24
Figura 7 – Representação do semivariograma da variância total dos dados para os índices de FDO e SDT. 25
Figura 8 – Pluviosidade do município de São João nos referidos anos. 26
Figura 9 – Representação bidimensional da cobertura pedológica e perfil topográfico com a localização dos perfis de solo e tradagens feitos na litopossequência. 27
Figura 10 – Perfis apresentados na sequência: P1(Nre), P2(Nre), P3(Nre) e P4(Aas). 28
Figura 11 – Tomógrafo do LTC-RX, DEN, UFPE. 30
Figura 12 – Programas utilizados e seus respectivos menus, nos quais a) CTPro 3D e b) VGStudio. 32
Figura 13 – Antes e depois da aplicação do filtro de Gauss. 33
Figura 14 – Interface do *plugin* Polar Transform. 34
Figura 15 – Interface do *plugin* Stripe. 34
Figura 16 – Antes e depois da aplicação do *plugin* Stripes. 35
Figura 17 – Protocolo seguido para a segmentação das imagens. 36
Figura 18 – *Plugin* PVE. 37
Figura 19 – Picos sendo identificados com o auxílio do MathLab. 37
Figura 20 – Plugin CT Segmentation. 38
Figura 21 – Plugin Particle Analyze. 39
Figura 22 – Classificação dos poros baseado no formato. Adaptado de Bullock et al. (1985). 41
Figura 23 – *Plugin* Semivariance. 43
Figura 24 – a) ROI da água; b) Histograma da Água; c) ROI do ar e d) Histograma do ar. 44
Figura 25 – Imagem a) antes e b) depois da correção dos artefatos. 45
Figura 26 – Mostra a imagem original e após a aplicação do PVE. 46
Figura 27 – Mostra a imagem original, após a aplicação do PVE e a segmentação. . 46

Figura 28 – Resultado do LBT (Binarização) e do Particle Analyze (poros grandes, pequenos e médios). 47
Figura 29 – Resultado com a máscara final. 47
Figura 30 – Porosidade dentro de cada perfil (P1,P2,P3 e P4). 49
Figura 31 – Distribuição dos poros interagregados (cinza) e dos poros intra-agregados (amarelo) para o NRe nos perfis 1, 2 e 3, e o Aas no perfil 4. 50
Figura 32 – Espaço poroso interagregados do Nre: a) Profunidade A, b) Profundidade B e c) Profundidade C. 51
Figura 33 – Espaço poroso intra-agregados do Nre: a) Profundidade A, b) Profundidade B e d) Profundidade C. 51
Figura 34 – Porcentagem dos poros em relação ao tamanho, nas profundidades A, B e C. 52
Figura 35 – Proporção dos poros em relação ao tamanho do voxel. 53
Figura 36 – Distribuição dos formatos dos poros dos solos. 54
Figura 37 – Distribuição da orientação dos poros dos solos. 55
Figura 38 – Semivariogram no eixo Z para a pedosequência. 56
Figura 39 – Parâmetro RFV e RSV para o eixo Z. 57
Figura 40 – Parâmetro SDV e FDO para o eixo Z. 58
Figura 41 – Semivariograma para o eixo Z em amostras úmidas de solo. 59
Figura 42 – Parâmetro RFV e RSV para o eixo Z para as amostras úmidas. 60
Figura 43 – Parâmetro SDV e FDO para o eixo Z. 60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação em vigor dos perfis. 28
Tabela 2 – Resultados da Análise Química dos perfis estudados, dentro da área de estudo. 29
Tabela 3 – Atributos físicos dos perfis estudados, dentro da área de estudo. 29
Tabela 4 – Especificações utilizadas na aquisição de projeções (XT H 225 ST). . . 31
Tabela 5 – Especificações da reconstrução de imagem tomográfica (NIKON, CT PRO 3D). 32
Tabela 6 – Classificação dos macroporos e seus volumes para uma resolução de 50μm. 40
Tabela 7 – Classificação dos poros de acordo com seu formato e condições utilizadas para definir parâmetros de acordo com o eixo que intercepta os poros. . 41
Tabela 8 – Classificação dos poros quanto a sua orientação no plano y e z. 42
Tabela 9 – Dados necessários para a calibração e seu resultado. 45
Tabela 10 – Atributos físicos dos perfis de solo (P1,P2,P3 e P4) obtidos com a aplicação de Microtomografia Computadorizada de Raios X. 48

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 12
2 OBJETIVOS 14
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 15
3.1 O SOLO 15
3.2 ÁGUA NO SOLO 18
3.3 LAMELAS 19
3.4 NEOSSOLOS E ARGISSOLOS 20
3.5 TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA 21
3.6 ANÁLISE DE IMAGENS 23
3.7 SEMIVARIÂNCIA 23
4 MATERIAL E MÉTODOS 26
4.1 ÁREA DE ESTUDO 26
4.2 COLETA DE CAMPO 27
4.3 MICROTOMOGRAFIA DE RAIOS X 29
4.3.1 Escaneamento das amostras 29
4.3.2 Processamento de Imagens 31
4.3.2.1 Calibração da densidade da imagem por meio da unidade de Hounsfield 31
4.3.2.2 Reconstrução 32
4.3.2.3 Pré-Processo 32
4.3.2.4 Correção de Artefatos 33
4.3.2.5 Segmentação 35
4.4 ANÁLISE DAS IMAGENS 39
4.5 SEMIVARIÂNCIA 42
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 44
5.1 IMAGEAMENTO 44
5.2 POROSIDADE 47
5.2.1 Tamanho do Poro 51
5.2.2 Forma do Poro 53
5.2.3 Orientação do Poro 54
5.3 SEMIVARIOGRAMA 55
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS 61
REFERÊNCIAS 62

1 INTRODUÇÃO

O solo possui três fases: sólida, líquida e gasosa. Estudar suas propriedades físicas é importante, pois elas afetam vários do mesmo, como a infiltração, a retenção de água, a percolação, o escoamento superficial e subsuperficial, entre outros (LEPSCH, 2016; JURY; STOLZY, 2018).

Fazem parte de suas propriedades físicas a textura, a estrutura, a densidade e a porosidade. As partículas de solo que definem a textura são essenciais visto que podem explicar o comportamento do solo. Elas estabelecem propriedades como a retenção ou drenagem de água, plasticidade, expansão e contração (BRADY, 1983; REINERT; REICHERT, 2006).

Como essas partículas estão arranjadas definem a estrutura do solo, que são fundamentais para definir porosidade, infiltração e estabilidade do solo. A densidade pode ser influenciada pela textura e profundidade de um perfil de solo. A porosidade está intrinsecamente relacionada com a densidade e é através dela que é medida (HILLEL, 2003; OMONDI et al., 2016; CARVALHO et al., 2014).

O espaço poroso é composto por poros de diversas formas, tamanhos e orientações. É por meio deles que ocorrem processos como transporte de água, gases, nutrientes, abrigam organismos, aeração, a disponibilidade ou não de água (LU et al., 2014; PAGENKEMPER et al., 2014; BARROS et al., 2016).

Lamelas são bandas ou faixas de concentrações de partículas finas de solo, são onduladas e geralmente se situam nos horizontes superiores de solos arenosos. Elas influenciam no fluxo de água, nutrientes, retenção e podem até explicar a maior produtividade de uma região (SANTOS; CASTRO, 2006; FIRMINO, 2016; BOCKHEIM; HARTEMINK, 2013; ALMEIDA et al., 2015).

O solo é formado por uma série de camadas (horizontes) sobrepostas, elas são identificadas como horizontes O, A, E, B e C. De acordo com sequência em que são encontrados, são definidos tipos de solo, como os neossolos, que são solos considerados jovens, com dois perfis típicos, horizonte A sobre a Rocha e os argissolos, um horizonte B textural abaixo de um horizonte A ou horizonte E (BRADY, 1983; LEPSCH, 2016; EMBRAPA, 2014).

A dinâmica da água no solo, como sua retenção e disponibilidade, é influenciada pela estrutura e textura do solo. A agregação e interconexão dos poros aumenta o fluxo de água no solo, resultando em uma maior infiltração e menor escoamento superficial (GONÇALVES et al., 2014).

A maioria dos processos para a análise do solo tem mostrado ser métodos destrutivos ou baseados em observações bidimensionais. Devido aos avanços tecnológicos, no momento é possível utilizar técnicas não destrutivas e que projetam observações tridimensionais,

como a utilização da tomografia computadorizada (TC) para análise do solo (PEDROTTI et al., 2003; CRUVINEL et al., 1990; TAINA; HECK; ELLIOT, 2008).

A TC tem sido utilizada para investigar o interior das amostras indeformadas, principalmente na distribuição dos poros e agregados, ainda pode entender a configuração espacial e a natureza dessas amostras, como estão relacionadas com o comportamento do solo e seus processos (FANTE JÚNIOR et al., 2002; TAINA; HECK; ELLIOT, 2008; PIRES et al., 2010).

A análise das imagens tem sido feita através da sua segmentação, onde elas são divididas em partes (segmentos) e estudadas através de programas como *ImageJ*, Mathlab, entre outros. O *ImageJ* por ser um programa aberto, torna mais fácil o compartilhamento de dados entre os usuários (SCHINDELIN et al., 2015).

O *ImageJ* se utiliza de *plugins* para operar o sistema. Eles são extensões que adicionam ou modificam funções. Podem ser utilizados dentro de *scripts* ou *macros* e se configuram com uma sequência de ordens dadas aos *plugins*, criando um batch, que são procedimentos repetitivos executados automaticamente (HARTIG, 2013).

A estatística espacial vem sendo bastante utilizada no intuito de estudar a distribuição espacial de imagens tomográficas de solo, principalmente através de semivariogramas, que associam valores espaciais a *pixels*. Sendo assim possível verificar se a distribuição espacial pode ser utilizada para identificar modificações na estrutura (BALAGUER-BESER; HERMOSILLA et al., 2011; JEFFERIES et al., 2014; TAINA; HECK; DEEN et al., 2013).

2 OBJETIVOS

A seguir serão apresentados os objetivos geral e específicos desta pesquisa.

GERAL

- Analisar a microestrutura de uma pedosequência considerando à relação de suas propriedades físicas com a radiação.
- Caracterizar o espaço poroso nas seguintes condições de solo: Neossolo com a presença de lamelas e Argissolo.

ESPECÍFICOS

- Quantificar a microestrutura do solo do Neossolo e do Argissolo considerando as seguintes propriedades: porosidade, número de poros, tamanho do poro, forma do poro, orientação do poro e distribuição espacial;
- Identificar a participação das lamelas nas modificações na estrutura do solo, com base em suas propriedades físicas como porosidade, número de poros, tamanho do poro, forma do poro, orientação do poro e distribuição espacial e
- Verificar se a distribuição espacial pode ser utilizada para identificar modificações na estrutura.

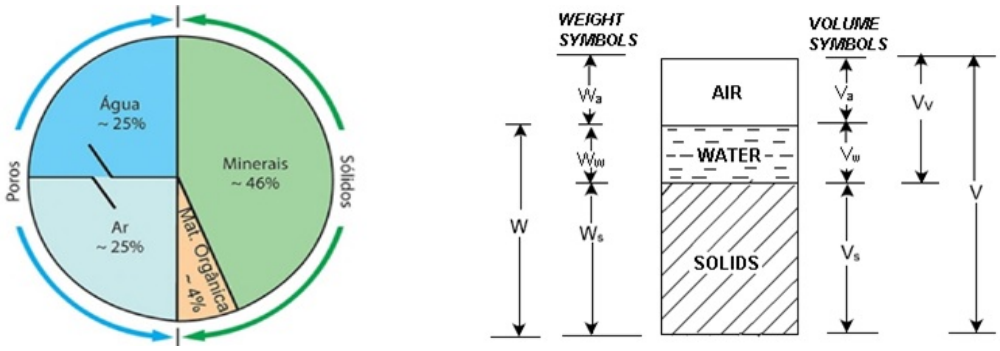
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A seguir será apresentada a fundamentação teórica desta pesquisa.

3.1 O SOLO

O solo é um sistema trifásico, cujas fases podem ser sólida (minerais e orgânicas), líquida e gasosa (Figura 1). A fase sólida é formada pelas partículas de minerais e materiais orgânicos. A fase líquida e a fase gasosa ocupam o espaço poroso. As proporções dos materiais orgânicos e partículas minerais são relativamente fixas, considerando as fases líquida e gasosa isso não ocorre, elas podem variar em um espaço de tempo relativamente pequeno (LEPSCH, 2016; JURY; STOLZY, 2018).

Figura 1 – Esquema de solos: a) Composição de um solo quando em boas condições para o crescimento das plantas e b) Solo trifásico, com suas relações de volume e massa.



(a) (b)

Fonte: Lepsch (2016) e NPTEL (2016).

Estudar as partículas sólidas e suas propriedades físicas ajuda a determinar o melhor manejo do solo, seu ecossistema, a dinâmica da água e seus solutos. As propriedades físicas incluem a textura, estrutura, densidade, porosidade, permeabilidade, fluxo de água, ar e calor.

A importância da textura é dado que, pode explicar o comportamento de um solo assim como as proporções de diferentes partículas. As partículas são classificadas principalmente em: areia, silte e argila. A areia seria a partícula com tamanho menor que 2 mm e maior que 0,05 mm; o silte, menor que 0,05 mm e maior que 0,002 mm e por fim a argila como partícula menor que 0,002 mm (BRADY, 1983).

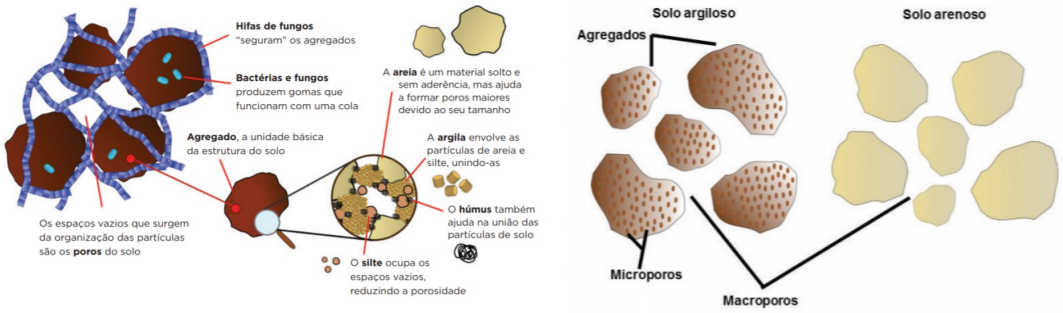
As partículas de areia formam poros grandes por causa do seu tamanho e estrutura, fazendo com que retenham pouca água, que é drenada rapidamente, mas é facilitada a entrada de ar. Solos arenosos são considerados arejados, soltos, inférteis e propensos à seca. As partículas de silte formam poros menores, dessa forma retém mais água, drenam menos, são considerados solos mais férteis, porém são susceptíveis à erosão (REINERT; REICHERT, 2006; BRADY, 1983).

As partículas de argila possuem poros muito pequenos e tortuosos, o que faz com que a circulação de ar e água seja bastante lenta. É a quantidade e o tipo de argila presente em um solo que determinam várias propriedades como plasticidade, expansão, contração, densidade, retenção e outros (REINERT; REICHERT, 2006; BRADY, 1983).

A estrutura do solo pode ser definida como o arranjo de partículas do solo e seu espaço poroso; elas se unem formando unidades estruturais chamadas de agregados. Estes, sendo componentes da estrutura, são importantes para a manutenção da porosidade, aeração, crescimento de plantas e microrganismos, infiltração de água e estabilidade (CARVALHO et al., 2014).

Os agregados (Figura 2) podem ser classificados em macro e microagregados. Há uma hierarquia de agregação, onde os macroagregados são compostos de micro, esses no que lhes concerne são compostos de partículas primárias como silte e argila (BRADY, 1983).

Figura 2 – Esboço de agregados e seus constituintes, onde a) sua composição e b) arranjamento.



(a) (b)

Fonte: Tassinari et al. (2017).

A estrutura do solo também é importante na preservação da qualidade do meio ambiente e na produção sustentável. Um de seus indicadores é a estabilidade do agregado, que pode influenciar vários aspectos do solo como infiltração da água e erosão do solo, sendo bastante influenciada pela rede de poros dentro e entre os agregados. Ela pode ser avaliada atrás da densidade e das macro e microporosidades (YAZDANPANAH; MAHMOODABADI; CERDÀ, 2016; ALARCÓN-JIMÉNEZ; CAMACHO-TAMAYO; BERNAL, 2015; GOMES et al., 2015).

A densidade do solo e a densidade de partículas, são medidas de massa dos solos. A densidade de partículas é definida como a razão entre a massa dos sólidos (m_s) e o volume total dos sólidos (V_s) contidos em uma amostra de solo (REICHARDT; TIMM, 2004) (1).

$$\rho_\rho = \frac{m_s}{V_s} \left(kgm^{-3}\right) \tag{1}$$

A densidade do solo (2) é um índice que representa o grau de compactação do meio poroso ao considerar o espaço poroso entre as partículas, é encontrada através da razão entre massa dos sólidos (m_s) do solo e o volume total da amostra (V_t) (REICHARDT; TIMM, 2004).

$$\rho_s = \frac{m_s}{v_t} \left(kgm^{-3} \right) \tag{2}$$

A densidade do solo pode ser influenciada pela textura e estrutura do solo e a profundidade do perfil. Solos com texturas mais finas são mais aerados, tendo mais espaço poroso total, fazendo com que a densidade do solo seja baixa. A medida que aumenta a profundidade, devido a um processo de compactação de horizontes superiores, menor teor de matéria orgânica, menos raízes e maior agregação, maior é a densidade do solo (HILLEL, 2003).

A porosidade está intrinsicamente relacionada com a densidade do solo e a densidade das partículas. Ela possui um importante papel em relação as raízes das plantas, como absorção de água e respiração (OMONDI et al., 2016).

A porosidade do solo (3) quantifica a fração de volume do solo ocupada por poros, ela pode ser encontrada através da relação entre a densidade do solo e das partículas (REICHARDT; TIMM, 2004).

$$\alpha = \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_\rho} \right) \tag{3}$$

A densidade do solo alta é um indicativo de áreas compactadas, o que reduz a porosidade; a densidade das partículas está relacionada à sedimentação de partículas e material orgânico presente no solo. O conjunto influencia no movimento e armazenamento de água no solo, assim como na porosidade total (ALARCÓN-JIMÉNEZ; CAMACHO-TAMAYO; BERNAL, 2015).

As densidades são utilizadas para medir a porosidade total, contudo os poros existem em vários tamanhos e formas, podendo ser classificados em macroporos, microporos, mesoporos. Ainda existem os poros interagregados e os intra-agregados (BRADY, 1983).

As características dos poros são importantes indicadores da qualidade do solo, como distribuição de tamanho, volume total, forma, espaço, e determinam processos e funções como transmissão, atividade biológica, resistência mecânica e acúmulo de água (LU et al., 2014).

Os macroporos são fundamentais uma vez que, através dele ocorrem processos como o transporte de água, gases, nutrientes e crescimento de raízes (PAGENKEMPER et al., 2014; YAZDANPANAH; MAHMOODABADI; CERDÀ, 2016).

Apesar de uma maior quantidade em solos arenosos, os macroporos existem como espaços entre os grãos individuais, o que faz com que a porosidade total seja baixa. Em solos mais estruturados, eles podem ocorrer entre os agregados, são os chamados poros interagregados (KATUWAL et al., 2015).

Os poros interagregados correspondem à porosidade estrutural, essa por sua vez tem importante papel no abrigo de organismos vivos, melhora a drenagem, condução e aeração das raízes, são essenciais para ciclagem e decomposição do material orgânico (BARROS et al., 2016; DEXTER; CZYZ et al., 2008).

Os microporos em sua maioria são ocupados por água, principalmente por seu tamanho, onde não é possível uma maior circulação de ar. Essa água pode ou não estar disponível para as plantas (REINERT; REICHERT, 2006; BRADY, 1983; KLEIN; LIBARDI, 2002).

Solos de texturas finas possuem mais microporos, apesar de ter uma porosidade total maior, é difícil a circulação de água e ar. Os arranjos de microporos existentes dentro dos agregados são chamados de poros intra-agregados. São os chamados poros texturais, onde há uma maior retenção e consequente disponibilidade de água às plantas (BARROS et al., 2016; DEXTER; RICHARD et al., 2008).

A compactação do solo pode ocorrer devido a uma compressão numa condição não saturada, onde o ar é expulso e as partículas são rearranjdas, o que reduz seu volume e aumenta sua densidade. Geralmente é resultado de uma ação antrópica, aplicada por meio mecânico (tráfego, implementos agrícolas, chuva); e pode afetar a dinâmica da água, porosidade total e tamanho dos poros (FANTE JÚNIOR et al., 2002).

3.2 ÁGUA NO SOLO

O movimento da água no solo é complexo e depende de diversas variáveis, mas na maioria das vezes é baseado na textura do solo (GONÇALVES et al., 2014). A retenção de água pode ser caracterizada como a capacidade do solo de reter a água que foi fornecida pela precipitação ou irrigação (KLEIN; KLEIN, 2015). Pode ser afetada por características como estrutura, textura, mineralogia, tamanho e geometria dos poros; por exemplo, solos arenosos tendem a reter menos água devido ao menor poder de sucção (MENDES; MARINHO; VALÉRIO FILHO, 2015).

O transporte de água através dos macroporos, é de grande importância que, como eles apresentam uma menor resistência aos fluidos, é através deles que o transporte ocorre. Para entender melhor como a água se movimenta no solo, é preciso usar de medidas não destrutivas e de medidas das geometrias dos agregados e da estrutura porosa (TRACY et al., 2015).

Mediante o método da câmara de Richards é possível medir o nível de retenção de

água no solo. No interior das câmaras são inseridas placas porosas, inicialmente saturadas com água onde as amostras são dispostas. A pressão exercida sobre as placas, onde as amostras se encontram, é feita através de um compressor de ar, com um painel contendo válvulas de pressão e manômetros que aplicam a pressão entre 0 a 1500kPa no interior das câmaras (RICHARDS, 1941; RICHARDS; FIREMAN, 1943; EMMERLING; RASSIER; SCHNEIDER, 2015).

3.3 LAMELAS

Lamelas são faixas pedogênicas de concentrações de frações finas, como argilas, siltes, geralmente com espessura menor que 7,5 cm, são onduladas e comumente estão situadas nos horizontes superiores arenosos dos solos. Começaram a ser chamadas assim na década de 60, mas são estudadas desde o início do século XX. São conhecidas em função de sua constituição, cor ou função dos processos e mecanismos de formação. Também funcionam como marcadores estratigráficos e indicadores de idade em estudos arqueológicos (SANTOS; CASTRO, 2006; BOCKHEIM; HARTEMINK, 2013).

O estudo das lamelas pode ser confuso pelas várias denominações que elas recebem. Essas denominações podem ser: lamela textural, bandas texturais, camadas de argila, estruturas de dissipação, lamelas, entre outros. No Brasil, utiliza-se os termos: lamelas e bandas onduladas (SANTOS; CASTRO, 2006; RAWLING, 2000).

Elas podem ser formadas principalmente pela iluviação (ou e-eluviação), conhecidas como pedogenéticas ou pela sedimentação, conhecidas como geogenéticas (PAISANI, 2001; SANTOS; CASTRO, 2006). Suas ondulações são formadas através da organização do material fino (argila, silte) em relação ao material grosso (cascalho, areia), formando um "y"invertido (FIRMINO, 2016).

As lamelas têm um papel importante no fluxo de água e nutrientes, principalmente, quando concentram argilas, tornam-se boas retentoras de água, e um aumento de 3% no teor das argilas é suficiente para alterar a hidrologia em um solo (TOMER; ANDERSON, 1995; BOCKHEIM; HARTEMINK, 2013; ALMEIDA et al., 2015).

Firmino (2016), ao estudar lamelas em um Neossolo Regolítico em São João-PE, afirma que devido às fortes chuvas da região e ao grande espaço poroso, a formação das lamelas nesse caso se dá de forma pedogenética, devido ao processo de iluviação ou e-luviação. Almeida et al. (2015) ao estudar o mesmo solo em comparação com outros da região, afirmam que a presença das lamelas explicaria a maior produção daquela localização em relação as demais estudadas.

3.4 NEOSSOLOS E ARGISSOLOS

É através de uma junção de fenômenos químicos, físicos e biológicos que o solo é formado em uma série de camadas sobrepostas, chamadas de horizontes. Os solos são classificados de acordo com a quantidade de horizontes e suas especificidades (LEPSCH, 2016).

Um solo bem desenvolvido possui o que é chamado de cinco horizontes principais: O, A, E, B e C. Não é necessário um perfil conter todos os horizontes. O Horizonte Orgânico (O) é composto por produtos em decomposição que recobrem alguns solos (BRADY, 1983; LEPSCH, 2016).

O Horizonte A é o mais próximo da superfície e possui mais acúmulo de matéria orgânica. O Horizonte E, de eluviação, é por onde ocorre a translocação de argilas, óxidos de ferro e matéria orgânica para o Horizonte B. O Horizonte B, mais desenvolvido em estrutura e cor por causa do acúmulo de materiais do A e/ou E. E por último o Horizonte C, que é formado por materiais pouco alterados pelos processos de formação do solo, possui características mais próximas à Rocha Mãe (LEPSCH, 2016).

Os Neossolos são solos que possuem dois perfis típicos: Horizonte A diretamente sobre a Rocha ou uma sequência de Horizonte *A-C-Rocha*. Podem ser: Litólicos, Flúvicos, Regolíticos e Quartzarênicos (LEPSCH, 2016; EMBRAPA, 2014).

A região semiárida de Pernambuco possui entre um de seus solos mais recorrentes, os Neossolos Regolíticos, que cobre cerca de 27% da região do estado. São solos pouco evoluídos e pouco profundos, ainda possuem sequência de horizontes: *A-C-R*, sua textura geralmente é média, com areia e cascalho nos primeiros 150 cm. Possuem elevada permeabilidade e baixa capacidade de retenção de água (EMBRAPA, 2014; SANTOS et al., 2012).

Quando sob alta umidade (maior que 0,40 kg kg^{-1}), o Neossolo pode apresentar um aumento de densidade do solo e resistência à penetração, redução da porosidade total e de aeração (SAMPIETRO; SILVA LOPES; REICHERT, 2015).

Não é característica a presença de lamelas nesse solo, mas elas foram encontradas no Agreste Meridional de Pernambuco. Com lamelas, ele apresentou maior retenção de água, maior teor de argila, microporosidade, capacidade de campo e ponto de murcha permanente (ALMEIDA et al., 2015).

Os Argissolos são compostos por um Horizonte B textural abaixo de um Horizonte A ou E. Ocupam 20% do território nacional. Podem ser: Bruno-Acinzentados, Acinzentados, Amarelos, Vermelhos e Vermelho-Amarelos (LEPSCH, 2016; EMBRAPA, 2014).

Os argissolos acinzentados, quando umedecidos, são friáveis e quando secos, são coesos, podem ter horizontes cimentados, sendo bastante firme. São pouco profundos, com o Horizonte A geralmente arenoso e o Horizonte B mais argiloso (ARAÚJO FILHO, 2003).

3.5 TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA

Nos anos 70 foi desenvolvida uma nova tecnologia capaz de projetar, em três dimensões, que foi chamada de Tomografia Computadorizada (TC), que adquire projeções de imagens em diferentes direções e volume, sendo assim o objeto reconstruído em 3D utilizando algoritmos. Inicialmente, a TC foi utilizada para uso médico, algum tempo depois em outras áreas, como a engenharia (CARVALHO, 2007).

Poros são muito importantes e através da tomografia podemos ter diferentes métodos da quantificação e visualização da porosidade, facilitando o entendimento em como os poros estão interligados (TAINA; HECK; ELLIOT, 2008).

Os raios X desde a sua descoberta vêm sendo usados em vários campos de pesquisa por sua capacidade de penetrar a matéria em vários níveis (CNUDDE; BOONE, 2013). Quando os fótons presentes nos raios interagem com o material promovem uma atenuação, eles podem ser absorvidos, difratados, refratados ou transmitidos (WILDENSCHILD; SHEPPARD, 2013). Essa atenuação segue a Lei de Lambert-Beer (WILDENSCHILD; SHEPPARD, 2013) (4):

$$I = I_o e^{-\mu x} \tag{4}$$

em que: I é a intensidade de atenuação após os Raios X passarem pelo objeto;

I_0 é a intensidade da radiação incidente;

x é a espessura do objeto e

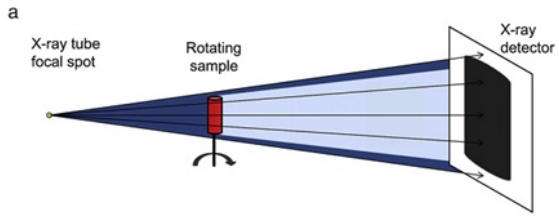
μ é o coeficiente linear de atenuação

Procurando uma melhor resolução de imagem nos anos 80 um novo campo surgiu, o da tomografia de alta resolução (μTC), que pode utilizar tubos de raios X (CNUDDE; BOONE, 2013).

O μTC, por exemplo, permite que as amostras estejam mais próximas da fonte de Raio-X, reduzindo a penumbra (uma região parcialmente iluminada), e resultando em uma melhor magnificação (ampliação do objeto) e resolução (representação o mais fiel possível do objeto). μTC requer a aplicação de uma radiação de baixa energia, quando possível, o mais monoenergética, conseguida através da aplicação de filtros (APPOLONI, 1994; TAINA; HECK; ELLIOT, 2008).

A configuração mais utilizada para o μTC é a do raio cônico, onde o mesmo torna possível uma magnificação geométrica ao dispor o objeto em qualquer posição entre a fonte de Raios X e o detector (Figura 3) (CNUDDE; BOONE, 2013).

Figura 3 – Configuração cônica de um micro CT.



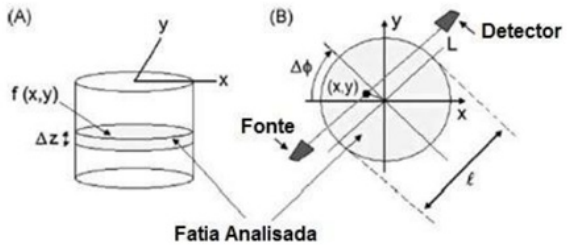
Fonte: Cnudde e Boone (2013).

Ao utilizar a tomografia, é assegurada a não destruição mecânica das amostras, além de ser muito sensível e possuir alta resolução espacial, também pode repetir as medidas da amostra várias vezes, sem apresentar mudanças, assim como não é preciso uma pré-preparação da amostra. Como desvantagem ao utilizar esse método tem-se o alto custo, e também a diversidade de metodologias, que dificulta a comparação entre resultados (PEDROTTI et al., 2003; CRUVINEL et al., 1990; TAINA; HECK; ELLIOT, 2008).

Foi também na década de 80 que a tomografia começou a ser utilizada para estudar o solo, em estudos como o de Petrovic, Siebert e Rieke (1982) e Hainsworth e Aylmore (1986) e no Brasil com Crestana, Mascarenhas e Pozzi-Mucelli (1985). Nessa época eram utilizados tomógrafos médicos, que eram de custo muito alto, com a ajuda da Embrapa, foram desenvolvidos mini tomógrafos com a contribuição de Cruvinel (1987), Naime (1994, 2001) e Macedo (1997) (PIRES et al., 2010).

A tomografia tem sido utilizada para investigar o interior das amostras indeformadas, principalmente a distribuição dos poros e agregados, a configuração espacial e da natureza, e como elas estão relacionadas ao comportamento do solo e seus processos (Figura 4) (FANTE JÚNIOR et al., 2002; TAINA; HECK; ELLIOT, 2008; PIRES et al., 2010).

Figura 4 – Detalhes da tomografia computadorizada para uma amostra cilíndrica: (a) uma fatia representando a porção mensurada a amostra, definida como uma função f(x,y) da espessura Δz. (b) sistema de coordenadas usadas para descrever o método de reconstrução da imagem.



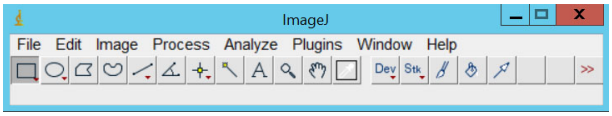
Fonte: Pires et al. (2010).

3.6 ANÁLISE DE IMAGENS

O *ImageJ* é uma plataforma para processamento de imagens, lançada em 1997, por Wayne Rasband do Instituto Nacional de Saúde (National Institutes of Health (NIH)). O programa foi além do que ele havia sido planejado, se tornando acessível tanto para especialistas como iniciantes em análise de imagens digitais (RASBAND, 2019).

Por ser uma alternativa aberta (grátis), é fácil o compartilhamento de dados entre os usuários, gerando assim várias soluções para o estudo de imageamento. O *software* consiste em uma coleção de serviços, que podem operar no sistema de várias formas, como abrindo, manipulando ou mostrando imagens (Figura 5).

Figura 5 – Detalhes do programa ImageJ.



Fonte: Print screen da aplicação no sistema operacional Windows 10.

Essa coleção de serviços é chamada de *plugins*, extensões nas quais são adicionadas novas funções, comportamentos ou até modificando funções (SCHINDELIN et al., 2015).

Uma função importante que engloba os *plugins* são as macro e scripts, que são uma sequência de ordens dadas aos *plugins* e podem fazer parte do batch. O batch faz com que procedimentos repetitivos sejam executados através das macros/scripts e sejam executados automaticamente pelos *plugins* nas imagens, evitando erro humano (RASBAND, 2019).

No intuito de facilitar a análise das imagens, elas são particionadas em vários segmentos, usualmente para localizar objetos ou bordas. Esse processo se chama segmentação, onde os pixels são conectados e analisados sob algum tipo de critério (HARTIG, 2013).

Existem vários métodos de segmentação, entretanto o mais utilizado é o de thresholding (limite crítico). Neste método são identificadas intensidades e essas são associadas a classes. Um protocolo uniforme é essencial para a análise de imagens, sendo os parâmetros críticos e sensíveis, e sua alteração pode resultar em interpretações errôneas de dados (HARTIG, 2013; KAESTNER; LEHMANN; STAMPANONI, 2008).

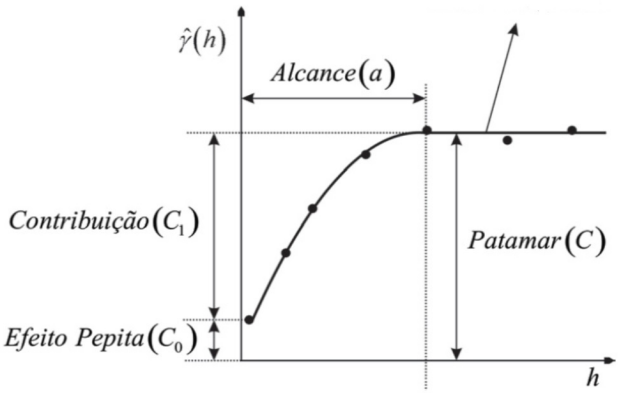
3.7 SEMIVARIÂNCIA

A estatística espacial tem crescido muito nos últimos anos, fazendo com que a variabilidade espacial ganhe um papel de destaque nas pesquisas. Ela pode ser classificada em quatro categorias: dados de processos pontuais, dados de interação espacial, dados de área e dados de superfícies contínuas; e diferem pelo tipo de dado aleatório (REIS TEIXEIRA; SCALON, 2013).

Dados de superfície contínua ou como são mais conhecidos, geoestatística, analisam a distribuição espacial de dados no espaço ou no tempo e espaço, se existe ou não dependência (REIS TEIXEIRA; SCALON, 2013)

Várias ferramentas podem ser aplicadas para entender a relação entre as variáveis, como a covariância, a correlação e a semivariância. A mais utilizada é a semivariância, que gera o semivariograma, um gráfico que descreve o padrão e a escala da variabilidade da distribuição espacial (BALAGUER-BESER; RUIZ et al., 2013; REIS TEIXEIRA; SCALON, 2013).

Figura 6 – Semivariograma com características próximas do ideal.



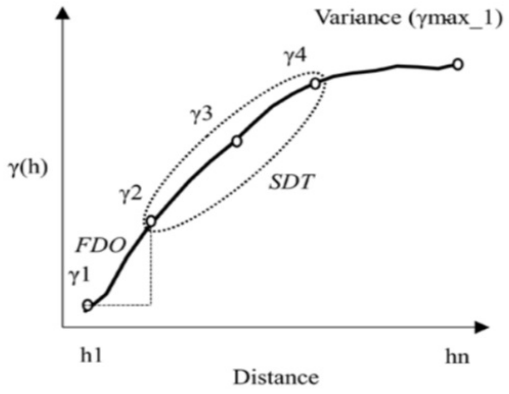
Fonte: Reis Teixeira e Scalon (2013).

O semivariograma (Figura 6) pode ter os seguintes parâmetros: amplitude (ou alcance), é a distância; efeito pepita, é a descontinuidade na origem; contribuição (C_1), é a diferença entre o efeito pepita e o patamar e patamar (C), que é C_0+C_1, que equivale ao valor da semivâriancia na distância a. Quanto menos associadas às variáveis, menor a semelhança, e maior é o valor da semivariância (SILVEIRA et al., 2017; WU et al., 2015; CURRAN; ATKINSON, 1998).

Além desses parâmetros, Balaguer-Beser, Hermosilla et al. (2011) utilizarem o primeiro máximo, primeiro mínimo e o segundo máximo para tirar mais informações, se mostrando mais informativo e representativo. Assim, os parâmetros foram categorizados em próximo à origem, até o primeiro lag e entre o primeiro e o segundo lag.

Desses dados é possível tirar a seguintes informações: razão entre valores da variância total e a semivariância do primeiro lag (RVF); razão entre os valores de semivariância do segundo lag e o primeiro lag (RSF); primeira derivação próxima a origem (FDO) e a segunda derivação no terceiro lag (SDT) (WU et al., 2015; SILVEIRA et al., 2017).

Figura 7 – Representação do semivariograma da variância total dos dados para os índices de FDO e SDT.



Fonte: Silveira et al. (2017).

Onde, y1 é o primeiro lag, y2 é o segundo lag, y3 é o terceiro lag (Figura 7).

Outro ponto importante para ser analisado no semivariograma, seria a isotropia e anisotropia. Há isotropia quando diferentes direções, apresentam o mesmo comportamento e acontece o contrário na anisotropia. A anisotropia pode ser analisada quanto a amplitude e patamar (REIS TEIXEIRA; SCALON, 2013).

Na análise de imagem de solos, o semivariograma mostra a associação entre os valores espaciais de uma variável e mede o grau de correlação entre diferentes pixels numa imagem, gerando assim uma curva em três direções ortogonais; em outras palavras, quanto mais próximos os pontos, mais parecidos são (BALAGUER-BESER; HERMOSILLA et al., 2011; JEFFERIES et al., 2014).

Para entender determinado atributo do solo é essencial o estudo da variabilidade espacial utilizando semivariogramas (RIBEIRO JÚNIOR, 1995);em vários estudos ela indicou bons parâmetros para entender atributos do solo, como orientação e distribuição de poros (CISLEROVÁ; VOTRUBOVÁ, 2002; TAINA; HECK; DEEN et al., 2013; JEFFERIES et al., 2014).

4 MATERIAL E MÉTODOS

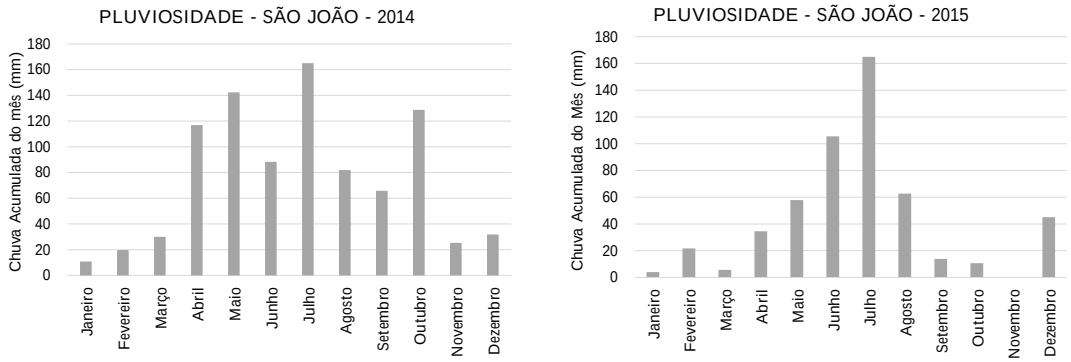
A seguir serão apresentados o material e métodos desta pesquisa.

4.1 ÁREA DE ESTUDO

As amostras de solos foram coletadas no Sítio Várzea do Barro, localizado nas coordenadas geográficas 08º 51' 11" S / 36º 22' 49,1" W, com uma altitude de 716 m e com 236 km de distância da cidade do Recife. A área de estudo pertence ao município de São João, contido na mesorregião do Agreste Meridional de Pernambuco, na microrregião de Garanhuns (CONDEPE/FIDEM, 2018).

O clima da região é tropical, com seca no verão e chuvas começando em outono, incluindo o inverno e começo da primavera (Figura 8). A precipitação pluviométrica média anual é de 800 mm, a temperatura média no verão pode chegar a 30,5 °C e no inverno 20 °C (APAC, 2019).

Figura 8 – Pluviosidade do município de São João nos referidos anos.



Fonte: APAC (2019).

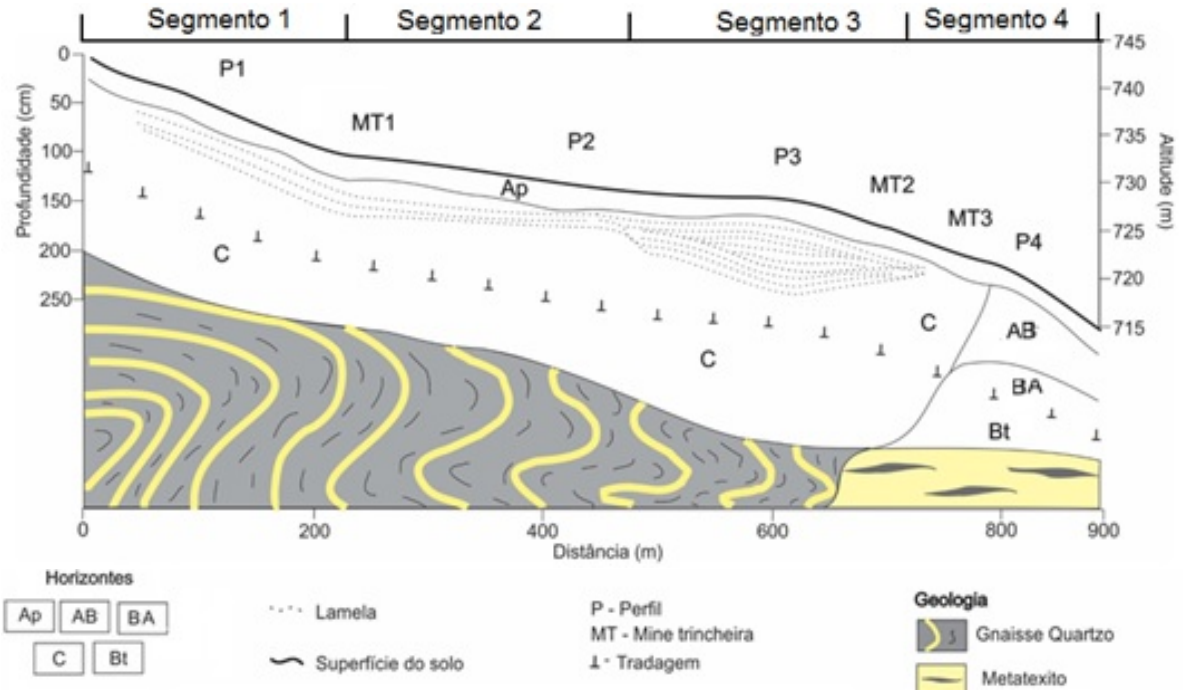
Tem como característica a presença do Neossolo Regolítico eutrófico (Nre) com lamelas, drenagem forte e está localizada numa encosta. A vegetação nativa do município é de Caatinga com partes de Floresta Hipoxerófila (BELTRÃO et al., 2005; BDE, 2018; ALMEIDA et al., 2015).

Uma das principais atividades econômicas da região é a agricultura na qual a mandioca e o feijão são as duas maiores culturas de valor de produção. Só no ano de 2017, foram colhidos 500 ha de mandioca, com um rendimento de 20 t/ha e de feijão foram colhidos 7600 ha com um rendimento de 632 kg/ha (BDE, 2018).

4.2 COLETA DE CAMPO

O solo foi coletado em uma vertente (Figura 9) seguindo uma pedosequência, sendo classificada por Firmino (2016) como Neossolo Regolítico Distrófico espessarênico (Nre) para os perfis um (P1), dois (P2) e três (P3), e Argissolo Acinzentado eutrófico solódico(Aas) para o perfil 4 (P4), seguindo a classificação Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS) (EMBRAPA, 2014).

Figura 9 – Representação bidimensional da cobertura pedológica e perfil topográfico com a localização dos perfis de solo e tradagens feitos na litopossequência.



Fonte: Firmino (2016).

Devido à presença de lamelas foi sugerida uma nova classificação, que pode ser vista na Tabela 1. Os perfis seguem um sistema de rotação de cultura com feijão e mandioca, na época da coleta, estavam sendo cultivadas com feijão.

Tabela 1 – Classificação em vigor dos perfis.

Perfil	Classificação em vigor
P1	NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico espessarênico
P2	NEOSSOLO REGOLÍTICO Distrófico espessarênico
P3	NEOSSOLO REGOLÖTICO Distrófico espessarênico
P4	ARGISSOLO ACINZENTADO Eutrófico solódico

Fonte: Firmino (2016).

As amostras foram coletadas levando em consideração a presença das lamelas e não seguindo o perfil pedológico. Por isso, quatro profundidades foram escolhidas: Superfície (0-7,5cm), profundidade A (10-17,5cm), profundidade B (21 - 28,5cm) e profundidade C (30-37,5). O primeiro perfil (P1) (Figura 10) foi utilizado como base para os outros, para que assim pudesse ser feita uma comparação entre os perfis. As profundidades foram de acordo com o tamanho do tubo de policloreto de vinila (PVC) escolhido para coleta, que é de 7,5x7,5 cm, com um volume de 332 cm^3.

Figura 10 – Perfis apresentados na sequência: P1(Nre), P2(Nre), P3(Nre) e P4(Aas).

(a) (b) (c) (d)

Fonte:Firmino (2016).

O solo coletado foi minimamente perturbado, com amostras triplicadas, resultando assim em 12 amostras para os perfis 1, 2 e 3 e 9 amostras para o perfil 4. As características químicas e físicas de uma perspectiva genética dos perfis, foram estudas por Firmino (2016). Características relevantes dos perfis estão disponíveis nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 – Resultados da Análise Química dos perfis estudados, dentro da área de estudo.

Perfil	pH H_2O	KCL	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^{+}	Al^{3+}	H+Al	SB	CTC pH 7,0	CTC efetiva	P mg kg^{-1}	V %
				-cmolckg-1-								
P1	6,26	6,09	0,91	0,34	0,05	0,04	0,91	1,48	2,39	1,52	12	62
P2	5,45	6,7	1,69	0,48	0,06	0,03	0,58	2,36	2,93	2,39	89	80
P3	5,79	6,6	0,85	0,25	0,04	0,01	0,58	1,23	1,81	1,24	21	68
P4	6,79	6,61	1,59	0,63	0,09	0	0,58	2,4	2,98	2,4	51	81

Ca, Mg, K e Al trocáveis; H+Al = acidez potencial; SB = soma de bases; P= fósforo disponível; V= saturação por base.

Fonte: Firmino (2016).

Tabela 3 – Atributos físicos dos perfis estudados, dentro da área de estudo.

PERFIL	PROF.	GRANULOMETRIA (g kg^{-1})			Ds	Dp	PT
	cm	Areia	Silte	Argila	g.cm^{-3}		%
P1	0-18	892	68	40	1,65	2,78	40,48
	18-74	854	86	60	1,72	2,64	35,00
P2	0-20	800	140	60	1,72	2,63	34,64
	20-42	813	107	80	1,82	2,60	29,81
P3	0-20	900	60	40	1,77	2,60	32,11
	20-100	867	73	60	1,72	2,67	35,45
P4	0-18	876	104	20	1,69	2,64	36,09
	18-74	802	98	100	1,77	2,57	30,35

PROF. = profundidade; Ds= Densidade do Solo, Dp = Densidade das partículas, PT= porosidade total.

Fonte: Firmino (2016).

4.3 MICROTOMOGRAFIA DE RAIOS X

A seguir serão apresentadas as etapas referentes a microtomografia de raios X.

4.3.1 Escaneamento das amostras

Após a coleta em campo, as amostras foram postas numa estufa a 40°C até atingirem peso constante, para isso foi utilizada uma balança semi-analítica. Este processo minimiza a interferência da água na atenuação dos Raios X (CARDUCCI et al., 2014). Em seguida foram escaneadas, e chamadas de amostras secas.

Posteriormente, os cilindros foram umedecidos através do processo de ascensão capilar por 24 horas ou mais, até atingir a saturação total e escaneados. Depois foram saturados novamente e colocados na câmara de pressão de Richards.

Na câmara de pressão de Richards, as amostras foram colocadas em contato com as placas que estavam saturadas para que tivessem um bom contato hidráulico. Depois de colocadas dentro da câmara, a mesma é fechada e ajusta-se o manômetro para uma determinada pressão a ser aplicada e assim forçar a saída da água das amostras do solo pelas placas até que elas encontrem o equilíbrio.

Foi aplicada a pressão de 0,1 bar (KLUTE, 1986; KLUTE; DIRKSEN, 1986; ANDRENELLI et al., 2016). Após atingir o equilíbrio, a câmara é aberta e a amostra do solo é escaneada. Essas amostras foram chamadas de amostras úmidas.

As amostras foram escaneadas utilizando um microtomógrafo de Raios X XT H 225 ST (Tubo de tungstênio como fontes de Raios X; energia máxima de 225 kV, 1001 μA, NIKON, Figura 11) no Laboratório de Tomografia Computadorizada de Raios X (LTC-RX) no Departamento de Energia Nuclear (DEN) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

Figura 11 – Tomógrafo do LTC-RX, DEN, UFPE.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A fonte foi operada à 150 kV e 226 μA com um filtro de cobre de 0,5 mm, que foi utilizado para reduzir o beam hardening; essa configuração produziu imagens com um satisfatório contraste entre poros, matriz e rochas.

A configuração do detector e a distância da fonte-objeto-câmera foram ajustadas para que produzisse imagens com *pixels* de 50 μm. O tempo total de aquisição dos dados ficou em torno de 25 minutos por escaneamento, maiores dados estão presentes na Tabela 4.

Tabela 4 – Especificações utilizadas na aquisição de projeções (XT H 225 ST).

ESPECIFICAÇÕES	UNIDADES	VALOR
Voltagem da Fonte de Raios X	kV	150
Corrente da Fonte de Raios X	μA	226
Posição do Manipulador	mm	213x481x360
Tamanho do Pixel da imagem	um	50
Tipo de Filtro	-	Cu
Espessura do Filtro	mm	0,5
Grau de Rotação	Grau	360
Temperatura da Fonte	Grau Celsius	21

Fonte: Nikon (2019b).

4.3.2 Processamento de Imagens

A seguir serão apresentadas as etapas referentes ao processamento de imagens.

4.3.2.1 Calibração da densidade da imagem por meio da unidade de Hounsfield

Para a calibração da densidade das imagens, é necessária a criação de um *phantom*, que seria um recipiente preenchido até a metade com água destilada que é escaneado pelo tomógrafo utilizando as mesmas especificações para a amostra. Os parâmetros definidos para o *phantom* após a reconstrução devem ser utilizados em todas as amostras de solo.

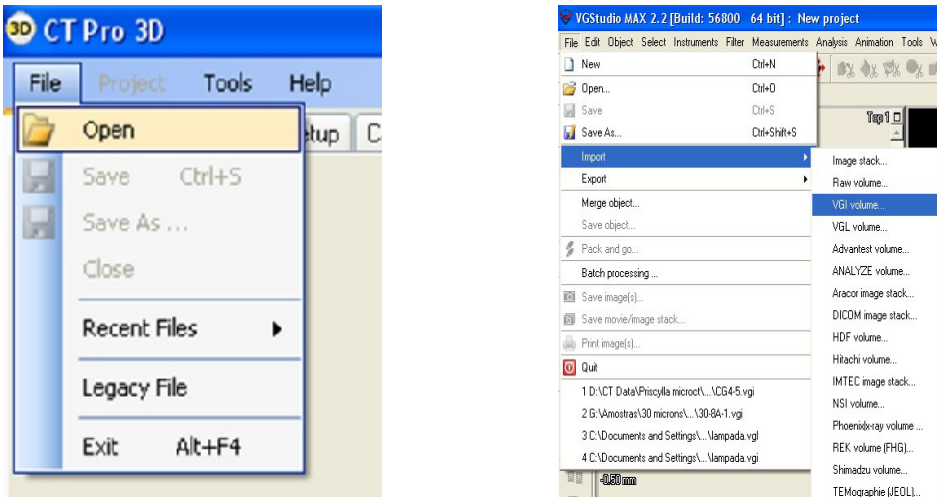
No tomógrafo industrial, números altos são associados aos tons entre cinza, preto e branco e os números baixos aos tons brancos. Os *pixels* fazem parte de cada fatia de uma imagem tomográfica, cada um possui um valor que expressa unidades como Hounsfield ou níveis de cinza. Neste caso é preciso converter os valores dos níveis de cinza em valores Hounsfield, isso é possível através da seguinte fórmula (Equação 5):

$$HU = \text{valor do pixel} \times \text{inclinação} + \text{intercepção} \tag{5}$$

Os blocos de imagem saem do tomógrafo com 16bits, podendo ser convertidas em 8bits ou até 32bits dependendo da necessidade de segmentação.

Para definir as especificações, as projeções escaneadas são reconstruídas separando as partes de regiões de interesse (ROI) do recipiente que são: ROI com água e uma segunda ROI com ar, utilizando o CTPro 3D XT 3.0.3 (NIKON, 2019a). Cada ROI é então levado ao VGStudio (GRAPHICS, 2019), onde ao abri-lo, será identificada a densidade dos tons de cinza para a água e depois para o ar automaticamente (Figura 12).

Figura 12 – Programas utilizados e seus respectivos menus, nos quais a) CTPro 3D e b) VGStudio.



(a) (b)

Fonte: Print screen da aplicação no sistema operacional Windows XP.

Em uma segunda etapa, os ROI's são convertidos em bloco de imagens pelo VGStudio e levadas ao ImageJ (RASBAND, 2019), a mesma quantidade de fatias e o mesmo tamanho são selecionados para o ar e o para a água. É pedido o histograma desses blocos de imagem, e assim o valor médio dos histogramas de cada ROI é identificado através de cálculos estatísticos.

4.3.2.2 Reconstrução

O volume escaneado foi reconstruído utilizando o programa CT PRO 3D XT 3.0.3 (NIKON, 2019a), na qual a região de interesse (region of interest, ROI), longe das bordas, foi no tamanho de 840 x 840 x 840 voxels (Tabela 5).

Tabela 5 – Especificações da reconstrução de imagem tomográfica (NIKON, CT PRO 3D).

ESPECIFICAÇÕES	UNIDADES	VALOR
Formato da imagem	TIFF	-
Depth	Bits	16
Total de seções	-	840
Tamanho de *pixels*	μm	50

Fonte: Nikon (2019a).

4.3.2.3 Pré-Processo

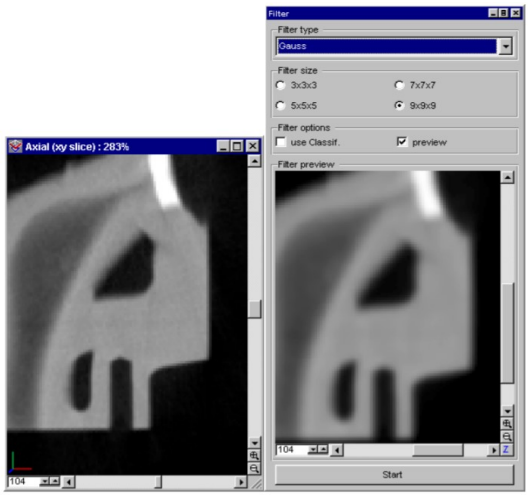
Após a reconstrução o bloco de imagens foi importado para o VG Studio Max 2.2 (GRAPHICS, 2019), onde os dados conseguidos através do *phantom* são empregados para a conversão do bloco em unidade Hounsfield.

Para reduzir o nível de ruído, a primeira ação utilizada numa imagem é a aplicação de um filtro. Esta ação é empregada dado que algumas imagens acabam não sendo perfeitas devido a espalhamento, ruído e funções de transferência ótica (KAESTNER; LEHMANN; STAMPANONI, 2008). O filtro utilizado foi o de Gauss (3 x 3 x 3), denominado como filtro de suavização, por ter baixa frequência e reduzir o ruído (Figura 13).

Logo após o bloco de imagens que antes estava em volume, foi exportado como um bloco de imagens em TIF e dividido em 840 fatias.

Após a reconstrução, as imagens são encaminhadas para o cluster que pertence ao LTC-RX, por possuir uma capacidade de processamento acima do que computadores normais possam oferecer. No cluster serão utilizados programas como o *ImageJ* (RASBAND, 2019) e seus respectivos *plugins*.

Figura 13 – Antes e depois da aplicação do filtro de Gauss.



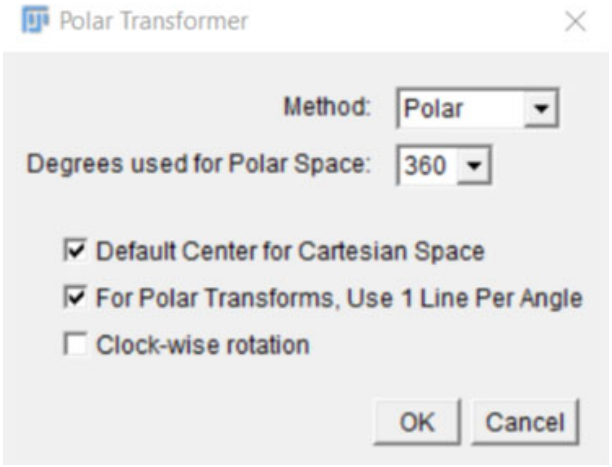
Fonte: (GRAPHICS, 2019)

4.3.2.4 Correção de Artefatos

Em alguns conjuntos de imagens foram observados *ring artifacts* (artefatos em anéis), que precisavam ser removidos antes da segmentação. Foi aplicado, no conjunto, um protocolo seguido pelo LTC-RX (COSTA et al., 2016), onde é utilizado um filtro de contraste, e em seguida foi selecionado o centro dos anéis.

O centro dos anéis precisa ser selecionado pois, não necessariamente ele se encontra no centro da imagem. Com o centro selecionado, pode-se converter do plano cartesiano para o plano polar utilizando o *plugin* Polar Transform (Figura 14) (SIJBERS; POSTNOV, 2004; DONNELLY; MOTHE, 2008) no ImageJ.

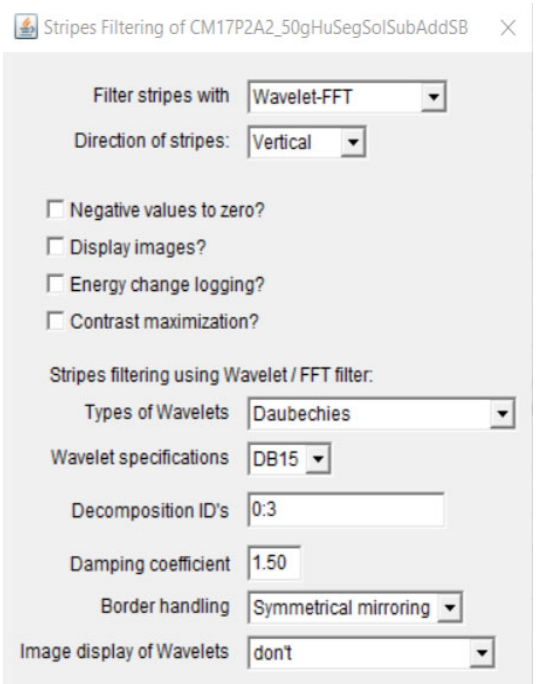
Figura 14 – Interface do *plugin* Polar Transform.



Fonte: Print screen da aplicação no sistema operacional Windows 10.

Ao transformar o plano de cartesiano para polar, os anéis se tornam linhas verticais, onde o *plugin* stripes (Figura 15) agora age, utilizando várias transformações wavelet, para a remoção de ruído. A melhor remoção vai depender da transformação utilizada e de suas especificações, sendo necessários vários testes (MÜNCH et al., 2009; WEI; WIEBE; CHAPMAN, 2013).

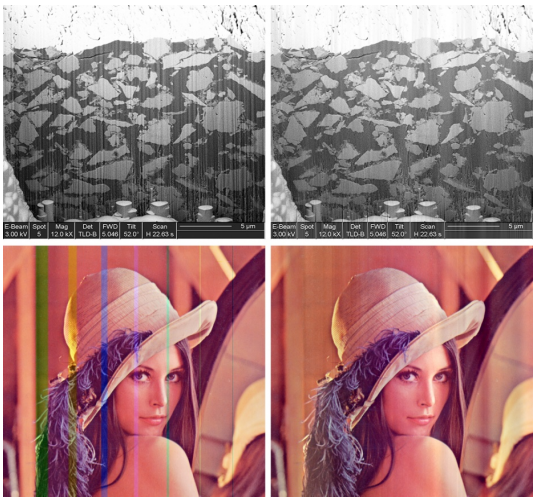
Figura 15 – Interface do *plugin* Stripe.



Fonte: Print screen da aplicação no sistema operacional Windows 10.

Após esses processos se aplica o filtro Polar Transform novamente, para que a imagem volte ao plano cartesiano (Figura 16).

Figura 16 – Antes e depois da aplicação do *plugin* Stripes.



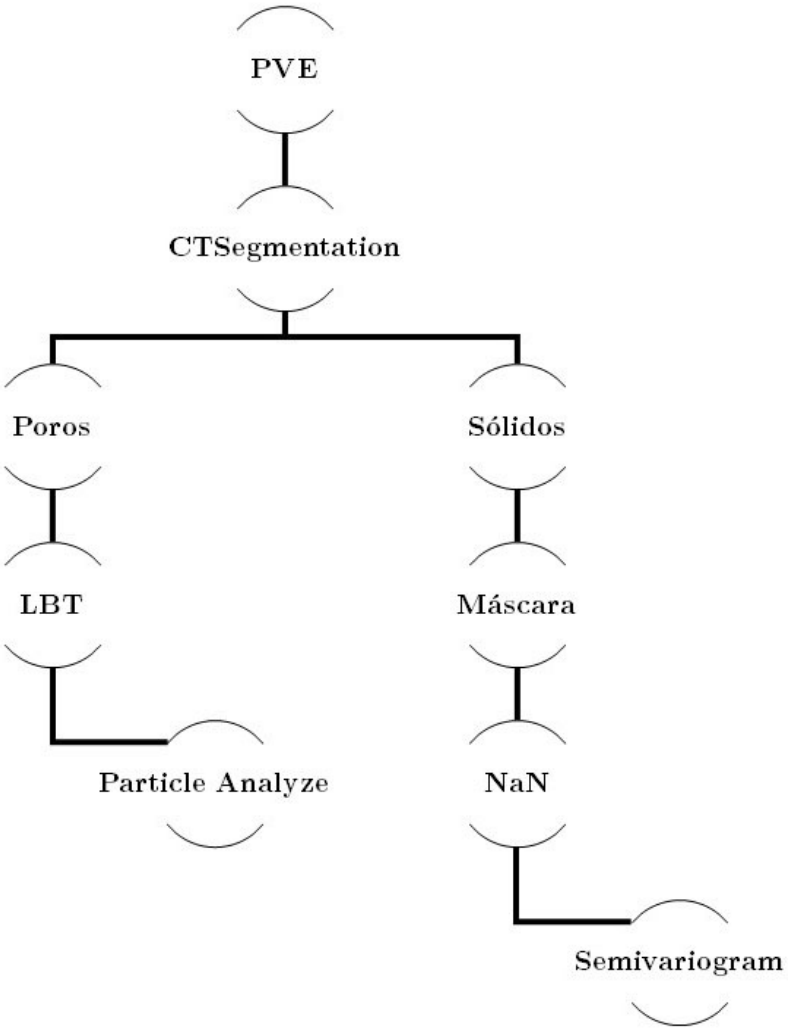
Fonte: Rasband (2019)

4.3.2.5 Segmentação

O protocolo desenvolvido foi um esforço em conjunto entre o grupo de pesquisa do Laboratório de Imagem de Solo da Universidade de Guelph, Canadá e o grupo do Laboratório de Tomografia Computadorizada de Raios X (LTC-RX) localizado no Departamento de Energia Nuclear (DEN), da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE).

Plugins específicos para a segmentação do grupo de imagem de Guelph foram utilizados, eles são o Pure Voxel Extraction (PVE), o CTSegmentation, Large Bidwidth Threshold (LBT), NaN Converter e o Semivariogram; eles fazem parte de um conjunto de plugins chamados CTofSoil. O *plugin* Particle Analyze faz parte de um conjunto de *plugins* chamado BoneJ (BONEJ, 2019) (Figura 17).

Figura 17 – Protocolo seguido para a segmentação das imagens.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Imagens tomográficas de Raios X são um conjunto de valores de níveis de cinza, que possuem um efeito de volume parcial chamados de voxels mistos, que são voxels partilhados pelas duas ou mais fases, onde seu valor é a média de seus constituintes, como a interface solo, ar e água. Devido à limitação da resolução espacial, essas três fases geralmente se sobrepõem umas às outras (HIGO; MORISHITA et al., 2016; HIGO; OKA et al., 2014; TARQUIS et al., 2009).

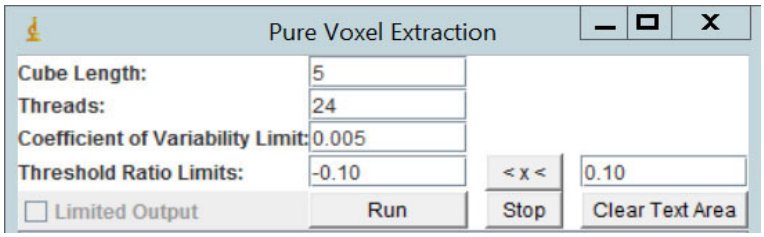
Elliot e Heck (2007) proposuram um método onde eles consideram que regiões que têm o mesmo valor de unidade Hounsfield são idênticas, e por isso possuem o mesmo constituinte, então são consideradas regiões de baixa variância. O oposto, seriam consideradas regiões com valores diversos de Hounsfield e consequentemente de alta variância, os *mixels*.

No esforço de identificar essas regioes de baixa variância que funciona o PVE, que se tornou um passo importante durante a segmentação, pois ele refina o histograma e facilita a identificação dos diferentes picos dos constituintes do solo, reduzindo efeito dos

mixels (COSTA et al., 2016; TAINA; HECK; DEEN et al., 2013; TARQUIS et al., 2009; ELLIOT; HECK, 2007; JEFFERIES et al., 2014).

Foi considerado para o PVE que os voxels com baixa variância, foram aqueles que não diferiam mais do que 0,07%, em relação a seus vizinhos ao redor de 124 voxels (5 x 5 x 5 unidades de volume) para a superfície e 0,06% para as profundidades A, B e C dos perfis (Figura 18).

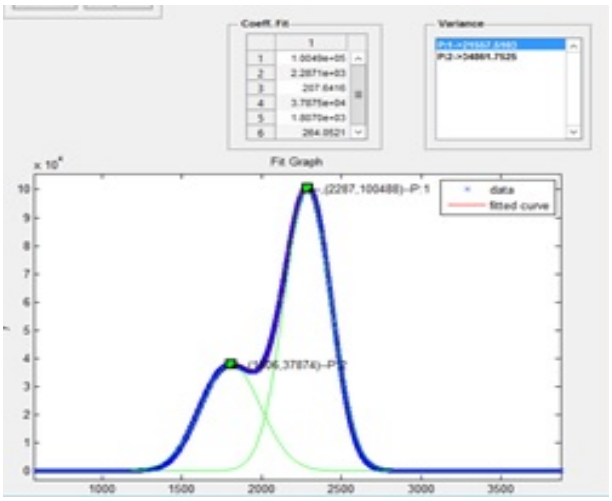
Figura 18 – *Plugin* PVE.



Fonte: Print screen da aplicação no sistema operacional Windows 10.

O histograma das imagens criadas com o PVE foi levado até um *plugin* criado através do MathLab, para que os picos fossem identificados e caracterizados (Figura 19), onde ele é suavizado com uma média adjacente de 25 níveis, e por fim são identificados os picos e são disponibilizados valores de centro máximo (CM) e Variância.

Figura 19 – Picos sendo identificados com o auxílio do MathLab.



Fonte: Print screen da aplicação no sistema operacional Windows Server 2012.

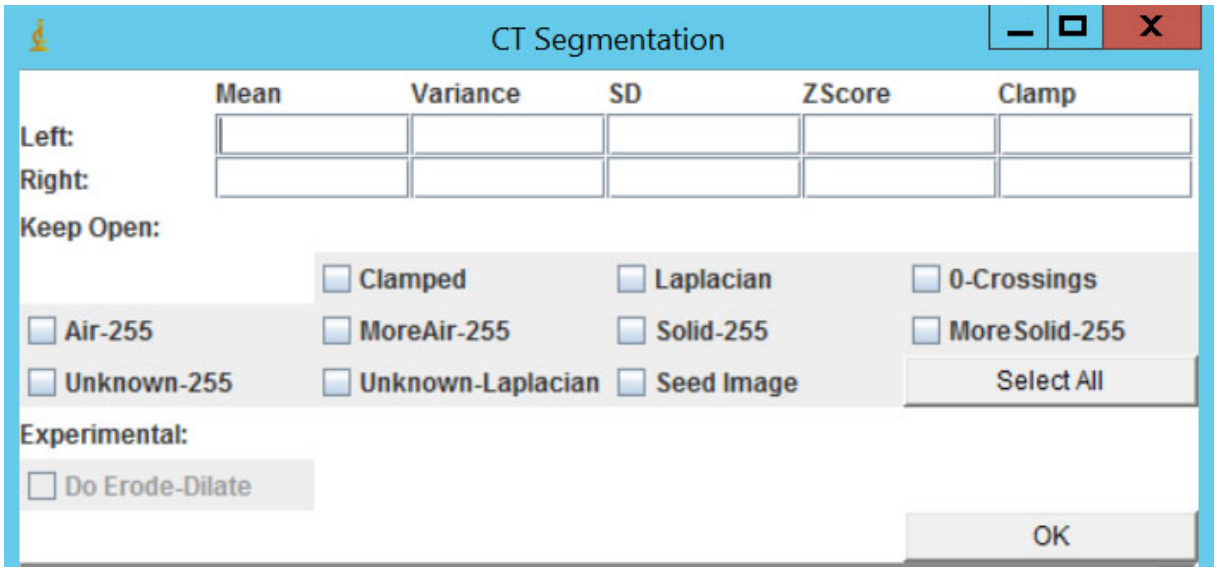
O CTSegmentation foi implementado utilizando modificações nas técnicas definidas por Schlüter, Weller e Vogel (2010), que propuseram identificar a região onde os *mixels* se encontram e através de mascáras de gradiente, executar o threshold em várias amostras, principalmente aquelas que possuem histogramas unimodais, que prejudica a identificação do pico dos poros.

As imagens que possuem histogramas unimodais, têm a partir do centro máximo do seu único pico, desvios padrões aplicados para assim identificar as áreas que não correspondem a fase não sólida. Após isso, é aplicado um operador Laplaciano 3D para identificar as áreas de transição (*mixels*) (JEFFERIES et al., 2014).

Aplicando os picos encontrados através do PVE, e os desvios padrões estabelecidos, é possível avaliar toda a estrutura como um conjunto, em que é possível segmentar somente os poros ou os sólidos.

Dos dois maiores picos identificados pelo MathLab, o maior correspondeu aos sólidos e o menor aos poros mais a matriz para as amostras secas. Como o pico dos sólidos estava bem estabelecido, foi considerado para a matriz do solo, os voxels com tons de cinza igual ou superior a -1,5 vezes o desvio padrão do centro máximo. O pico de menor valor de CM foi definido como o pico do ar (Figura 20).

Figura 20 – Plugin CT Segmentation.



Fonte: Print screen da aplicação no sistema operacional Windows 10.

A imagem final é uma máscara que pode ser aplicada a imagem inicial, ela possui os seguintes valores: 1 para Poros, 2 para Matriz e 3 para Sólidos.

Considerando que os sólidos não alteraram sua estrutura mesmo na presença de água, para as amostras úmidas, o mesmo pico foi utilizado. É mais difícil segmentarem imagens de materiais com mais de uma fase porque os materiais podem ter valores de cinza similares. Em solos parcialmente saturados, seus valores de ar e solo podem ser semelhantes aos da água. Essa semelhança acontece já que a densidade da água que é de 1 g/cm^3, ser entre a densidade do ar e do solo, que são respectivamente 0 e 2,64 g/cm^3 (HIGO; OKA et al., 2014).

Mais detalhes quanto aos processos de aquisição e pré-processamento podem ser

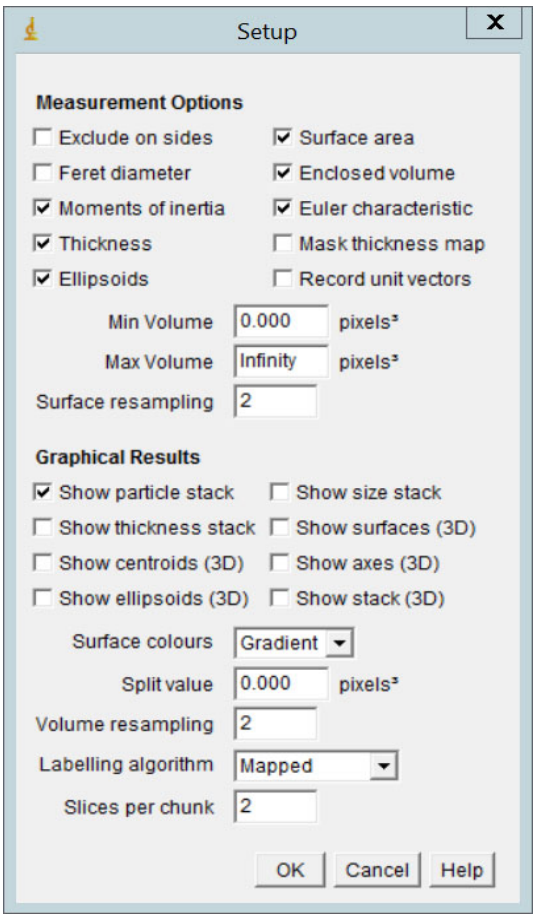
encontrados em Elliot e Heck (2007), Taina, Heck e Elliot (2008), Tarquis et al. (2009) e Jefferies et al. (2014).

4.4 ANÁLISE DAS IMAGENS

A imagem segmentada com os poros, precisa ser binarizada antes de ser utilizada pelo Particle Analyse (PA), para isso é utilizado o *plugin* Large Bitwidth Threshold (LBT). Ele localiza os voxels marcados que são convertidos em 255.

Então é aplicado o PA, no qual são identificados cada poro e inumerados em valores que vão de 1 até 65536, no final é gerada uma imagem de 16bits. O PA caracteriza os poros e informa detalhes como: área de superfície, eixos principais (maior, intermediário, menor), número, localização (x, y e z) e volume (Figura 21).

Figura 21 – Plugin Particle Analyze.



Fonte: Print screen da aplicação no sistema operacional Windows 10.

Para ter características morfométricas o poro precisa ser maior que 2 voxels em qualquer direção e quando ele é maior que $1x10^4$, o formato pode ser muito irregular. Por isso os poros foram divididos em categorias: os valores empregados no PA foram de 0 -

8 voxels para microporos, de 9 – 1x10^4 voxels para mesoporos e maiores que 1x10^4 para macroporos (JEFFERIES et al., 2014; COSTA et al., 2016) (Tabela 6).

Tabela 6 – Classificação dos macroporos e seus volumes para uma resolução de 50μm.

Classificação	**Tamanho (Voxel)**
Pequeno (P)	0-8
Médio (M)	9 - 100.000
Grande (G)	$\geq$ 100.000

Fonte: Costa et al. (2016).

Os dados gerados pelo PA foram exportados até uma planilha de excel, onde o volume dos voxels para o micro, meso e macro poros foram calculados utilizando a seguinte equação: para uma determinada resolução espacial (δ_r) onde Nvoxels representa o número de voxels, sua conversão de volume em voxels é dada por (Equação 6):

$$V = N_{VOXELS}(\delta r)^3 \tag{6}$$

Para calcular os dados de porosidade, inter e intra-agregados, foi feita uma razão entre os dados de micro, meso e macroporos e o volume total da amostra (V_t), que é a soma de todos os voxels da imagem. Para a porosidade (Equação 7):

$$P(\%) = \frac{V_p}{V_t}100 \tag{7}$$

Em que V_p é a soma dos volumes dos voxels dos micro (V_mi), meso (V_me) e macroporos (V_m). Para os agregados (Equação 8):

$$A_g(\%) = \frac{V_t - V_m}{V_t}100 \tag{8}$$

Para os poros interagregados (Equação 9), que são poros localizados entre os agregados:

$$INTER(\%) = \frac{V_m}{V_t}100 \tag{9}$$

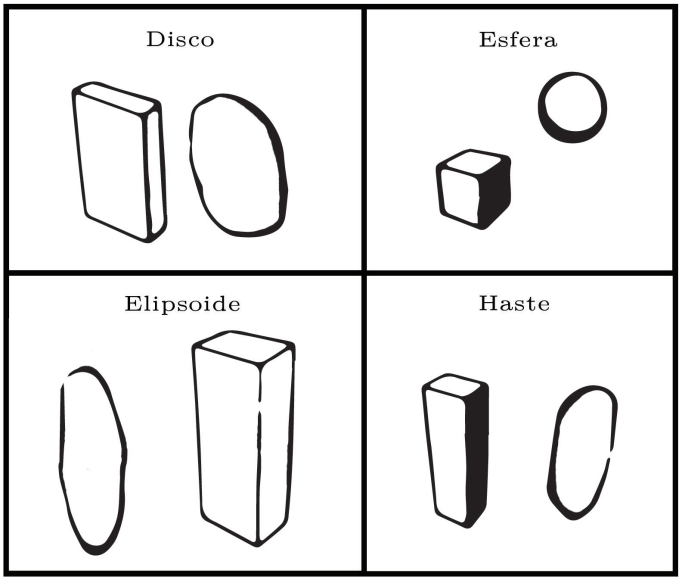
Para os poros intra-agregados (Equação 10), que são poros localizados dentro dos agregados:

$$INTRA(\%) = \frac{V_{mi} + V_{me}}{V_t - V_m}100 \tag{10}$$

Para cada amostra foi medido o número (N) e valores médios (NP) dos mesoporos, no qual foram classificados nos seguintes intervalos: 0-0,001; 0,001-0,01; 0,01-0,1; 0,1-1; 1-10; 10-100; 100-1000 e >1000mm^3 numa escala logarítmica.

Os mesoporos também foram classificados por sua forma. A classificação utilizada para os mesoporos foi a proposta por Zingg (1935), modificada por Brewer (1964) e com a terminologia de Bullock et al. (1985). Os poros foram classificados de acordo com os seguintes formatos: Complexo, Disco, Haste, Esférico e Elipsoide (Figura 22). Quando, no mínimo. um dos eixos não é identificado, os poros são classificados como Complexos. Para chegar a essa classificação, são utilizadas as razões entre os eixos (Tabela 7).

Figura 22 – Classificação dos poros baseado no formato. Adaptado de Bullock et al. (1985).



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

Tabela 7 – Classificação dos poros de acordo com seu formato e condições utilizadas para definir parâmetros de acordo com o eixo que intercepta os poros.

Forma	**Parâmetros**
Esfera (ESF)	$\geq 2/3 \geq 2/3$
Haste (HAT)	$< 2/3 \geq 2/3$
Disco (DSC)	$\geq 2/3 < 2/3$
Elipsoide (ELP)	$< 2/3 <$

Fonte: Costa et al. (2016).

Quanto a orientação dos poros (Tabela 8), elas foram baseadas nos ângulos comuns, entre 0° e 180° no plano da imagem (y e z) (DOWUONA; TAINA; HECK, 2009; TAINA;

HECK; DEEN et al., 2013).

Tabela 8 – Classificação dos poros quanto a sua orientação no plano y e z.

Orientação	**Graus (°)**
Quase Horizontal	0-15 e 165-180
Inclinado - Horizontal	15-30 e 150-165
Inclinado	30-60 e 120-165
Vertical - Inclinado	60-75 e 105-120
Quase Vertical	75-105

Fonte: Dowuona, Taina e Heck (2009) e Taina, Heck, Deen et al. (2013).

4.5 SEMIVARIÂNCIA

A mascara gerada pela segmentação precisa ser preparada para a aplicação do plugin semivariogram, onde os voxels que não serão analisados, são convertidos em Not a Number, em 'não número', por meio do plugin NaN Converter.

Para a análise da variabilidade espacial das imagens, foi utilizado o *plugin* semivariogram para *ImageJ* baseado na seguinte equação 11:

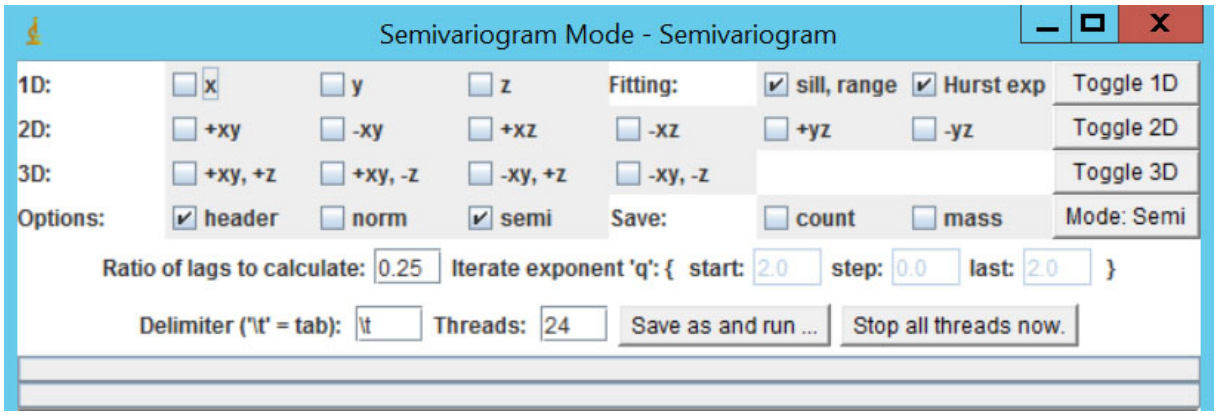
$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^{n} (Z_i - Z_{i+h})^2 \tag{11}$$

onde, h é a distância (lag) entre um par de pontos, cada par de pontos é indicado por (Z_i- $Z_{(i+h)}$) por um total de n pares que podem ser contados em uma dada direção (TAINA; HECK; DEEN et al., 2013; JEFFERIES et al., 2014).

Para ser gerado o semivariograma utilizou uma imagem com os poros e sólidos mascarados, em que as fases identificadas como poros e sólidos foram igualadas a Not a Number (NAN, do inglês: não é um número). Com isso, os poros e sólidos não foram incluídos nos cálculos, somente a matriz, já que a finalidade era estudar a estrutura do solo, esta que existe na parte considerada da matriz do solo.

Foi determinado a 25% da distância máxima na dimensão menor das imagens. Os dados foram normalizados para o estudo da anisiotropia da estrutura do semivariograma, isso foi feito da seguinte forma: o valor total do semivariograma foi dividido pela variância total da amostra, onde mostrou os valores de semivariância como uma razão de toda a variância (Figura 23).

Figura 23 – *Plugin* Semivariance.



Fonte: Print screen da aplicação no sistema operacional Windows 10.

Utilizando dados parametrizados do semivariograma, cada distância de lag foi representada por um ponto em um plano cartesiano tridimensional (x, y, z), assim é possível calcular a anisotropia direcional. Cada plano (x, y, z) correspondeu a sua distância específica de lag. Por meio da parametrização que é feita a comparação anisiotrópica entre amostras.

Uma nova curva foi calculada quando a menor distância de um ponto a cada distância lag de um vetor euclidiano resultava em todos os componentes tendo uma curva de 1. Se todas as linhas fossem retas com valores iguais a 0 em todas as distâncias de lag, isso significaria uma isotropia entre todos os semivariogramas ortogonais.

Utilizando a matriz para esses dados é possível analisar microporos que não podem ser observados por causa da resolução da imagem (JEFFERIES et al., 2014).

Com os dados resultantes, foi possível montar o semivariograma e analisar sua anisotropia e calcular parâmetros por meio do valor das seguintes expressões: RVF (12), RSF (13), FDO (14) e SDT (15).

$$RVF = \frac{\text{Variância}}{y_1} \tag{12}$$

$$RSF = \frac{y_2}{y_1} \tag{13}$$

$$FDO = \frac{(y_2 - y_1)}{h} \tag{14}$$

$$SDT = \frac{(y_4 - 2y_3 + y_2)}{h^2} \tag{15}$$

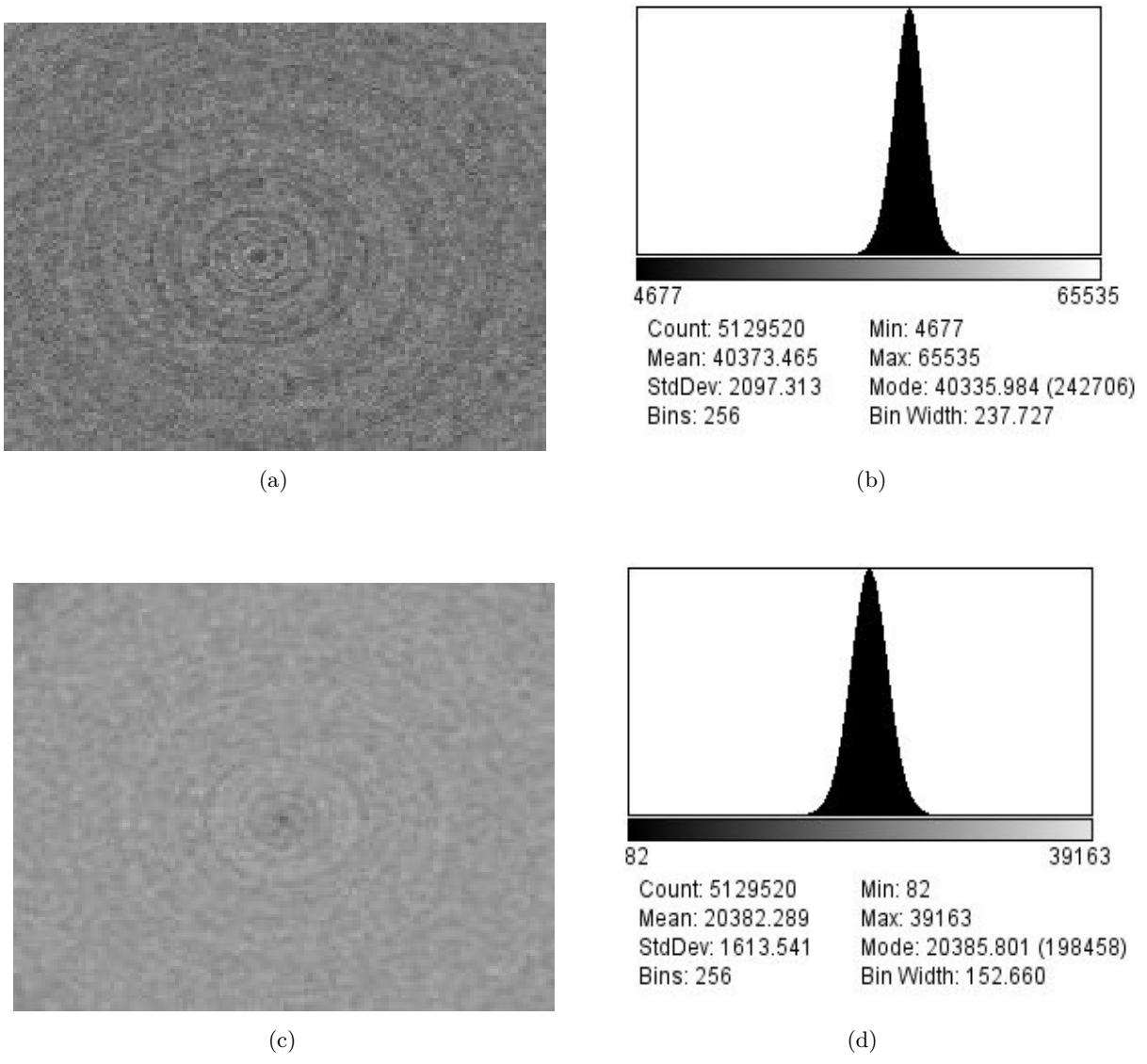
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir serão apresentados os resultados e discussão desta pesquisa.

5.1 IMAGEAMENTO

Para a correta calibração, são necessários o maior e o menor valor de cinza do *phantom* e sua média (Figura 24). Com esses valores, é possível reconstruir o solo, maiores detalhes na Tabela 9.

Figura 24 – a) ROI da água; b) Histograma da Água; c) ROI do ar e d) Histograma do ar.



(a) (b)

(c) (d)

Fonte: Print screen da aplicação no sistema operacional Windows XP.

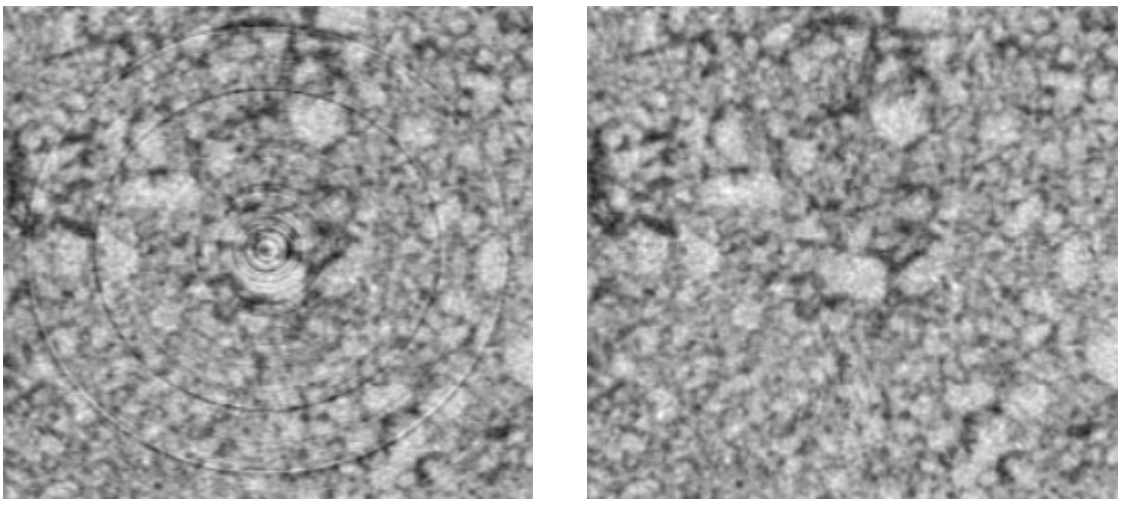
Tabela 9 – Dados necessários para a calibração e seu resultado.

Dados do VGStudio	
	x10^5
Menor Valor de Cinza	-18
Maior Valor de Cinza	40
Dados do ImageJ	
	Média
Ar	20382
Água	40373
Dados para Calibração	
Menor Valor de Cinza	0,23
Maior Valor de Cinza	1.142

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na figura abaixo se encontra a imagem reconstruída (Figura 25, a), utilizando os dados de calibração, em unidades Hounsfield e com a aplicação do filtro de Gauss. Como mencionado, foi notada a presença de artefatos de anéis, na Figura 25 pode ser observado o antes e depois da correção dos artefatos.

Figura 25 – Imagem a) antes e b) depois da correção dos artefatos.

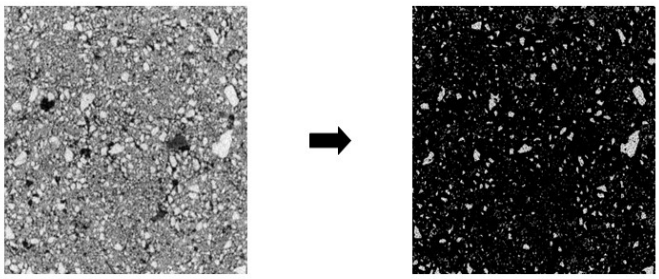


(a) (b)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Com a imagem sem artefatos, é iniciada a segmentação, começando pelo refinamento do seu histograma com o *plugin* PVE (Figura 26).

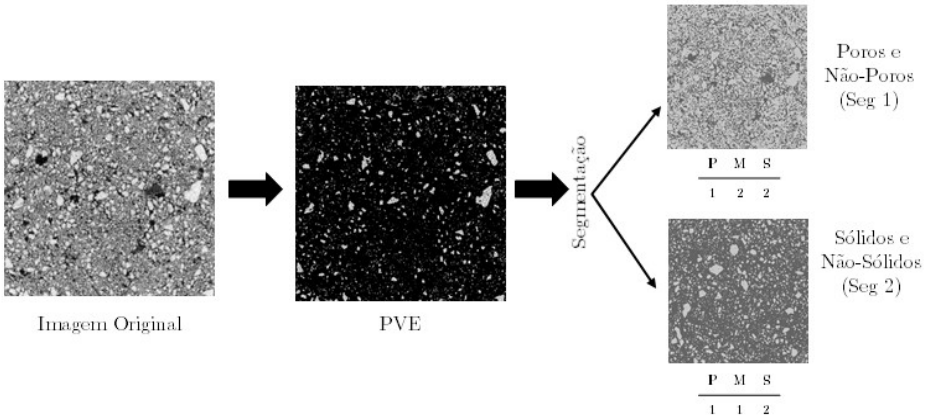
Figura 26 – Mostra a imagem original e após a aplicação do PVE.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A imagem pode ser segmentada utilizando os picos encontrados no MathLab. Ela foi segmentada em Poros (1) e Não Poros (2,2), que são os sólidos e a matriz e em Sólidos (2) e não sólidos (1 ,1), que são os poros e a matriz (27).

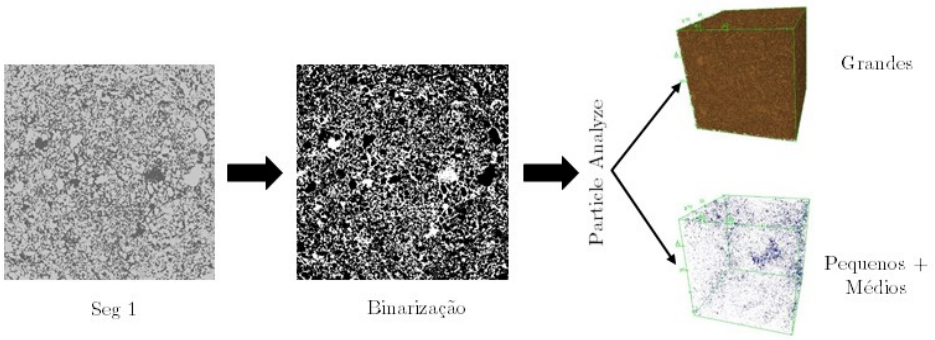
Figura 27 – Mostra a imagem original, após a aplicação do PVE e a segmentação.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O Seg1 foi binarizado utilizando o *plugin* Large Bidwidth Threshold (LBT) e em seguida foi aplucado o Particle Analyze (PA), resultando na Figura 28 abaixo.

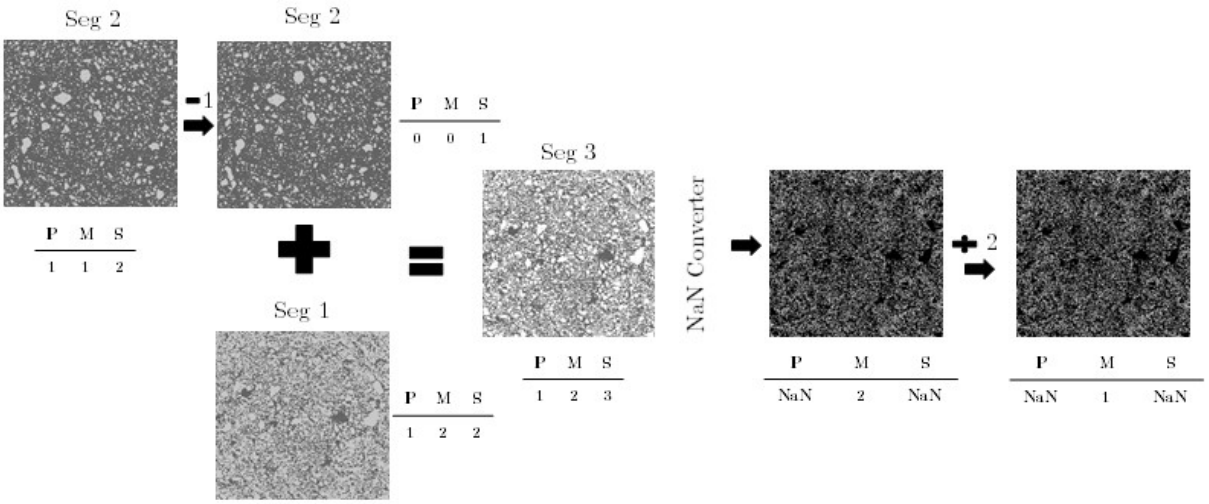
Figura 28 – Resultado do LBT (Binarização) e do Particle Analyze (poros grandes, pequenos e médios).



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para a máscara final ser formada (Seg3), é necessário que Seg2 passe por algumas etapas, no qual foi subtraído 1, onde na imagem foi representado os sólidos (1), após isso, Seg1 e Seg2 são somados, resultando assim em Seg3. Em Seg3, os poros são representados por 1, a Matriz por 2 e os Sólidos por 3. Para que possa ser feito o semivariograma em cima da matriz, o plugin NaN foi utilizado duas vezes, a primeira com o valor 1 (poros) a segunda com a valor 3 (sólido), onde somente a matriz é identificada na imagem. Todas as máscaras assim ficaram prontas para serem utilizadas na imagem original (Figura 29).

Figura 29 – Resultado com a máscara final.



Fonte: Elaborada pelo autor.

5.2 POROSIDADE

Os resultados da análise utilizando o Particle Analyse mostram que, em geral, a média dos valores de porosidade relacionados aos microporos, mesoporos e macroporos,

são maiores para a superfície nos quatro perfis. Dentro de cada perfil, abaixo da superfície, a profundidade C se apresenta com a maior porosidade, somente diferindo o P4. É a partir da profundidade B (P1, P2 e P3) que foi encontrada a maior quantidade de lamelas (Tabela 10).

Tabela 10 – Atributos físicos dos perfis de solo (P1,P2,P3 e P4) obtidos com a aplicação de Microtomografia Computadorizada de Raios X.

PERFIL	Amostra	PROF.	P.	AG	P.INTER	P. INTRA
		cm			Média (%)	
P1	S	0,0-7,5	41,78	58,27	41,73	0,08
	A	10-17,5	28,47	71,78	28,22	0,35
	B	21-28,5	31,14	69,13	30,87	0,41
	C	31-37,5	34,92	65,19	34,81	0,17
P2	S	0,0-7,5	40,26	59,78	40,22	0,07
	A	10-17,5	31,79	68,30	31,70	0,13
	B	21-28,5	32,28	67,87	32,13	0,22
	C	31-37,5	35,38	64,80	35,20	0,27
P3	S	0,0-7,5	43,69	56,34	43,66	0,06
	A	10-17,5	37,10	63,08	36,92	0,28
	B	21-28,5	32,97	67,32	32,68	0,42
	C	31-37,5	34,49	65,66	34,34	0,23
P4	S	0,0-7,5	43,42	56,61	43,39	0,05
	A	10-17,5	37,75	62,38	37,62	0,20
	B	21-28,5	28,77	72,25	27,75	1,39

Profundidade (PROF), porosidade (P), agregados (AG), poros inter-agregados (P.INTER) e poros intra-agregados (P. INTRA) dos solos.

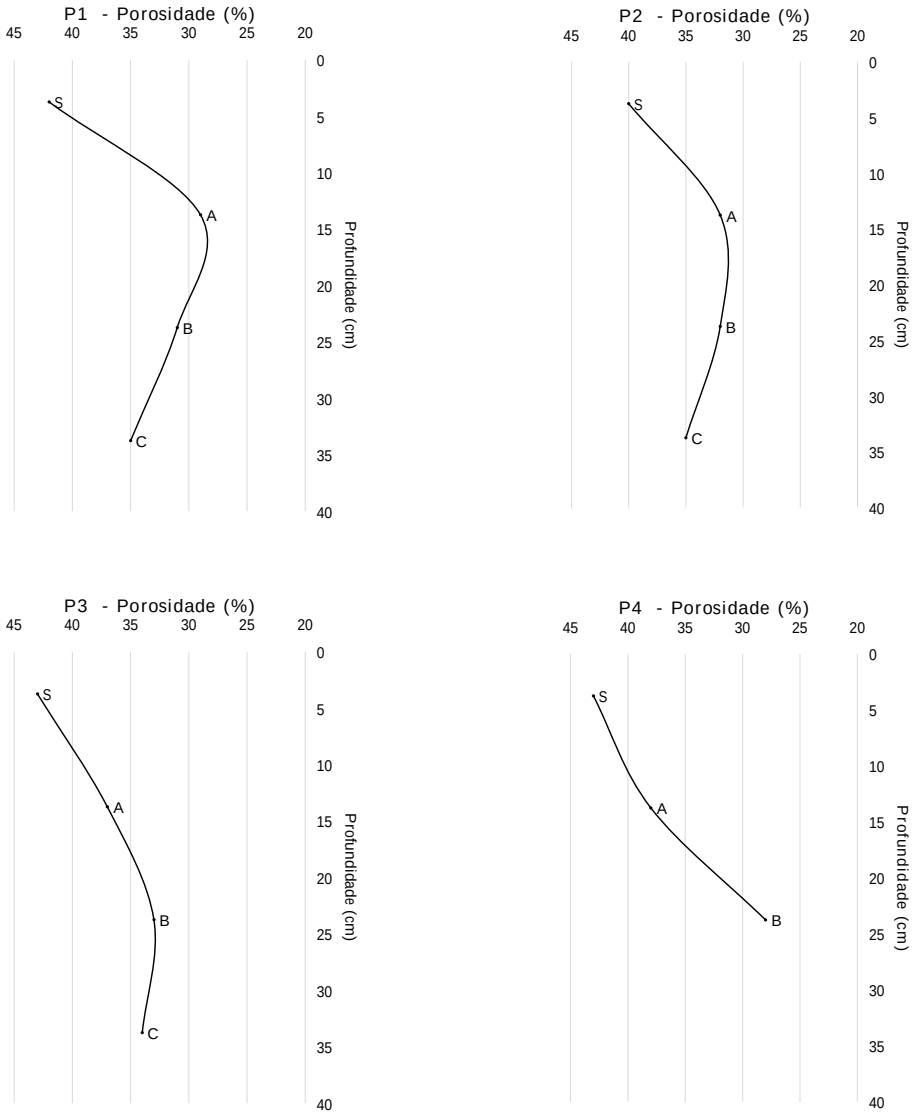
Fonte: Elaborada pelo autor.

A porosidade foi menor nas profundidades A, B e C, quando comparada com outros trabalhos como Santos et al. (2012), que apresentou uma porosidade média de 40%; Da Silva et al. (2014) que encontraram uma média de 46% de porosidade e Almeida et al. (2015) com 43% de porosidade média para o mesmo tipo solo.

Isso se deve a uma limitação na análise das imagens, que não avaliam a porosidade de um volume inferior ao do voxel da imagem (0,05x0,05x0,05mm), nesse caso 1,25x$10^{-5}mm^3$. A mesma limitação foi atestada por Costa et al. (2016).

Pode-se observar que para o Nre, a porosidade diminui inicialmente (profundidade A) a partir da superfície e vai aumentando com a profundidade do perfil, o inverso acontece para o Aas (Figura 30).

Figura 30 – Porosidade dentro de cada perfil (P1,P2,P3 e P4).

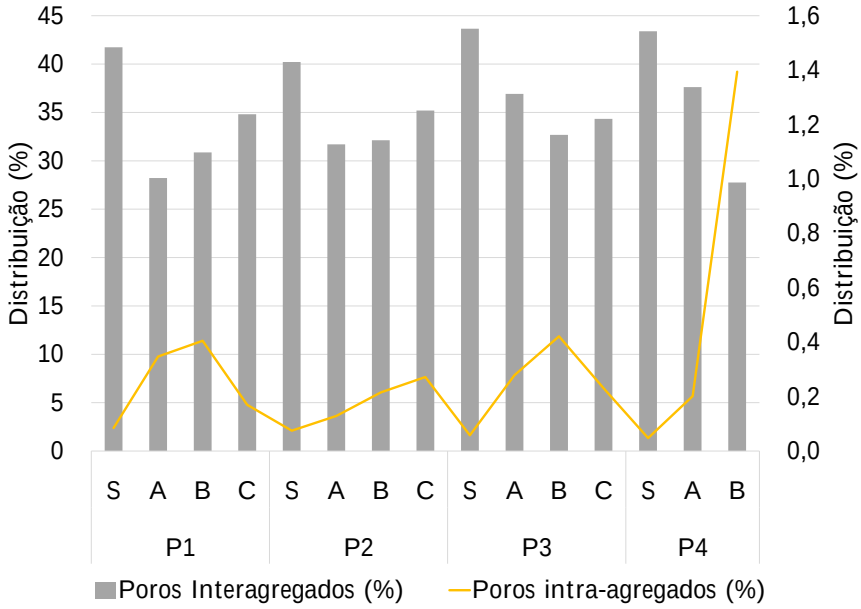


Fonte: Elaborada pelo autor.

Os poros interagregados se referem aos macroporos, e os poros intra-agregados, se referem aos microporos; sendo assim é esperado com o Nre por ser arenoso, possua uma maior porcentagem de macroporos, consequentemente de interagregados, o que pode ser visto na superfícia para o P3.

Nas profundidades onde havia uma maior concentração de lamelas que foram identificadas na hora da coleta, como a profundidade B do P1, B e C do P2 e B do P3, há uma maior porcentagem de intra-agregados. O P4 possui o maior valor de interagregados, isso pode ser explicado por ser um solo argiloso, possuindo assim uma maior quantidade de microporos (Figura 31).

Figura 31 – Distribuição dos poros interagregados (cinza) e dos poros intra-agregados (amarelo) para o NRe nos perfis 1, 2 e 3, e o Aas no perfil 4.

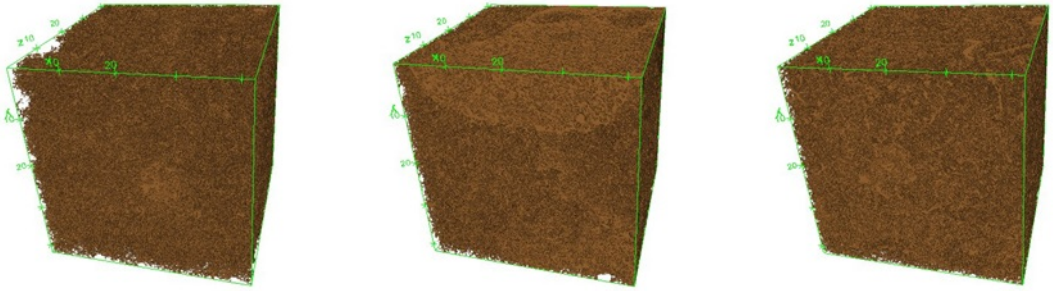


Fonte: Elaborada pelo autor.

Um valor alto de intra-agregados a partir da profundidade A pode ser explicado pela compactação do solo. Sampietro, Silva Lopes e Reichert (2015) encontraram uma menor porosidade (41%) para o Nre numa profundidade entre 15-30 cm, quando comparada com a superfície (46%), explicada pela compactação. A área de coleta tem como manejo duas gradagens, então uma compactação pelo uso de maquinário agrícola é possível.

De acordo com Costa et al. (2016), solos arenosos por terem uma macroporosidade maior apresentam uma rede contínua. O que se retrata nos poros interagregados da Figura 32, uma rede maior e contínua de poros. Um forte indicador de qualidade do solo é a formação de agregados, eles determinam a retenção e transporte no solo de água, gás e nutrientes (ZHOU et al., 2013).

Figura 32 – Espaço poroso interagregados do Nre: a) Profunidade A, b) Profundidade B e c) Profundidade C.

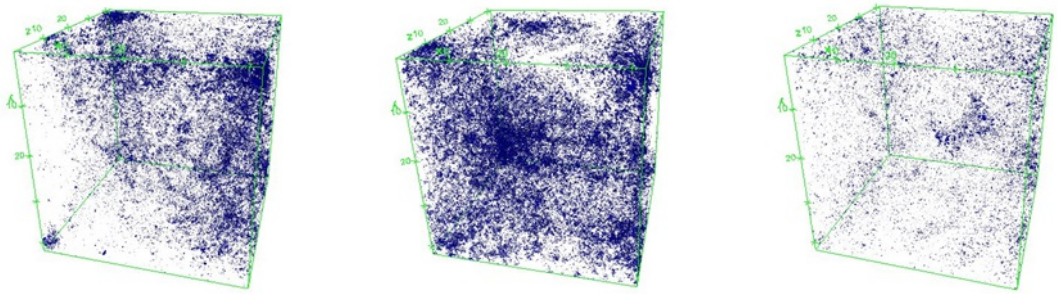


(a) (b) (c)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Devido a uma baixa agregação das partículas, o NRe chegou a apresentar valores de intra-agregados menores do que 1%, para todas as profundidades (Figura 33).

Figura 33 – Espaço poroso intra-agregados do Nre: a) Profundidade A, b) Profundidade B e d) Profundidade C.



(a) (b) (c)

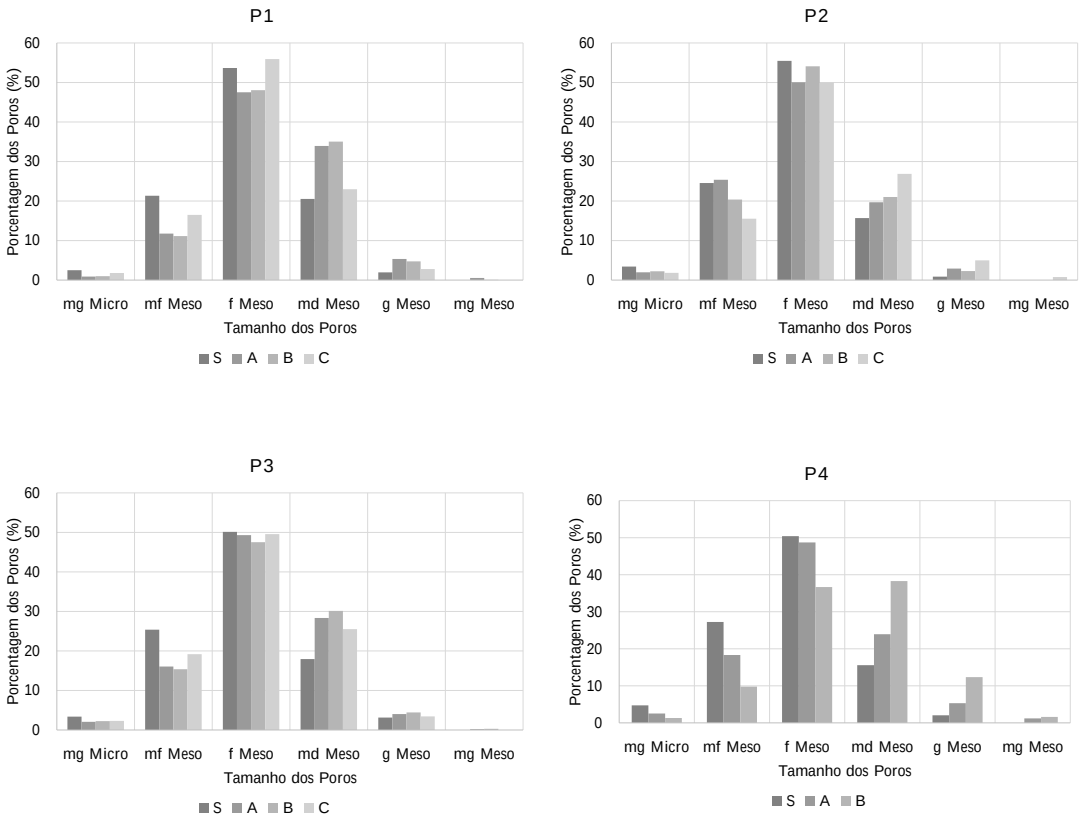
Fonte: Elaborada pelo autor.

5.2.1 Tamanho do Poro

Na Figura 34 estão os resultados da distribuição dos micro e mesoporos em intervalo de tamanho para a pedosequência. Devido à limitação da resolução, os microporos podem não ter sido bem representados visto que são menores que os volumes dos voxels da imagem ($1{,}25\text{x}10^{-5} mm^3$).

Foi possível visualizar na coleta que a maior concentração de lamelas para os perfis 1, 2 e 3, se encontravam abaixo da profundidade A. O que explicaria a profundidade C, para os perfis 1 E 3, possuir uma maior porcentagem de poros menores.

Figura 34 – Porcentagem dos poros em relação ao tamanho, nas profundidades A, B e C.

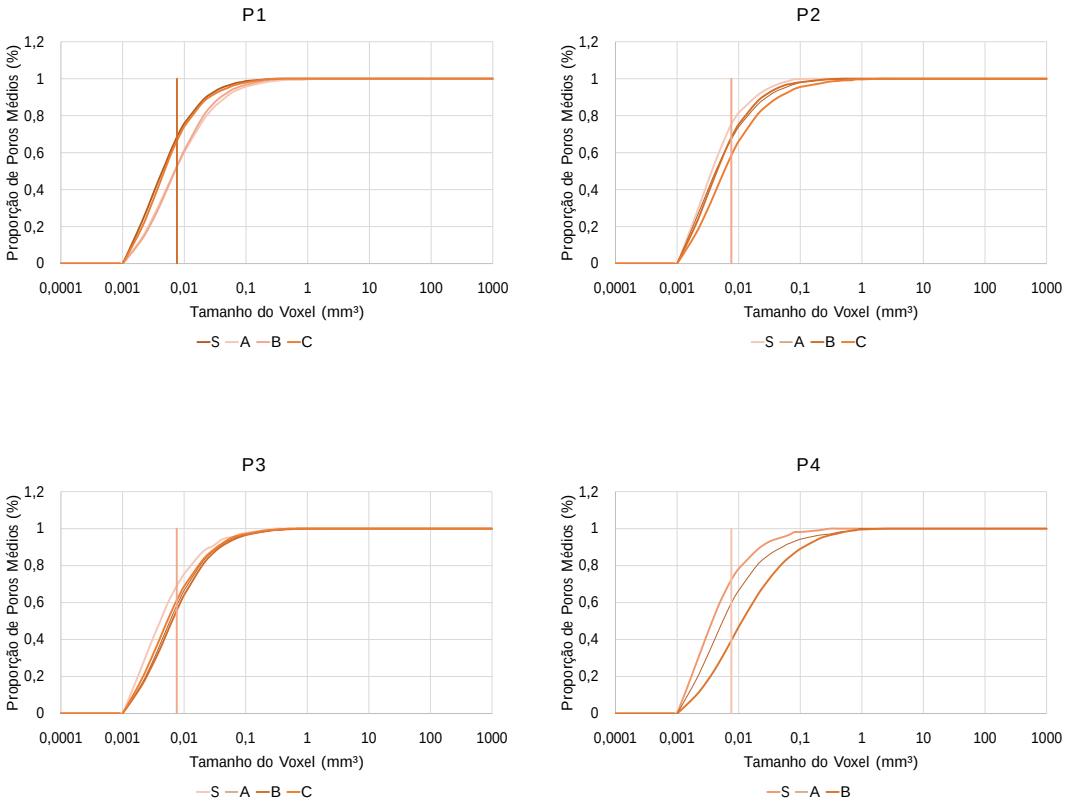


Fonte: Elaborada pelo autor.

De acordo com Abreu, Reichert e Reinert (2004), ao estudar um argissolo franco-arenoso, que é um solo com baixa macroporosidade e alta microporosidade, que pode ser relacionado à constituição das lamelas (silte e argila), o raio médio dos poros para esse tipo de solo é de 0,148mm, dando assim um volume de 0,0076mm^3, quando considerado o poro como uma esfera.

Analisando os dados de proporção de poros em relação ao tamanho do voxel (Figura 35), vemos que 7% dos tamanhos dos poros de A se encontram abaixo do intervalo de 0,008mm^3, enquanto que para A e B, o valor é de 55%. Isso mostra que a maior porcentagem de intra-agregados em C está abaixo do intervalo mencionado, do que para A e B, devido a presença de uma maior quantidade de lamelas.

Figura 35 – Proporção dos poros em relação ao tamanho do voxel.



Fonte: Elaborada pelo autor.

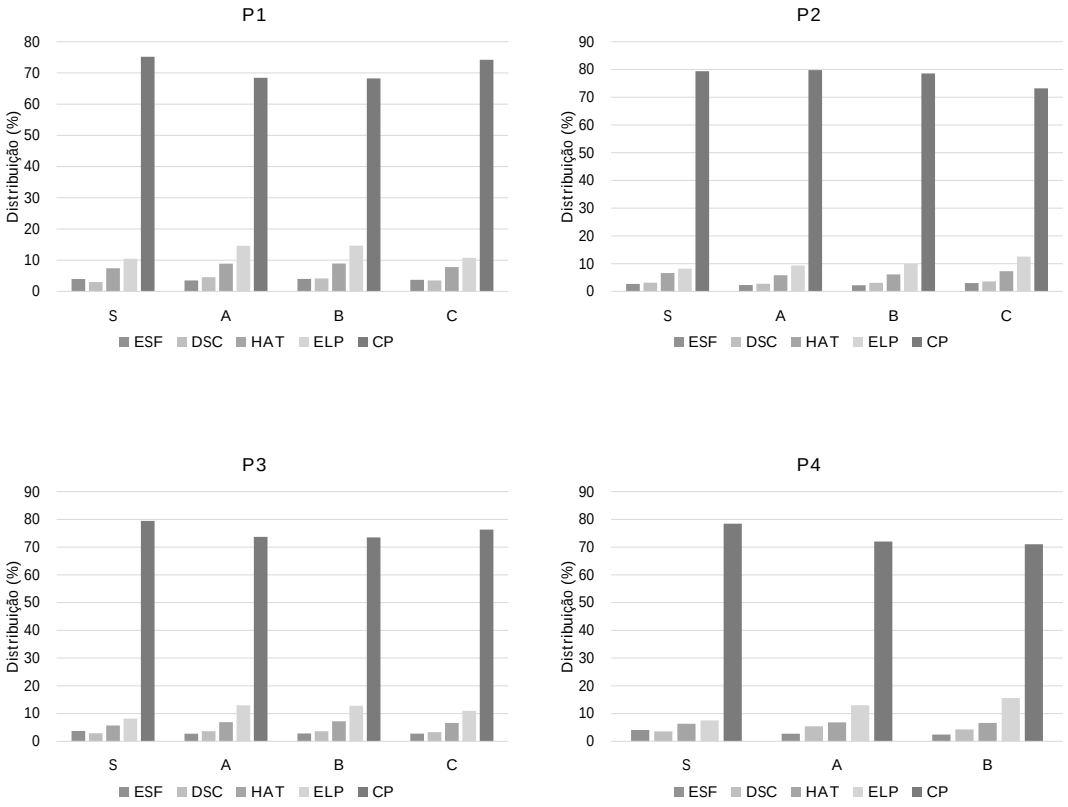
5.2.2 Forma do Poro

Na Figura 36 se encontra a distribuição dos formatos dos poros dos solos, todos apresentaram com maior quantidade o formato complexo, em todas as profundidades em todos os perfis.

De acordo com Passoni et al. (2015) poros esféricos representam baixa conectividade, enquanto os complexos indicam alta conectividade dos poros. Souza et al. (2006) completam que alta conectividade de poros pode significar maior movimentação de água ao longo do perfil.

A segunda e terceira maior porcentagem são de formatos haste e elipsoides, que são indicativos de que houve uma quebra na continuidade dos poros complexos (ARASAN; AKBULUT; HASILOGLU, 2011).

Figura 36 – Distribuição dos formatos dos poros dos solos.



Fonte: Elaborada pelo autor.

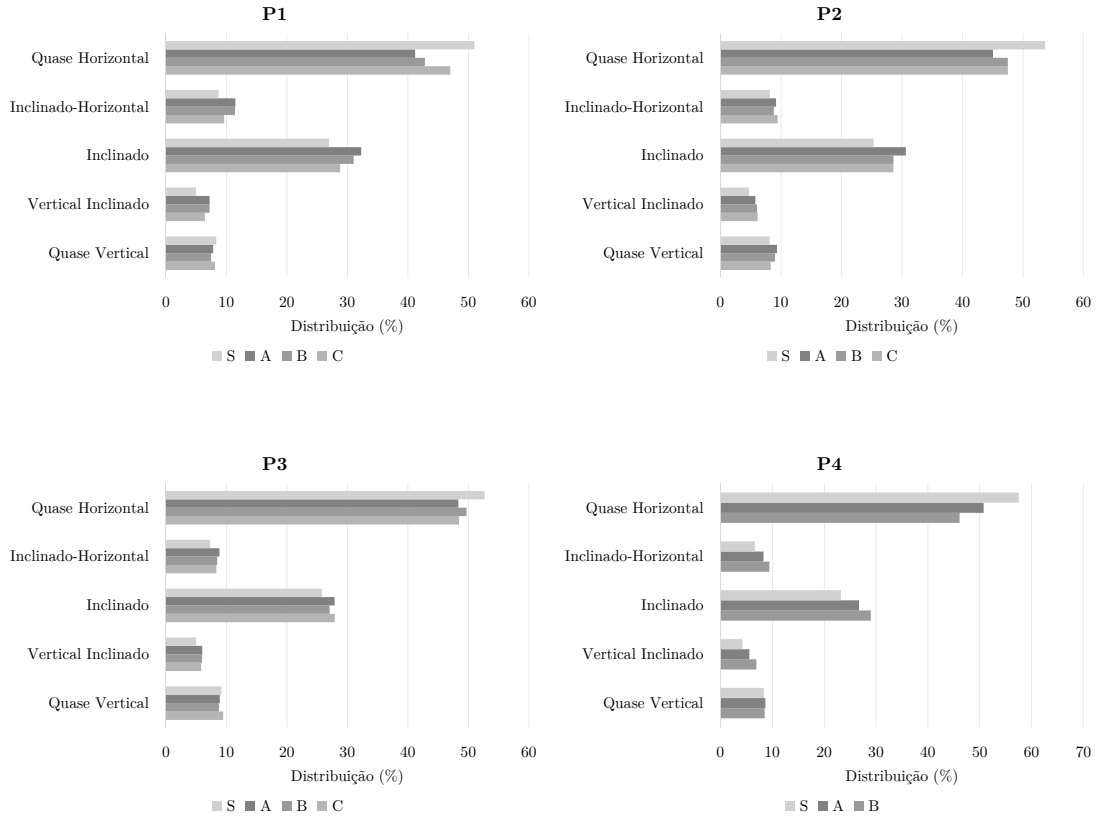
5.2.3 Orientação do Poro

Para a análise da orientação dos poros foram considerados considerou os micro e mesoporos.

Uma grande parte dos micro e mesoporos mostraram uma orientação quase horizontal (Figura 37), dentre as profundidades, a superfície se mostrou com a maior proporção. Uma maior quantidade de poros horizontais pode ser explicada por uma presença maior de sólidos (DOWUONA; TAINA; HECK, 2009).

Uma maior proporção de poros inclinados dentre os perfis, pode ter como origem a compactação (TAINA; HECK; DEEN et al., 2013), a partir da profundidade A. A superfície tem uma maior compactação provavelmente pelo uso de maquinário agrícola (SAMPIETRO; SILVA LOPES; REICHERT, 2015).

Figura 37 – Distribuição da orientação dos poros dos solos.



Fonte: Elaborada pelo autor.

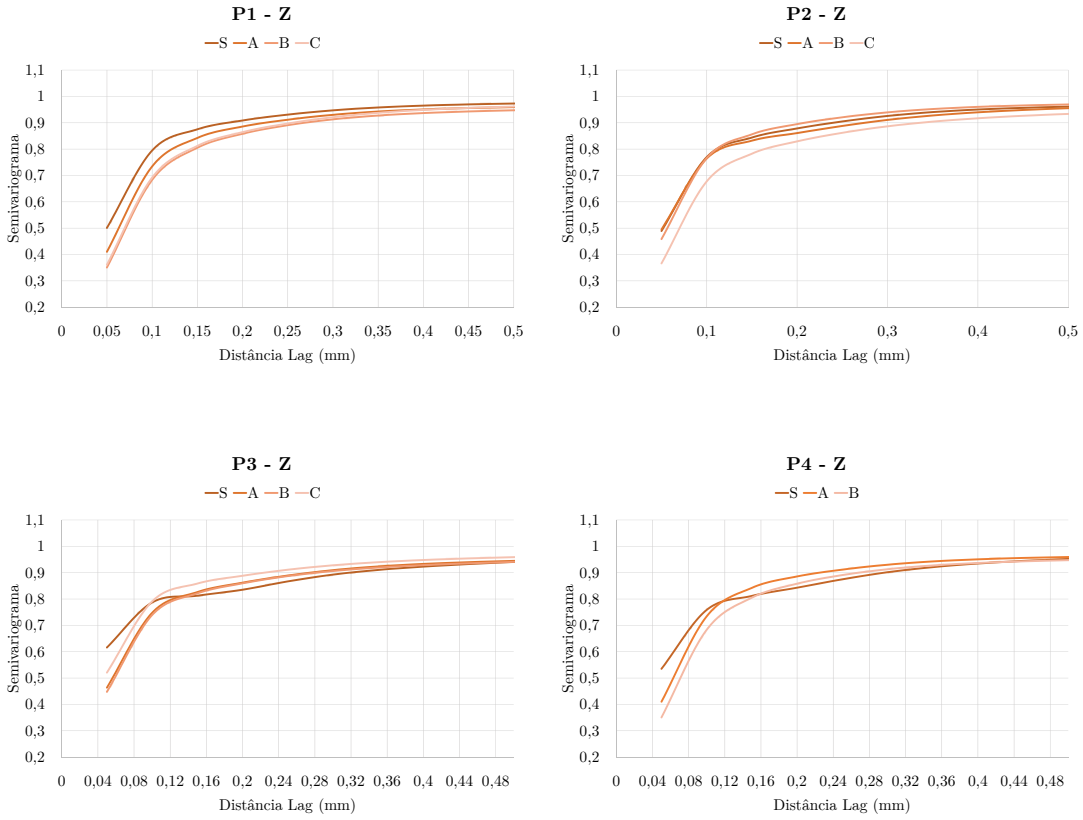
5.3 SEMIVARIOGRAMA

Os semivariogramas indicaram uma estacionaridade de segunda ordem nas profundidades estudadas, refletidas por um alcance claro e bem definido a partir do lag 0,5 mm. Dessa forma foi possível a identificação das dependências espaciais nas direções ortogonais X, Y e Z das imagens na escala de cinza em 3D.

Dessa maneira, os parâmetros necessários para o estudo da variabilidade espacial da estrutura e suas características foram definidas. Eles foram obtidos com cada nível de profundidade combinados com os eixos (X, Y e Z) das imagens em 3D. Assim, foi possível avaliar alterações promovidas pelas lamelas em especial no Z, que será discutido.

Nas figuras 38 estão os semivariogramas dos perfis na direção Z até a distância de lag de 0,5mm, onde as curvas se unem. Na direção X, a profundidade C apresentou a menor anistropia para P2, já para o P1, P3 e o P4, a menor anistropia ficou por conta da profundidade B.

Figura 38 – Semivariogram no eixo Z para a pedosequência.



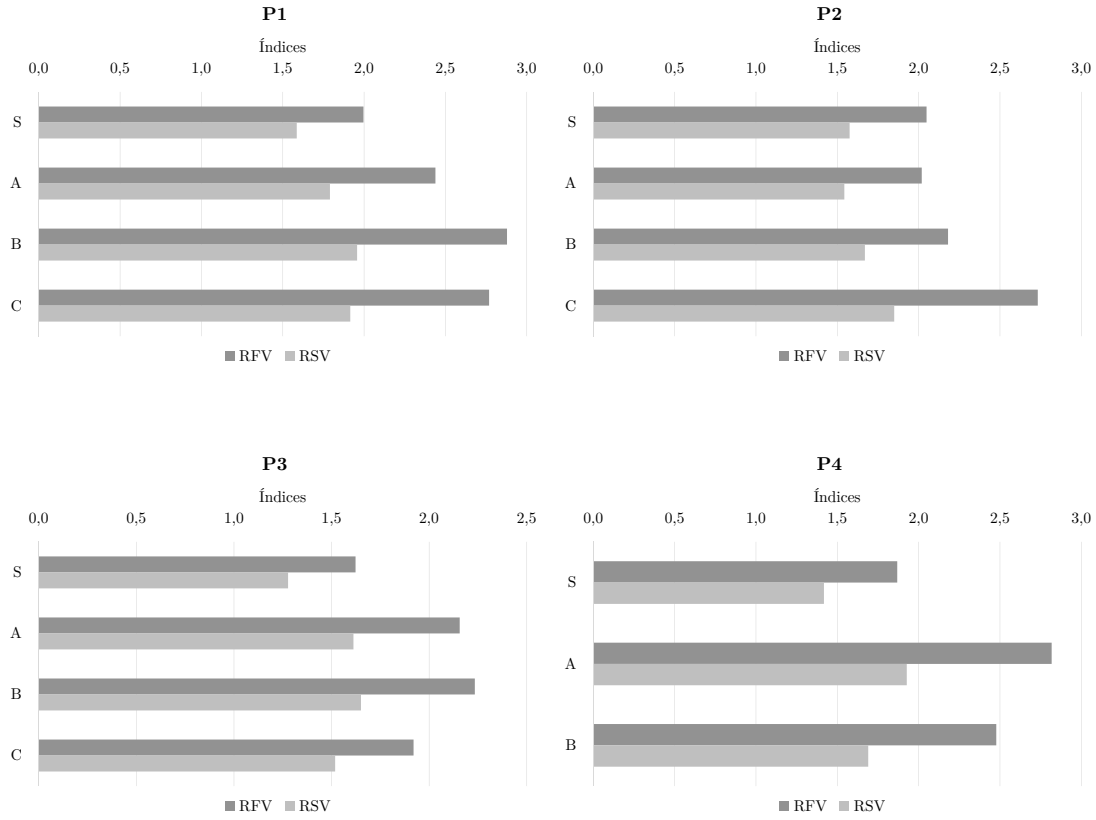
Fonte: Elaborada pelo autor.

O semivariograma está refletindo assim a quantidade de intra-agregados, quanto menor a anistropia, maior o valor de intra-agregados. É também a partir desta profundidade que é notada a presença de lamelas nos perfis, atribuindo uma maior estrutura nos perfis.

A maior anistropia para as três direções nos quatro perfis é da superfície para as três direções no P1 para todo o semivariograma, para os demais, há uma inversão, onde a profundidade A passa a ter uma anisotropia maior.

Com o objetivo de descrever melhor a variabilidade estrutural, Balaguer et al. (2010) propôs mais parâmetros para o semivariograma (Figura 39).

Figura 39 – Parâmetro RFV e RSV para o eixo Z.



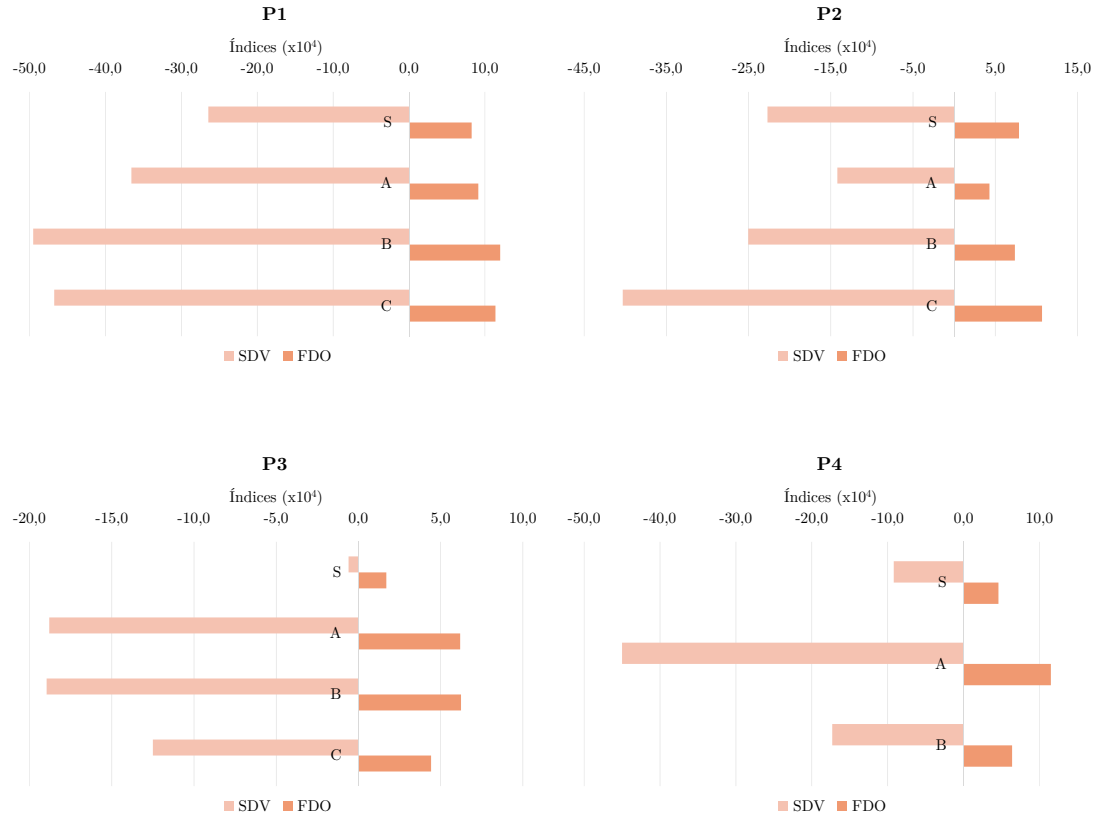
Fonte: Elaborada pelo autor.

De acordo com Winstone et al. (2019), quando não há diferença significativa nos valores de RSV é sugerida a semelhança estrutural na escala um pouco acima da resolução da imagem. Pode-se averiguar que os valores de RSV variam com a profundidade, chegando a aumentar até a profundidade B, indicando uma diferença estrutural entre eles.

Ainda de acordo com Winstone et al. (2019), quanto menor o valor de RFV, maior a variabilidade da radiodensidade na ou abaixo do tamanho do voxel. É constatado que S possui assim a maior variabilidade em todos os perfis, como a porcentagem de porosidade analisada nos perfis.

Os valores de FDO (Figura 40) foram maiores dentro do P1 para a profundidade B, no P2 para C, no P3, A e B foram semelhantes e no P4 foi maior para a profundidade A. Esse parâmetro se mostrou o mais próximo de como as lamelas influenciam na estrutura do solo, pois quanto maior o valor de FDO, mais heterogêneo é considerado a estrutura (SILVEIRA et al., 2017).

Figura 40 – Parâmetro SDV e FDO para o eixo Z.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O parâmetro SDV (Figura 40) quantifica o nível da concavidade ou convexidade do semivariograma a curtas distâncias, quando apresenta valores negativos, significa um semivariograma convexo, ocasionando assim imagens heterogênas (SILVEIRA et al., 2017). Então quanto menor o valor, mais convexo, e consequentemente mais heterogêneo.

Dentro do P1, a profundidade B foi a mais convexa, para o P2, foi a profundidade C, para o P3, as profundidades A e B, e para o P4, a profundidade A. O perfil mais heterogêneo foi o P1, onde na profundidade B se encontram as lamelas.

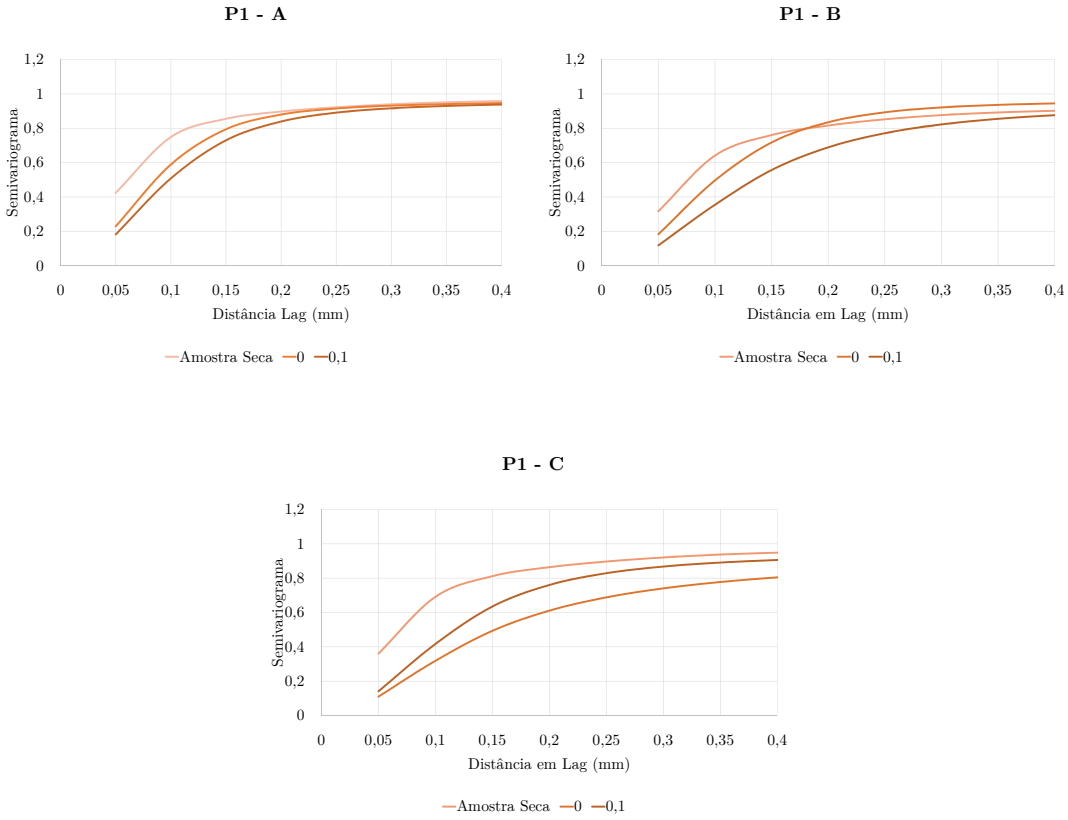
Assim como para as amostras secas, os semivariogramas das amostras úmidas mostraram uma estacionaridade de segunda ordem a partir do lag 0,4 mm. Onde foram identificadas as dependências espaciais numa comparação entre amostras secas e úmidas do P1 nas profundidades A, B e C, com as amostras úmidas saturadas e na pressão de 0,1 bar, na direção ortogonal Z, pois a mesma pode representar melhor as mudanças estruturais no solo.

Foi notada uma maior anistropia para a amostra seca em todas as profundidades. Winstone et al. (2019) afirma que quanto maior a anisotropia, maior a porosidade. É visto que a profundidade B, onde se encontram as lamelas se mostra diferente das outras, com

curvas mais próximas entre a amostra seca e úmida. Mostrando que nessa profundidade o solo está mais estruturado quando na presença de água.

Na Figura 41 podemos ver a comparação entre os semivariogramas das amostras secas e úmidas para o perfil 1.

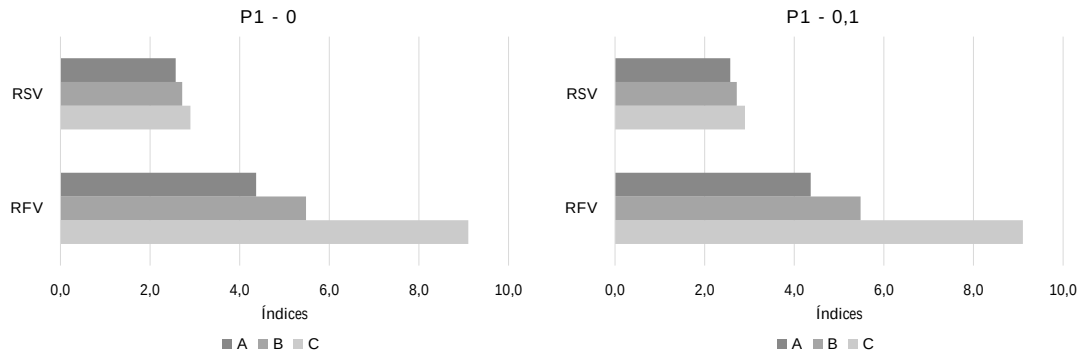
Figura 41 – Semivariograma para o eixo Z em amostras úmidas de solo.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Assim como para as amostras secas, as amostras úmidas se mostram com variações estruturais, por apresentarem um aumento progressivo dos parâmetros RFV e RSV entre as profundidades. Para o RFV (Figura 42, é possível observar que o menor valor de RFV fica para a profundidade A, sendo assim a profundidade com a maior variabilidade.

Figura 42 – Parâmetro RFV e RSV para o eixo Z para as amostras úmidas.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O FDO (Figura 43) se mostrou mais heterogêneo para a profundidade B, seus valores foram maiores quando em paralelo com a amostra seca, o que denota uma maior heterogeneidade na presença das lamelas. Quanto ao SDV, assim como o FDO, ele se mostrou mais heterogêneo para a profundidade B, com valores mais baixos do que as amostras secas.

Figura 43 – Parâmetro SDV e FDO para o eixo Z.

Fonte: Elaborada pelo autor.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A superfície do solo mostrou-se com maior porosidade do que as outras profundidades. Isso pode ser explicado devido a compactação que ocorre em consequência uso de maquinário agrícola.

Os interagregados e intra-agregados se mostraram coerentes com os solos analisados. O Nre mostrou uma maior porcentagem de interagregados e no Aas uma maior porcentagem foi de intra-agregados.

O tamanho dos poros foi o parâmetro que se destacou na identificação da presença das lamelas a partir da profundidade B, com uma maior porcentagem de poros menores. Houve uma alta conectividade dos poros, principalmente para o Nre, devido à sua natureza arenosa. Considerando a orientação dos poros, a compactação afetou mais uma vez o solo, com uma maior porcentagem de poros quase horizontais e inclinados em relação a sua superfície.

Os semivariogramas foram importantes no estudo das lamelas, assim como no comportamento da estrutura do solo na presença de água. Os semivariogramas na direção X, refletiram a quantidade de intra-agregados, com uma baixa anisotropia para as profundidades afetadas pela lamela.

Considerando os parâmetros RSV, RFV, FDO e SDV foi possível visualizar a heterogeneidade que as profundidades que representavam as lamelas apresentaram. O RSV foi capaz de avaliar a diferença em estruturas, o RFV foi reflexo da porosidade. O FDO foi o parâmetro que mais se mostrou influenciável pelas lamelas, com valores altos e o SDV, confirmou o RSV, representando a heterogeneidade das profundidades.

Na presença de água as amostras apresentaram uma maior anisotropia do que quando seca. Quando úmidas, na profundidade B, onde havia lamelas, o solo se mostrou mais estruturado. Os parâmetros RSV, RFV, FDO E SDV se mostraram completamente diferentes quando úmidas, principalmente na profundidade B.

Pode-se chegar à conclusão que a utilização da microtomografia se mostra muito útil para caracterizar e analisar a microestrutura do solo, onde o Nre se mostrou um solo com pores maiores, mas com menor porosidade e o Aas o oposto; a forma como as lamelas afetam essa estrutura, principalmente na distribuição espacial, quando úmida os parâmetros se mostraram bastante diferentes, principalmente na presença das lamelas, se provando assim, ser uma ferramenta bastante eficiente.

REFERÊNCIAS

ABREU, SL; REICHERT, JM; REINERT, DJ. Escarificação mecânica e biológica para a redução da compactação em Argissolo franco-arenoso sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, SciELO Brasil, v. 28, n. 3, p. 519–531, 2004.

ALARCÓN-JIMÉNEZ, Milton F; CAMACHO-TAMAYO, Jesús H; BERNAL, Jaime H. Management zones based on corn yield and soil physical attributes. **Agronomía Colombiana**, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía, v. 33, n. 3, p. 373–382, 2015.

ALMEIDA, Alison Van Der Linden de et al. Physical, Macro-and Micromorphological Properties of Regosols in the Agreste Meridional Region of Pernambuco, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, SciELO Brasil, v. 39, n. 5, p. 1235–1246, 2015.

ANDRENELLI, MC et al. Field application of pelletized biochar: Short term effect on the hydrological properties of a silty clay loam soil. **Agricultural Water Management**, Elsevier, v. 163, p. 190–196, 2016.

APAC. **Pluviometria do Estado de Pernambuco**. Edição: APAC. 2019. Disponível em: <`http://www.apac.pe.gov.br`>. Acesso em: 6 jan. 2019.

APPOLONI, CR. **Microscanning and microtomography with X-ray tubes**. [S.l.]: Universita Degli Studi di Roma"La Sapienza", 1994.

ARASAN, Seracettin; AKBULUT, Suat; HASILOGLU, A Samet. Effect of particle size and shape on the grain-size distribution using Image analysis. **International journal of civil and structural engineering**, v. 1, n. 4, p. 968–985, 2011.

ARAÚJO FILHO, José Coêlho de. **Horizontes cimentados em Argissolos e Espodossolos dos tabuleiros costeiros e em Neossolos Regolíticos e Planossolos da depressão sertaneja no Nordeste do Brasil**. 2003. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica) – Universidade de São Paulo.

BALAGUER-BESER, A; HERMOSILLA, Txomin et al. Semivariogram calculation optimization for object-oriented image classification. **Modelling in Science Education and Learning**, 2011.

BALAGUER-BESER, A; RUIZ, Luis A et al. Using semivariogram indices to analyse heterogeneity in spatial patterns in remotely sensed images. **Computers & geosciences**, Elsevier, v. 50, p. 115–127, 2013.

BALAGUER, A et al. Definition of a comprehensive set of texture semivariogram features and their evaluation for object-oriented image classification. **Computers & Geosciences**, Elsevier, v. 36, n. 2, p. 231–240, 2010.

BARROS, Katiane Raquel Mendes et al. Distribuição da porosidade textural e estrutural em solos de Terra Preta Arqueológica. **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, n. 4, p. 609–615, 2016.

BDE. **BANCO DE DADOS DO ESTADO DE PERNAMBUCO**. 2018. Disponível em: <http://www.bde.pe.gov.br>. Acesso em: 9 dez. 2018.

BELTRÃO, Breno Augusto et al. **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea**: Estado de Pernambuco: diagnóstico do Município de São João. [S.l.], 2005.

BOCKHEIM, JG; HARTEMINK, AE. Classification and distribution of soils with lamellae in the USA. **Geoderma**, Elsevier, v. 206, p. 92–100, 2013.

BONEJ. **Particle Analyse**. 2019. Disponível em: <http://bonej.org>. Acesso em: 6 jan. 2019.

BRADY, Nyle C. **Natureza e propriedades dos solos**. [S.l.]: Freitas Bastos, 1983.

BREWER, Roy. Fabric and Mineral Analysis of Soils, 1964.

BULLOCK, Peter et al. **Handbook for soil thin section description.** [S.l.]: Waine Research, 1985.

CARDUCCI, Carla Eloize et al. Spatial variability of pores in oxidic latosol under a conservation management system with different gypsium doses. **Ciência e Agrotecnologia**, SciELO Brasil, v. 38, n. 5, p. 445–460, 2014.

CARVALHO, Antonio Carlos Pires. História da Tomografia Computadorizada. **Revista Imagem**, v. 29, n. 2, p. 61–66, 2007.

CARVALHO, Marco A de et al. Composição granulométrica, densidade e porosidade de agregados de Latossolo Vermelho sob duas coberturas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agricola e Ambiental-Agriambi**, v. 18, n. 10, 2014.

CISLEROVÁ, Milena; VOTRUBOVÁ, Jana. CT derived porosity distribution and flow domains. **Journal of Hydrology**, Elsevier, v. 267, n. 3-4, p. 186–200, 2002.

CNUDDE, Veerle; BOONE, Matthieu Nicolaas. High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: A review of the current technology and applications. **Earth-Science Reviews**, Elsevier, v. 123, p. 1–17, 2013.

CONDEPE/FIDEM. **AGÊNCIA ESTADUAL DE PLANEJAMENTO E PESQUISAS DE PERNAMBUCO**. 2018. Disponível em: <http://www.condepefidem.pe.gov.br%3E.>. Acesso em: 9 dez. 2018.

COSTA, Larissa Fernandes et al. Espaço poroso em solos brasileiros usando tomografia computadorizada de raios-X (Porous space in Brazilian soils using X-ray computed tomography). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 9, n. 3, p. 692–706, 2016.

CRESTANA, S; MASCARENHAS, S; POZZI-MUCELLI, RS. Static and dynamic three-dimensional studies of water in soil using computed tomographic scanning1. **Soil Science**, LWW, v. 140, n. 5, p. 326–332, 1985.

CRUVINEL, Paulo Estevão. **Minitomografo de raio-X e raio-gama computadorizado para aplicações multidisciplinares**. 1987. Tese (Doutorado em Automação) – Unicamp.

CRUVINEL, PE et al. X-and gamma-rays computerized minitomograph scanner for soil science. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, IEEE, v. 39, n. 5, p. 745–750, 1990.

CURRAN, Paul J; ATKINSON, Peter M. Geostatistics and remote sensing. **Progress in Physical Geography**, Sage Publications Sage CA: Thousand Oaks, CA, v. 22, n. 1, p. 61–78, 1998.

DA SILVA, Renan Almeida Brito et al. Balanço hídrico em Neossolo Regolítico cultivado com braquiária (Brachiaria decumbens Stapf). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 38, n. 1, 2014.

DEXTER, Anthony Roger; CZYZ, Ewa Antonina et al. A user-friendly water retention function that takes account of the textural and structural pore spaces in soil. **Geoderma**, Elsevier, v. 143, n. 3-4, p. 243–253, 2008.

DEXTER, Anthony Roger; RICHARD, Guy et al. Complexed organic matter controls soil physical properties. **Geoderma**, Elsevier, v. 144, n. 3-4, p. 620–627, 2008.

DONNELLY, E; MOTHE, F. **Polar Transformer**. 2008. Disponível em: <`http://rsbweb.nih.gov/ij/plugins/polar-transformer.html`>. Acesso em: 9 dez. 2018.

DOWUONA, Gabriel NN; TAINA, Ioana A; HECK, Richard J. Porosity analysis of two Acrisols by X-ray computed microtomography. **Soil science**, LWW, v. 174, n. 11, p. 583–593, 2009.

ELLIOT, Thomas R; HECK, Richard J. A comparison of optical and X-ray CT technique for void analysis in soil thin section. **Geoderma**, Elsevier, v. 141, n. 1-2, p. 60–70, 2007.

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. [S.l.: s.n.], 2014. 306 p.

EMMERLING, Christoph; RASSIER, Kirstin M; SCHNEIDER, Raimund. A simple and effective method for linking field investigations of earthworms and water infiltration rate into soil at pedon-scale. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Wiley Online Library, v. 178, n. 6, p. 841–847, 2015.

FANTE JÚNIOR, L et al. Tomografia computadorizada na avaliação da densidade de um solo do semi-árido brasileiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 26, n. 4, 2002.

FIRMINO, Francis Henrique Tenório. **Gênese de lamelas em uma litotopossequência no semiárido brasileiro**. 2016. f. 157. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – UFPE.

GOMES, Rudson Leonette Rodrigues et al. Propriedades físicas e teor de matéria orgânica do solo sob diferentes coberturas vegetais. **Revista Eletrônica Faculdade Montes Belos**, v. 9, n. 1, 2015.

GONÇALVES, Antônio CA et al. Distribution of water in sandy soil applied by drip. **Engenharia Agrícola**, SciELO Brasil, v. 34, n. 6, p. 1175–1185, 2014.

GRAPHICS, Volume. **VGStudio max 2.2**. 2019. Disponível em: <https://www.volumegraphics.com/en/products/vgstudio-max.html>. Acesso em: 6 jan. 2019.

HAINSWORTH, JM; AYLMORE, LAG. Water Extraction by Single Plant Roots 1. **Soil Science Society of America Journal**, Soil Science Society of America, v. 50, n. 4, p. 841–848, 1986.

HARTIG, Sean M. Basic image analysis and manipulation in ImageJ. **Current protocols in molecular biology**, Wiley Online Library, v. 102, n. 1, p. 14–15, 2013.

HIGO, Yosuke; MORISHITA, Ryoichi et al. Local water-retention behaviour of sand during drying and wetting process observed by micro x-ray tomography with trinarisation. **Japanese Geotechnical Society Special Publication**, The Japanese Geotechnical Society, v. 2, n. 16, p. 635–638, 2016.

HIGO, Yosuke; OKA, Fusao et al. Trinarization of μX-ray CT images of partially saturated sand at different water-retention states using a region growing method. **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms**, Elsevier, v. 324, p. 63–69, 2014.

HILLEL, Daniel. **Introduction to environmental soil physics**. [S.l.]: Elsevier, 2003.

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

JURY, W. A.; STOLZY, L. H. **Soil physics**. Edição: CRC Press. [S.l.: s.n.], 2018. p. 131–158.

KAESTNER, A; LEHMANN, E; STAMPANONI, M. Imaging and image processing in porous media research. **Advances in Water Resources**, Elsevier, v. 31, n. 9, p. 1174–1187, 2008.

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

KLEIN, Claudia; KLEIN, Vilson Antonio. Estratégias para potencializar a retenção e disponibilidade de água no solo. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 19, n. 1, p. 21–29, 2015.

KLEIN, VA; LIBARDI, PL. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 26, n. 4, 2002.

KLUTE, A1; DIRKSEN, Ch. Hydraulic conductivity and diffusivity: Laboratory methods. **Methods of soil analysis: part 1—physical and mineralogical methods**, Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, methodsofsoilan1, p. 687–734, 1986.

KLUTE, Arnold. **Physical and mineralogical methods**. [S.l.: s.n.], 1986. 188 p.

LEPSCH, Igo F. **Formação e conservação dos solos**. [S.l.]: Oficina de textos, 2016.

LU, Sheng-Gao et al. Porosity and pore size distribution of Ultisols and correlations to soil iron oxides. **Catena**, Elsevier, v. 123, p. 79–87, 2014.

MACEDO, Álvaro. **Construção e uso de um tomografo com resolução micrométrica para aplicações em Ciências do Solo e do Ambiente**. 1997. 129 f. Tese (Doutorado em Ciência da Engenharia Ambiental) – Universidade de São Paulo.

MENDES, Rodolfo Moreda; MARINHO, Fernando Antônio Medeiros; VALÉRIO FILHO, Mario. Capacidade de retenção de água em solos da Serra do Mar, SP. **Revista do Instituto Geológico, São Paulo**, v. 36, n. 1, p. 21–34, 2015.

MÜNCH, Beat et al. Stripe and ring artifact removal with combined wavelet—Fourier filtering. **Optics express**, Optical Society of America, v. 17, n. 10, p. 8567–8591, 2009.

NAIME, João de Mendonça. Projeto e construção de um tomógrafo portátil para estudos de ciência do solo e plantas, em campo. **São Carlos: USP-EESC**, 1994.

_____. **Um novo método para estudos dinâmicos, in situ, da infiltração da água na região não-saturada do solo.** 2001. Tese (Doutorado em Ciência da Engenharia Ambiental) – Universidade de São Paulo.

NIKON. **CT Pro 3D XT 3.0.3**. 2019. Disponível em: <`https://www.nikonmetrology.com/`>. Acesso em: 6 jan. 2019.

_____. **Tomógrafo XT H 225 ST**. 2019. Disponível em: <`https://www.nikonmetrology.com/`>. Acesso em: 6 jan. 2019.

NPTEL. **Phase Relations of Soils**. Edição: NPTEL. 2016. Disponível em: <`http://nptel.ac.in/courses/105103097/4`>. Acesso em: 6 jan. 2019.

OMONDI, Morris Oduor et al. Quantification of biochar effects on soil hydrological properties using meta-analysis of literature data. **Geoderma**, Elsevier, v. 274, p. 28–34, 2016.

PAGENKEMPER, Sebastian K et al. Investigation of time dependent development of soil structure and formation of macropore networks as affected by various precrop species. **International soil and water conservation research**, Elsevier, v. 2, n. 2, p. 51–66, 2014.

PAISANI, JULIO CéSAR. Estrutura de dissipação: uma revisão conceitual. **Pesquisas em Geociências**, v. 28, n. 2, p. 133–140, 2001.

PASSONI, Sabrina et al. Three dimensional characterization of soil macroporosity by x-ray microtomography. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, SciELO Brasil, v. 39, n. 2, p. 448–457, 2015.

PEDROTTI, Alceu et al. Tomografia computadorizada aplicada a estudos de um Planossolo. **Pesquisa Brasileira Agropecuária**, SciELO Brasil, 2003.

PETROVIC, AM; SIEBERT, JE; RIEKE, PE. Soil Bulk Density Analysis in Three Dimensions by Computed Tomographic Scanning 1. **Soil Science Society of America Journal**, Soil Science Society of America, v. 46, n. 3, p. 445–450, 1982.

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

RASBAND, Wayne. **ImageJ**. Edição: NIH. 2019. Disponível em: <`https://imagej.nih.gov/ij/`>. Acesso em: 6 jan. 2019.

RAWLING, J Elmo 3rd. A review of lamellae. **Geomorphology**, Elsevier, v. 35, n. 1-2, p. 15–19, 2000.

REICHARDT, Klaus; TIMM, Luís Carlos. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. [S.l.]: Manole Barueri, 2004.

REINERT, Dalvan José; REICHERT, José Miguel. Propriedades físicas do solo. **Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria**, 2006.

REIS TEIXEIRA, Marcilia Bruna dos; SCALON, Joao Domingos. Comparação entre Estimadores de Semivariância. **Rev. Bras. Biom**, v. 31, n. 2, p. 248–269, 2013.

RIBEIRO JÚNIOR, PJ. Métodos geoestatísticos no estudo da variabilidade espacial de parâmetros do solo. **Piracicaba, SP**, 1995.

RICHARDS, LA. A pressure-membrane extraction apparatus for soil solution. **Soil Sci**, v. 51, n. 5, p. 377–386, 1941.

RICHARDS, LA; FIREMAN, Milton. Pressure-plate apparatus for measuring moisture sorption and transmission by soils. **Soil Science**, LWW, v. 56, n. 6, p. 395–404, 1943.

SAMPIETRO, Jean Alberto; SILVA LOPES, Eduardo da; REICHERT, José Miguel. compactação causada pelo tráfego de feller buncher e skidder em um neossolo regolítico sob distintas umidades. **Ciência Florestal**, v. 25, n. 1, p. 239–248, 2015.

SANTOS, Jean Cheyson Barros dos et al. Caracterização de neossolos regolíticos da região semi-árida do Estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 3, p. 683–696, 2012.

SANTOS, Leonardo José Cordeiro; CASTRO, Selma Simões de. Lamelas (Bandas Onduladas) em Argissolo Vermelho-Amarelo como Indicadores da Evolução do Relevo: o caso das colinas médias do Platô de Bauru (SP). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 7, n. 1, 2006.

SCHINDELIN, Johannes et al. The ImageJ ecosystem: an open platform for biomedical image analysis. **Molecular reproduction and development**, Wiley Online Library, v. 82, n. 7-8, p. 518–529, 2015.

SCHLÜTER, Steffen; WELLER, Ulrich; VOGEL, Hans-Jörg. Segmentation of X-ray microtomography images of soil using gradient masks. **Computers & Geosciences**, Elsevier, v. 36, n. 10, p. 1246–1251, 2010.

SIJBERS, Jan; POSTNOV, Andrei. Reduction of ring artefacts in high resolution micro-CT reconstructions. **Physics in Medicine & Biology**, IOP Publishing, v. 49, n. 14, n247, 2004.

SILVEIRA, Eduarda Martiniano de Oliveira et al. Object-based change detection using semivariogram indices derived from NDVI images: The environmental disaster in Mariana, Brazil. **Ciência e Agrotecnologia**, SciELO Brasil, v. 41, n. 5, p. 554–564, 2017.

SOUZA, Zigomar Menezes de et al. Micromorfologia do solo e sua relação com atributos físicos e hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, SciELO Brasil, p. 487–492, 2006.

TAINA, Ioana; HECK, Richard; DEEN, William et al. Quantification of freeze–thaw related structure in cultivated topsoils using X-ray computer tomography. **Canadian Journal of Soil Science**, NRC Research Press, v. 93, n. 4, p. 533–553, 2013.

TAINA, Ioanna; HECK, Richard; ELLIOT, T R. Application of X-ray computed tomography to soil science: A literature review. **Canadian Journal of Soil Science**, NRC Research Press, v. 88, n. 1, p. 1–19, 2008.

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

TASSINARI, D et al. (Ed.). **Conhecendo a vida do solo**. [S.l.]: Editora UFLA: Lavras, 2017. v. 1, p. 32.

TOMER, MD; ANDERSON, JL. Variation of soil water storage across a sand plain hillslope. **Soil Science Society of America Journal**, Soil Science Society of America, v. 59, n. 4, p. 1091–1100, 1995.

TRACY, Saoirse R et al. Three-dimensional quantification of soil hydraulic properties using X-ray Computed Tomography and image-based modeling. **Water Resources Research**, Wiley Online Library, v. 51, n. 2, p. 1006–1022, 2015.

WEI, Zhouping; WIEBE, Sheldon; CHAPMAN, Dean. Ring artifacts removal from synchrotron CT image slices. **Journal of Instrumentation**, IOP Publishing, v. 8, n. 06, p. c06006, 2013.

WILDENSCHILD, Dorthe; SHEPPARD, Adrian P. X-ray imaging and analysis techniques for quantifying pore-scale structure and processes in subsurface porous medium systems. **Advances in Water Resources**, Elsevier, v. 51, p. 217–246, 2013.

WINSTONE, Bethany C et al. Characterization of soil aggregate structure by virtual erosion of X-ray CT imagery. **Soil and Tillage Research**, Elsevier, v. 185, p. 70–76, 2019.

WU, Xian et al. Evaluation of semivariogram features for object-based image classification. **Geo-spatial Information Science**, Taylor & Francis, v. 18, n. 4, p. 159–170, 2015.

YAZDANPANAH, Najme; MAHMOODABADI, Majid; CERDÀ, Artemi. The impact of organic amendments on soil hydrology, structure and microbial respiration in semiarid lands. **Geoderma**, Elsevier, v. 266, p. 58–65, 2016.

ZHOU, Hu et al. Effects of organic and inorganic fertilization on soil aggregation in an Ultisol as characterized by synchrotron based X-ray micro-computed tomography. **Geoderma**, Elsevier, v. 195, p. 23–30, 2013.

ZINGG, T. Beiträge zur Schotteranalyse. **Min. Petrog. Mitt. Schweiz**, v. 15, p. 39–140, 1935.