



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO - UFPE
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS - CTG
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO TECNOLOGIA AMBIENTAL E RECURSOS HÍDRICOS

LARISSA FERNANDES COSTA

**TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS-X APLICADA À
CARACTERIZAÇÃO DO ESPAÇO POROSO DO SOLO.**

RECIFE

2017

LARISSA FERNANDES COSTA

**TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS-X APLICADA À
CARACTERIZAÇÃO DO ESPAÇO POROSO DO SOLO.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Geociências da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de Concentração Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos

Orientador interno: Prof.º Dr.º Antonio Celso Dantas Antonino

Orientador Externo - Prof. Dr. Richard John Heck

Coorientador: Artur Paiva Coutinho

RECIFE

2017

Catálogo na fonte
Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

C837t Costa, Larissa Fernandes.
Tomografia computadorizada de raios-x aplicada à caracterização do espaço poroso do solo./ Larissa Fernandes Costa - 2016.
71folhas, Il. e Tab.

Orientador Interno: Prof. Dr. Antônio Celso Dantas Antonino.
Orientador Externo - Prof. Dr. Richard John Heck.
Coorientador – Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2016.
Inclui Referências.

1. Engenharia Civil. 2. Porosidade do solo. 3. Imagem digital. 4. Agregado.
5. μ tc raios-x. I. Antonino, Antônio Celso Dantas e Heck, Richard John
(Orientadores). II. Coutinho, Artur Paiva. III

UFPE

624 CDD (22. ed.)

BCTG/2017-127



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

A comissão examinadora da Defesa de Dissertação de Mestrado
**TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA DE RAIOS-X APLICADA À CARACTERIZAÇÃO DO
ESPAÇO POROSO DO SOLO**

defendida por

Larissa Fernandes Costa

Considera a candidata APROVADA

Recife, 07 de julho de 2016

Orientador Interno - Prof. Dr. Antônio Celso Dantas Antonino
Orientador Externo - Prof. Dr. Richard John Heck
Coorientador – Prof. Dr. Artur Paiva Coutinho

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Antônio Celso Dantas Antonino – UFPE
(orientador interno)

Prof. Dr. Fernando José Ribeiro Sales – UFPE
(examinador externo)

Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral – UFPE
(examinador interno)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Érico Costa e Norma Nei, e às minhas irmãs, Érica, Germana e Júlia, que sempre me deram muito amor, apoio e oportunidades de sempre seguir em frente e crescer. Que me ajudaram nas fases difíceis e que aguentaram todos os meus estresses.

Aos meus amigos que sempre estiveram ao meu lado ajudando a superar mais uma fase da minha vida. Especialmente aos meus amigos, José Junior, Thiago Campos, Cássia Bezerra, Carol Fonseca, Edevaldo Miguel, João Baptista, Severino Neto e Maurício, que sempre me apoiaram desde o início da pós-graduação. Em especial a Thiago Campos por ajudar no desenvolvimento de algumas ferramentas que foram de fundamental ajuda nessa pesquisa.

À Selma Castro e seus alunos por disponibilizarem dados e imagens tomográficas utilizadas nesse trabalho.

Aos meus queridos orientador e orientador externo, Antônio Antonino e Richard Heck, respectivamente, pelo imenso conhecimento transmitido, forte apoio e grande ajuda na elaboração desse trabalho. Ao meu querido coorientador, Artur Coutinho, pelas longas conversas de incentivo e por me apresentar esse meio da pesquisa científica.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio à pesquisa, por meio da concessão da bolsa de estudo de mestrado (Processo nº 130874/2015-9).

À minha Universidade e ao Programa de Pós-Graduação de Engenharia Civil que me proporcionaram momentos maravilhosos de aprendizado que levarei para toda a vida.

As meninas da secretaria de Pós-Graduação de Engenharia Civil, Claudiana, Andréa e Cleide, que me ajudaram com todos os protocolos e documentações durante todo esse período, de forma muito atenciosa.

RESUMO

A porosidade é importante na determinação da qualidade de um solo, por possuir forte influência na aeração, na transferência de água/solutos/gases/calor, na resistência à penetração e na ramificação de raízes, além do desenvolvimento de microorganismos. A avaliação do espaço poroso, considerando vazios intra e inter-agregados, em diferentes tipos de solo e suas implicações (vantagens/desvantagens) é objetivo deste estudo. Foi determinada a porosidade inter e intra-agregados em solos dos tipos Latossolo Vermelho Distrófico e Neossolo Regolítico Eutrófico. Para os intra-agregados foram classificados: o tamanho e a forma. A porosidade inter-agregados foi maior para o Neossolo; este é um comportamento esperado para um solo arenoso, quando comparado a um solo com maior teor de argila. Considerando a porosidade intra-agregados, destacou-se a predominância de poros maiores e maior quantidade de poros complexos para o Neossolo. A aplicação de tomografia computadorizada de raios-x, portanto, se mostrou eficiente na caracterização micromorfológica da porosidade do solo.

Palavras-chave: Porosidade do solo. Imagem digital. Agregado. μ TC Raios-X.

ABSTRACT

Porosity is important in determining the quality of the soil, as it has strong influence on the aeration, in the transfer of water/solute/gas/heat, resistance to penetration and branching roots, and the development of microorganisms. The assessment of the pore space, whereas intra and inter-empty clusters in different soil types and their implications (advantages/disadvantages) is aim of this study. It was determined to inter- and intra-aggregate porosity in soil types Red Latossol dystrophic. For intra-aggregates were classified: the size and shape. The inter-aggregate porosity was higher for Regossols; this is expected behavior for a sandy soil, compared to a clay soil. Considering the intra-aggregate porosity, noted the predominance of larger pores and a larger number of complex pores to Regossols. The application of computed microtomography X-ray proved effective in micromorphological characterization of soil porosity.

Key-Words: Soil Porosity. Digital Image. Aggregate. X ray μ CT.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Classificação da poros em relação ao seu diâmetro equivalente proposta por diversos autores.	15
Figura 2: Cilindro de acrílico com 6,4 cm de diâmetro e 15 cm de altura utilizado para coleta das amostras indeformadas de Latossolo Vermelho Distrófico.	19
Figura 3: Cilindro de PVC com 7,5 cm de diâmetro e 7,5 cm de altura utilizados para a coleta da amostra indeformada da camada superficial de solo do Neossolo Regolítico Eutrófico.....	20
Figura 4: μ TC modelo GE Medical CT MD8X-130 (a); Filtros (b); Detector com 3600 x 1852 sensores (c).	22
Figura 5: Subvolumes reconstruídos em 3D de amostras de solo Latossolo Vermelho Distrófico: LVd_soja (a), LVd_pasto (b), LVd_suc (c).....	23
Figura 6: microTC modelo NIKON XT H 225 ST (a); Filtros (b); e Detector com 1918 x 1534 sensores (c).	23
Figura 7: Subvolume reconstruído em 3D de amostra de solo Neossolo Regolítico eutrófico.....	24
Figura 8: Imagens antes (a) e depois (b) da correção dos artefatos de anéis.	25
Figura 9: fases do solo que serão segmentadas.	28
Figura 11: Interface do plug-in PVE com os dados utilizados.	29
Figura 12: Imagem original em HU (a) e Imagem após PVE (b).....	29
Figura 10: fluxograma do processo de segmentação de imagens.....	30
Figura 13: Histograma da imagem original em HU (a) e Histograma da imagem após PVE (b).	31
Figura 14: Histograma original (a); Utilizando o Smooth com 25 steps (b).	31
Figura 15: Seleção de alcance de 300 a 1000 (a); e de 1500 a 3000 (b).	32
Figura 16: Threshold manual: a) região próxima ao P1 que representa os vazios; b) região próxima ao P2 representando matriz; e c) região do P3 que também representa matriz.	33
Figura 17: Interface do plug-in CT Segmentation.	34
Figura 18: Segmentação A: imagem original Hu (a); Clamped (b); Laplacian (c); Zero-crossings (d); Unknown-255 (e); Unknown-Laplacian (f); MoreAir-255 (g); MoreSolid-255 (h); Air-255 (i); Solid-255 (j); Seed Image (k); e Seed Image multiplicada por 100 (l).....	37
Figura 19: Imagem resultante da Segmentação B (a) e multiplicada por 100 (b).	38
Figura 20: Imagem final segmentada original (a) multiplicada por 100 (b).....	39
Figura 21: Interface do plug-in Large Bitwidth Thresholding com os dados utilizados.	40
Figura 22: Imagem gerada após Large Bitwidth Thresholding: o branco tem valor de 255 e o preto possui valor 0.	41
Figura 23: Interface do plug-in Particle Analyzer com os dados utilizados para Pequenos (P) (a); Médios (M) (b); e Grandes (G) (c).	42
Figura 24: fluxograma do processo de análise de vazios	43
Figura 25: Forma de um objeto definida por meio de seus eixos principais.....	44
Figura 26: Matriz do solo em escala de cinza (HU).....	45
Figura 27: Interface gráfica do plug-in batch.....	47

Figura 28: Distribuição dos vazios inter-agregados e dos vazios-intra-agregados para o solo Latossolo Vermelho distrófico (LVd) submetido a diferentes manejos e para um solo Neossolo Regolítico eutrófico (NRe).....	49
Figura 29: Espaço poroso inter-agregados do Latossolo Vermelho distrófico: LVd_soja (a), LVd_pasto (b), LVd_suc (c) e do Neossolo Regolítico eutrófico (d).	50
Figura 30: Espaço poroso intra-agregados do Latossolo Vermelho distrófico: LVd_soja (a), LVd_pasto (b), LVd_suc (c) e do Neossolo Regolítico eutrófico (d).	52
Figura 31: Distribuição normal unimodal dos tamanhos dos vazios.	54
Figura 32: Curva de distribuição acumulada dos vazios dos solos com limitação devidos a resolução das imagens.	56
Figura 33: Distribuição dos formatos dos vazios dos solos.	57
Figura 34: Distribuição dos tamanhos dos poros em relação ao seus formatos.	59
Figura 35: Perfil da radiodensidade média dos subvolumes de amostras de Latossolo Vermelho distrófico (LVd) submetidos a diferentes culturas antes do cultivo da cana-se-açúcare de amostra de Neossolo Regolítico eutrófico (NRe).	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Atributos físicos dos solos dos tipos Latossolo Vermelho Distrófico (LVd), Neossolo Regolítico Eutrófico (NRe)	21
Tabela 2: Valores dos Picos e das Variâncias resultantes da rotina do Matlab e as fases em que se encontram.....	33
Tabela 3: Valores utilizados na segmentação dos vazios e não vazios.....	35
Tabela 4: Valores utilizados na segmentação dos sólidos e não sólidos.....	35
Tabela 5: Valores das fases nas imagens geradas pelo processo de segmentação.	38
Tabela 6: Processo de geração de imagem final segmentada – valores das fases da imagem final.....	39
Tabela 7: Classificação dos vazios e seus volumes para uma resolução de 40µm.	41
Tabela 8: Classificação dos poros quanto sua forma.	44
Tabela 9: Classificação dos poros em relação ao volume.....	45
Tabela 10: Valores da imagem para análise espacial.....	45
Tabela 11: Atributos físicos do Latossolo Vermelho e do Neossolo Regolítico obtidos com a aplicação de Microtomografia Computadorizada de Raios-X.....	48
Tabela 12: Distribuição dos vazios em intervalos de tamanhos dos solo.....	53
Tabela 13: Distribuição dos formatos dos vazios dos solos.....	57

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVOS	13
2.1	OBJETIVO GERAL	13
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3	REVISÃO DE LITERATURA	14
4	MATERIAIS E MÉTODOS	19
4.1	AMOSTRAS	19
4.1.1	LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO (LVd)	19
4.1.2	NEOSSOLO REGOLÍTICO EUTRÓFICO (NRe)	20
4.2	AQUISIÇÃO E RECONSTRUÇÃO DE IMAGENS	21
4.2.1	GE MEDICAL CT MD8X-130	22
4.2.2	NIKON XT H 225 ST	23
4.3	ARTEFATOS DE ANÉIS (RING ARTIFACTS)	24
4.4	PROCESSAMENTO DE IMAGENS	25
4.4.1	IMAGEJ	25
4.4.2	SEGMENTAÇÃO DAS IMAGENS	27
4.4.3	ANÁLISES DAS IMAGENS	39
4.5	BATELADA (BATCH)	46
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
5.1	POROSIDADE	48
5.2	MORFOMETRIA DOS POROS INTRA-AGREGADOS	53
5.2.1	TAMANHO	53
5.2.2	FORMA	56
5.3	VARIABILIDADE ESPACIAL DA MATRIZ DO SOLO	61
6	CONCLUSÃO	63
	REFERÊNCIAS	64

1 INTRODUÇÃO

O solo é um meio vivo e dinâmico que precisa ser preservado para que haja um futuro melhor e com qualidade para a humanidade. Porém, muitas vezes, ele é considerado como um meio inerte que serve apenas como suporte para as estruturas construídas pelos homens e para produção de alimentos necessários para suprir a demanda populacional.

O crescimento acelerado e desordenado da população, por sua vez, é um dos motivos da degradação do solo. Nos centros urbanos, o desenvolvimento sem planejamento, vem causando uma impermeabilização do solo pela cobertura por concreto e asfalto, trazendo como consequência problemas de alagamentos e erosão. No campo, o aumento populacional exigiu uma maior produção de alimentos, que conseqüentemente gerou mudanças na forma de produção, como a mecanização e uso de agrotóxicos, que vem causando alterações na estrutura do solo e contaminação.

A estrutura de um solo está fortemente relacionada ao seu funcionamento, sendo fator chave na capacidade de suportar a vida vegetal e animal, visto que, ela influencia a aeração, densidade, resistência mecânica e fluxo e retenção de água no solo. Muitas vezes, o mau uso da terra, práticas de manejo do solo inadequadas e ciclos de umedecimento e secagem provocam mudanças na estrutura do solo que vem sendo vistas como forma de degradação desse meio, podendo resultar em erosão, encrostamento, reciclagem de nutriente, resistência a penetração de raízes e redução de produtividade das culturas (BRONICK & LAL, 2005).

A forma, a dimensão e o arranjo das partículas sólidas durante o processo de agregação na formação da estrutura do solo determinam o arranjo e volume do sistema complexo de poros, estes podendo estar entre os agregados (inter-agregados) e dentro dos agregados (intra-agregados). Os poros inter-agregados são poros maiores que rapidamente se esvaziam, fazendo decrescer a condutividade de forma rápida. Os poros intra-agregados são poros menores e de condução mais lenta, proporcionando uma condutividade menor e um maior armazenamento de água (KLEIN & LIBARDI, 2002). As mudanças na estrutura do solo afetam diretamente o seu espaço poroso, alterando as propriedades físico-hídricas importantes no desenvolvimento de plantas e animais

Diante disso, estudos relacionados aos atributos físicos dos solos, principalmente sobre as mudanças na estrutura e porosidade, constituem uma forma de fornecer subsídios para a determinação da qualidade do solo e para o desenvolvimento de práticas racionais de uso,

manejo e conservação dos solos, contribuindo assim para tornar o solo menos suscetível à perda de capacidade produtiva (JACOMINE, 1996; DAS NEVES et al., 2002; SANTOS et al., 2012).

Entre as diferentes técnicas aplicadas no estudo da estrutura do solo, tem se destacado a microtomografia computadorizada de raios-x, que vem permitindo caracterizar quantitativamente, qualitativamente, em três dimensões, de forma não destrutiva e em alta resolução (escala micrométrica) o sistema poroso do solo, possuindo vantagens em relação as outras técnicas, como determinação da porosidade total em amostras indeformadas, porosimetria por injeção de mercúrio e morfologia com micrografias de lâminas delgadas, devido ao grau de detalhamento que essa técnica fornece.

Porém, ainda não há uma padronização do uso da microtomografia computadorizada de raios-x no estudo da porosidade do solo, principalmente em relação ao tratamento e segmentação de imagens. Nesse contexto, é necessário apresentar uma metodologia eficaz para a caracterização morfométrica dos poros, por meio da microtomografia computadorizada de raios-x.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar o espaço poroso em diferentes tipos de solo utilizando a Microtomografia Computadorizada de Raios-x.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a porosidade inter e intra-agregados em dois tipos de solo;
- Analisar a morfometria da porosidade dos solos;
- Avaliar as diferenças da matriz dos solos a partir da radiodensidade.

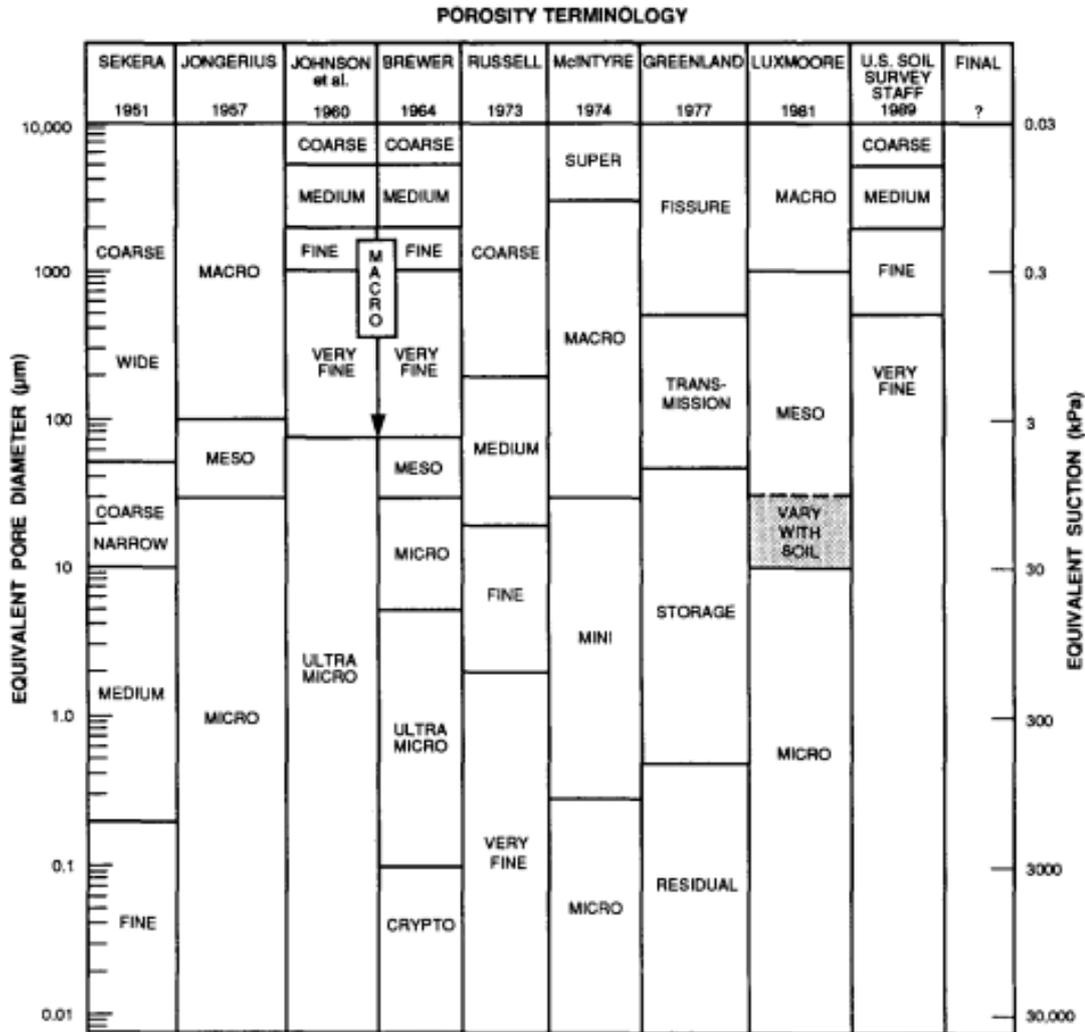
3 REVISÃO DE LITERATURA

A estrutura do solo é determinada pelo arranjo, orientação e organização de partículas de diferentes composições químicas, tamanhos e formas que, quando agregadas, determinam a porosidade do solo (REICHARDT, 2008; HILLEL, 1998). A porosidade é um fator importante na determinação da qualidade de um solo, pois ela possui forte influência na aeração, na dinâmica dos fluidos, na resistência à penetração e ramificação de raízes, bem como no desenvolvimento de microorganismos. Estudar os processos dinâmicos que ocorrem no solo é crucial e a determinação da porosidade total não é suficiente para o estudo das propriedades físico-hídricas e para a verificação de modificações estruturais, sendo fundamental uma caracterização geométrica dos poros.

O tamanho e a distribuição dos poros estão relacionados à capacidade de armazenamento e condução de água, soluto, ar e calor. Em relação ao tamanho dos poros, ainda não há um consenso sobre sua classificação, podendo ser classificado de diferentes formas dependendo do autor (Figura 1) (LUXMOORE et al., 1990). Para a EMBRAPA (1997), os poros são divididos em microporos, com diâmetros menores que 50 μm , e macroporos, com diâmetros maiores que 50 μm . Jongerius (1957) e Koorevaar et al. (1983) utilizaram uma classificação intermediária, os mesoporos. Para esses autores, os microporos são representados pelos vazios de diâmetros menores de 30 μm , os mesoporos com diâmetros entre 30-100 μm e os macroporos maiores que 100 μm . Alguns autores também classificam os tamanhos dos poros de forma semelhante a classificação dos tamanhos dos grãos de cascalho, areia e silte, podendo ser chamados de grosseiros, médios, finos ou muito finos (JOHNSON et al., 1960; BREWER, 1964; U.S. SOIL SURVEY STAFF, 1989). Os microporos são responsáveis pela retenção da água no solo, enquanto que o macroporos tem como objetivo a drenagem e aeração, além de permitir o desenvolvimento radicular e abrigar os microorganismos.

Em relação a distribuição, Othmer et al. (1991) classificam os poros em intra-agregados e inter-agregados. Segundo os autores, os poros intra-agregados são responsáveis pela retenção e disponibilidade de água para as plantas e se caracterizam por se esvaziarem mais lentamente, proporcionando uma condução mais lenta da água pelo solo. Os poros inter-agregados são responsáveis pela aeração das raízes e drenagem da água no solo, e se caracterizam pelo rápido esvaziamento e fluxo de água.

Figura 1: Classificação da poros em relação ao seu diâmetro equivalente proposta por diversos autores.



Fonte: Luxmoore et al. (1990).

Além do tamanho e da distribuição, parâmetros como forma, quantidade, orientação, continuidade e conectividade são de suma importância no estudo dos parâmetros hídricos e físicos do solo, como também no estudo das modificações no arranjo de sua estrutura causadas por processos naturais ou ações de natureza humana.

A estrutura de um solo deve ser considerada como uma propriedade dinâmica sujeita a modificações devido as mudanças climáticas, atividades biológicas, processos físico-químicos e ações de natureza humana. Distúrbios causados pelo manejo do solo podem resultar em compactação, reciclagem rápida de nutrientes, e encrostamento da superfície, reduzindo a disponibilidade de água, ar e nutrientes para as plantas e organismos.

O grau de compactação é um dos parâmetros mais importantes relacionado à perda de qualidade da estrutura de um solo, causada por problemas na gestão agrícola, principalmente

pela uso de maquinários pesados (MARSILI et al., 1998; PAGLIAI et al., 2003). A diminuição da macroporosidade e a modificação na geometria dos macroporos, como surgimento de poros planares e sem continuidade, por exemplo, são fatores analisados no estudo da compactação de um solo e que afetam a atividade biológica devido ao aumento da resistência a penetração e consequentemente diminuição da condutividade hidráulica (PAGLIAI & DE NOBILI, 1983; PAGLIAI et al., 2000; PAGLIAI et al., 2003; PAGLIAI et al., 2004). Dessa forma é importante a escolha de critérios para avaliar as condições atuais da qualidade dos solos no intuito de determinar sistemas de manejos adequados para a preservação ou melhoria da qualidade da estrutura do solo, evitando assim, sua degradação por compactação e garantindo um aumento de produtividade aliada a sustentabilidade ambiental.

Os Latossolos, por exemplo, apresentam características físicas favoráveis ao uso agrícola, como relevo plano a suave ondulado, porém, quando submetidos a cultivos intensos, são altamente susceptíveis a degradação da estrutura e alteração dos tamanhos dos agregados por possuírem textura argilosa, sofrendo compactação e redução de sua estabilidade. (CARPENEDO & MIELNICZUK, 1990; NÓBREGA et al., 2001; OLIVEIRA et al., 2004; SILVA, 2012). Os Latossolos, apesar de se caracterizarem como um solo de perfil homogêneo, apresentam grande variabilidade na distribuição espacial dos agregados, sendo estes os componentes da estrutura que podem ser facilmente modificados pelo manejo (CAMARGO et al., 2008).

Os Neossolos Regolíticos são solos que perfazem aproximadamente 27% da superfície do Estado de Pernambuco, ocorrendo com maior frequência nas zonas de caatinga do Agreste e do Sertão (EMBRAPA, 2006b; SANTOS et al., 2012). De forma geral, esses solos apresentam baixo teor de matéria orgânica e fósforo, elevada permeabilidade e baixa capacidade de retenção de água (JACOMINE, 1996). Esse tipo de solo recobre importantes áreas voltadas à produção agrícola, especialmente à agricultura familiar, com cultivo principalmente de milho, algodão, feijão, mandioca, tomate, pastagens e espécies frutícolas (BRASIL, 1973; SILVA et al., 2013). A remoção da cobertura natural para essas práticas agrícolas expõe o solo aos agentes de erosão, sendo o uso e manejo inadequado desse tipo de solo os principais causadores da degradação e desertificação desse ambiente (MELO et al., 2008).

A compactação oriunda do manejo inadequado, como as propriedades físicas de um solo, pode ser mapeadas pela variabilidade espacial de uma variável (GONÇALVES et al., 2001; BALAGUER et al., 2010). Dos Santos et al. (2012) utilizaram semivariogramas para verificar a variabilidade espacial da macroporosidade, microporosidade, porosidade total, densidade e

umidade de um Latossolo Vermelho distroférico com cultivo de soja, encontrando uma alta variabilidade na macroporosidade desse solo. Taina et al. (2013) analisaram a variabilidade média gerada a partir dos valores de atenuação dos raios-x de imagens tomográficas, no intuito de estudar os poros que não foram possíveis serem computados no processo de binarização.

A microtomografia computadorizada (μ TC) de raios-x é uma ferramenta que vem sendo utilizada na determinação dos parâmetros morfométricos dos poros e análise da variabilidade espacial das propriedades de um solo, possibilitando o estudo da geometria dos poros para auxiliar na análise das propriedades físico-hídricas e na identificação dos efeitos da agricultura no solo.

A tomografia computadorizada (TC) de raios-x foi utilizada inicialmente para fins médicos, sendo apenas na década de 1980 inserida no estudo das Ciências do Solo por Petrovic et al. (1982), Hainsworth & Aylmore (1983) e Crestana et al. (1985), que utilizaram essa tecnologia na determinação da densidade do solo, distribuição espacial do conteúdo de água, retenção e movimento da água no solo. Essa técnica consiste na análise das características internas de um objeto de forma quantitativa e qualitativa, não destrutiva e em três dimensões (3D). Essas características são marcadas pela capacidade de atenuação de cada material, estando relacionada com suas diferenças de composições atômicas e de densidade. A evolução computacional e dos próprios tomógrafos médicos, além da necessidade de equipamentos menores e mais acessíveis, permitiram o desenvolvimento de aparelhos industriais sofisticados capazes de captar detalhes em alta resolução, na ordem de micron. Esses equipamentos foram chamados de MicroTC (μ TC) e utilizam fontes de raios-x, gama ou sincrotron.

Mees et al. (2003), Taina et al. (2008) e Cnudde & Boone (2013) fizeram revisão do avanço do uso da TC de raios-x na Geociência. No estudo do solo essa técnica pode ser utilizada para avaliação das propriedades físicas como a densidade e a porosidade (GARBOU et al., 2013; BERALDO et al., 2014), a condutividade hidráulica (REZANEZHAD et al., 2009; ELLIOT et al., 2010), a retenção e o fluxo de água e ar (PEDROTTI et al., 2003; DOHNAL et al., 2013). Sobre as atividades biológicas têm-se: desenvolvimento de plantas (FLAVEL et al., 2012; MOONEY et al., 2012; CARDUCCI et al., 2014) e microbiologia do solo (HELLIWELL et al., 2013; BOUCKAERT et al., 2013); composição do solo: água, ar, sólidos (MARCEDO & CRESTINA, 1999); estrutura do solo e; qualidade do solo: conservação, degradação e reabilitação (SOLIMAN et al., 2010; ZHOU et al., 2012; KELLER et al., 2013). Pires et al. (2010) abordaram o avanço dessa técnica no estudo da física do solo no Brasil.

No estudo da estrutura de um Latossolo, Marchin et al. (2015) utilizaram a técnica de TC de raios-x para verificar o efeito de diferentes tipos de manejo em um Latossolo Vermelho em recuperação. Os autores, analisando a macroporosidade e a densidade do solo, afirmaram que a técnica é promissora para o estudo das modificações de morfologia dos agregados do solo. Macedo & Crestana (1999) construíram um microtomógrafo de raios-x para estudar a macroporosidade e determinar a densidade de partículas do solo.

Além dos trabalhos relacionados às propriedades físicas do solo, há uma evolução constante em relação ao desenvolvimento e à avaliação de metodologias utilizadas, no intuito de otimizar o uso dessa técnica na determinação dessas propriedades. Rab et al. (2014) analisaram o efeito de borda na porosidade e o efeito da escolha do tamanho do subvolume reconstruído, além de utilizar diferentes parâmetros de escaneamento. Beckers et al. (2014) e Hashemi et al. (2014) analisaram métodos de segmentação de imagens. Münch et al. (2009) e Wei et al. (2013) propõem metodologias para correção de artefatos.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 AMOSTRAS

Foram utilizadas nesse trabalho imagens de amostras de solos coletadas e escaneadas por parceiros do Soil Imaging Laboratory, School of Environmental Sciences, University of Guelph, Canada, e por parceiros do Laboratório de Tomografia Computadorizada de Raios-X (LTC-RX), Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, Brasil. Portanto, os dados referentes as amostras foram baseados em trabalhos desses parceiros.

4.1.1 LATOSSOLO VERMELHO DISTRÓFICO (LVd)

As amostra de Latossolo Vermelho Distrófico (LVd) foram coletadas pelo grupo de pesquisa de Geografia da Universidade Federal de Goiás, Brasil, nas propriedades da Usina São Francisco S/A, no município de Quirinópolis - GO, onde foram abertas trincheiras de aproximadamente 2,0 x 1,5 x 2,5 m para a coleta das amostras indeformadas do horizontes subsuperficial AB, as quais foram coletadas em cilindros de acrílico com 6,4 cm de diâmetro e 15 cm de altura (Figura 2), que foram secas em estufa a 40° C.

Figura 2: Cilindro de acrílico com 6,4 cm de diâmetro e 15 cm de altura utilizado para coleta das amostras indeformadas de Latossolo Vermelho Distrófico.



Fonte: O Autor (2016).

O Latossolo Vermelho distrófico (LVd) se caracteriza por ser um solo argiloso, profundo, de estrutura uniforme em relação a cor, textura e profundidade, como também, por ser poroso a muito poroso e susceptível a erosão e compactação. Esse tipo de solo é considerado frágil, pois possuem uma baixa estabilidade estrutural, sendo susceptível a impactos.

Na região de Quirinópolis - GO a expansão da cana-de-açúcar se deu em 2004 com a substituição de pastagem ou cultura anual (soja) ou ainda a sucessão pastagem/cultura anual. Além disso, houve uma redução das áreas de vegetação natural de cerrado durante esse processo de expansão. Portanto, foram selecionados 3 sítios amostrais de acordo com o uso do solo anterior a cana (pasto, soja ou sucessão dos dois) (Tabela 1). Nesses sítios selecionados, o tipo da cana cultivada é o mesmo e houve o mesmo tipo de preparo inicial do solo (solagem, gradagem pesada, calagem, gessagem, fosfatagem e gradagem leve), como também, teve uma forte mecanização durante o processo de cultivo e colheita.

4.1.2 *NEOSSOLO REGOLÍTICO EUTRÓFICO (NRe)*

A amostra foi coletada no sítio Várzea do Barro, localizado no município de São João (PE), por parceiros do Laboratório de Tomografia Computadorizada de Raios-X (LTC-RX) do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco, juntamente com pesquisadores do o Grupo de Física do Solo (GFS) da Unidade Acadêmica de Garanhuns (UAG) da Universidade Federal Rural de Pernambuco, onde foram abertas trincheiras de aproximadamente 2,0 x 1,5 x 2,5 m para a coleta das amostras indeformadas da camada superficial de 0 – 20 cm, a qual foi coletada em cilindro de PVC com 7,5 cm de diâmetro e 7,5cm de altura (Figura 3) e seca em estufa a 40° C (Tabela 1).

Figura 3: Cilindro de PVC com 7,5 cm de diâmetro e 7,5 cm de altura utilizados para a coleta da amostra indeformada da camada superficial de solo do Neossolo Regolítico Eutrófico.



Fonte: O Autor (2016).

O Neossolo Regolítico Eutrófico é um solo pouco desenvolvidos com predomínio de areia e baixo teor de argila e matéria orgânica. Devido ao seu caráter arenoso esse tipo de solo apresenta elevada permeabilidade e baixa capacidade de retenção de umidade.

Na área de coleta predomina-se a sucessão de cultivo de mandioca, feijão e milho, realizada por agricultura familiar, onde o manejo utilizado se caracteriza por uma primeira gradagem, adubação orgânica, segunda gradagem e plantio da cultura, sem uso de maquinários pesados nos processos de cultivo e com uma colheita feita de forma manual.

Tabela 1: Atributos físicos dos solos dos tipos Latossolo Vermelho Distrófico (LVd), Neossolo Regolítico Eutrófico (NRe)

Perfil	Tipo de solo	Uso da terra	Amostra	Prof. camada	PT	Areia	Silte	Argila	Classe textural
				(cm)					
P1		Soja/cana	LVd_soja	30-70	32	62	8	30	Franco-argilo-arenoso
P2	LVd	Pastagem/cana	LVd_pasto	20-44	37	58	9	33	Franco-argilo-arenoso
P3		Sucessão: pasto/soja/cana	LVd_suc	29-56	40	57	9	34	Franco-argilo-arenoso
P4	NRe	Milho/feijão/mandioca	NRe	0-20	43	88	10	2	Arenoso

Fonte: Os dados das amostras de solo LVd são de Silva & Castro (2014) e os dados da amostra de solo NRe são De Almeida et al. (2015), obtidos de acordo com a EMBRAPA (1997).

4.2 AQUISIÇÃO E RECONSTRUÇÃO DE IMAGENS

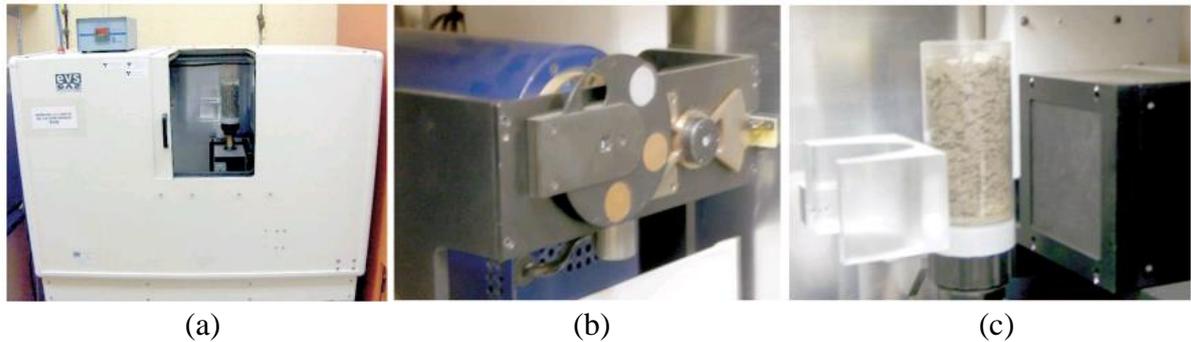
A aquisição das imagens tomográficas foram realizadas em dois equipamentos diferentes:

- GE Medical CT MD8X-130, localizado no Soil Imaging Laboratory, School of Environmental Sciences, University of Guelph, Canada;
- NIKON XT H 225 ST, localizado no Laboratório de Tomografia Computadorizada de Raios-X do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco, Brasil.

4.2.1 GE MEDICAL CT MD8X-130

As imagens tomográfica das amostras do LVd foram obtidas pelo grupo de pesquisa de Geografia da Universidade Federal de Goiás, Brasil, por meio do microtomógrafo de raios-x de terceira geração modelo GE Medical CT MD8X-130, cuja geração de raios-x ocorre entre um filamento de tungstênio (cátodo) e um alvo de tungstênio (ânodo). O detector desse dispositivo possui 3600 x 1852 sensores (Figura 4).

Figura 4: μ TC modelo GE Medical CT MD8X-130 (a); Filtros (b); Detector com 3600 x 1852 sensores (c).

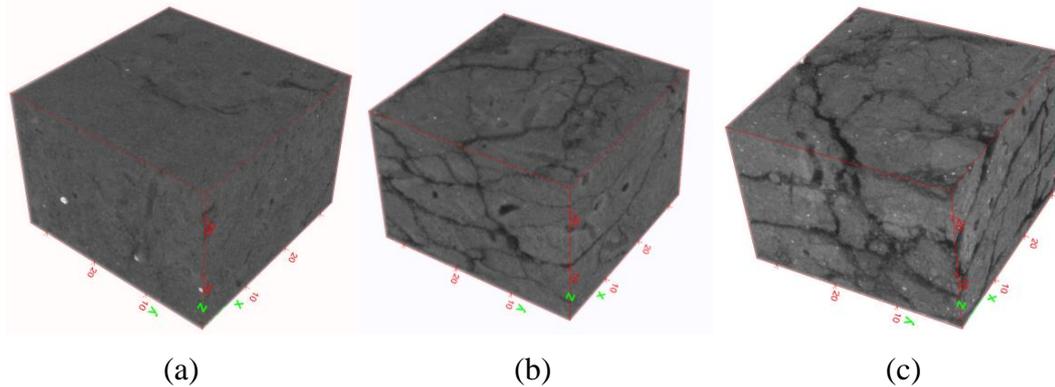


Fonte: Heck (2009).

Foram utilizados como parâmetros no processo de aquisição a tensão de 120kV, corrente 170 μ A, tempo de exposição de 3500 ms. A resolução espacial das imagens foi 20 μ m (20 x 20 μ m²). Foi utilizado filtro de cobre para minimizar os fótons de baixa intensidade, causadores dos artefatos do tipo feixe de endurecimento (*beam hardening*).

Subvolumes de interesse foram reconstruído em 3D, utilizando o eXplore Reconstruction Utility, software da GE Healthcare (2006), com dimensões de 840 x 840 x 600 voxels (Figura 5a-c). A resolução espacial das imagens foi reduzida para 40 μ m (40 x 40 x 40 μ m³) e a resolução radiométrica ficou em 16-bit. Para a minimização de ruídos foi aplicado filtro de Guass 3x3x3 em todas os subvolumes reconstruídos. Durante a reconstrução as imagens foram convertidas para a escala de Hounsfield na qual o ar apresenta valor de 0 e a água igual a 1000.

Figura 5: Subvolumes reconstruídos em 3D de amostras de solo Latossolo Vermelho Distrófico: LVd_soja (a), LVd_pasto (b), LVd_suc (c)



Fonte: O Autor (2016).

4.2.2 NIKON XT H 225 ST

As imagens tomográfica da amostra do Neossolo Regolítico Eutrófico foram obtidas no Laboratório de Tomografia Computadorizada de Raios-X (LTC-RX) do Departamento de Energia Nuclear da UFPE, Brasil, utilizando o microtomógrafo de raios-x de terceira geração modelo NIKON XT H 225 ST, cuja geração de raios-x ocorre entre um filamento de tungstênio (cátodo) e um alvo de tungstênio (ânodo) em voltagens de até 225kV e correntes de até 2 mA. O detector desse dispositivo possui 1918 x 1534 sensores (Figura 6a-c).

Figura 6: microTC modelo NIKON XT H 225 ST (a); Filtros (b); e Detector com 1918 x 1534 sensores (c).



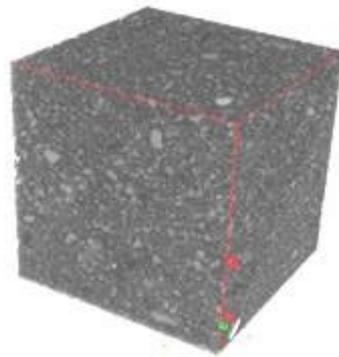
Fonte: O Autor (2016).

Foram utilizados como parâmetros no processo de aquisição da amostra a tensão de 150kV, corrente 226 μ A e tempo de exposição de 500 ms. A resolução espacial das imagens foi 50 μ m (50 x 50 μ m²). Foi utilizado também filtro de cobre com espessura 0,5 mm para minimizar os fótons de baixa intensidade, ou seja, minimizar artefatos do tipo feixe de endurecimento (*beam hardening*).

O subvolume de interesse de 840 x 840 x 840 voxels foi reconstruído em 3D utilizando o CTPro 3D XT 3.0.3 (Nikon Metrology NV) e a resolução espacial das imagens permaneceu com 50 μm ($50 \times 50 \times 50 \mu\text{m}^3$) (Figura 7).

No software VGStudio MAX 2.2 (Volumegraphics, Heidelberg, Alemanha) as imagens foram convertidas para a escala de Hounsfield, na qual o ar apresenta valor de 0 e a água valor igual a 1000, e foi utilizado o filtro de Gauss para a minimização de ruídos. O subvolume foi reconstruído em 840 fatias (*stacks*) axiais.

Figura 7: Subvolume reconstruído em 3D de amostra de solo Neossolo Regolítico eutrófico.



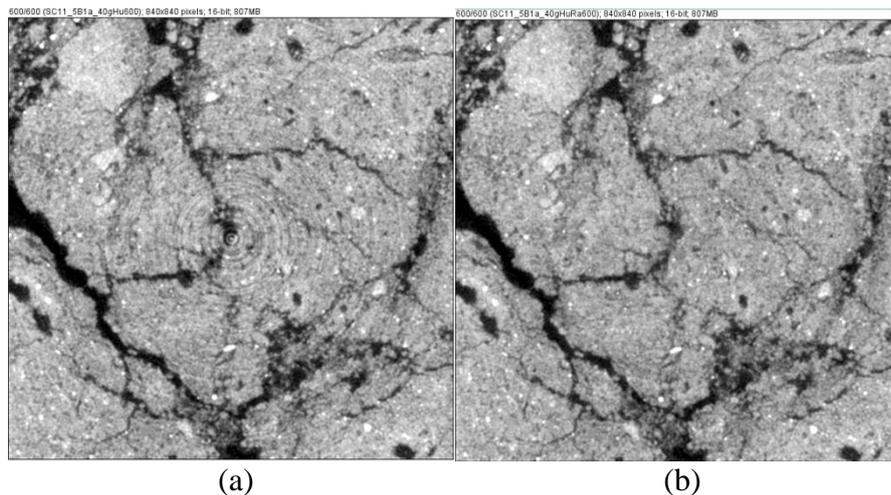
Fonte: O Autor (2016).

4.3 ARTEFATOS DE ANÉIS (RING ARTIFACTS)

Artefatos de anéis são defeitos circulares gerados pelo mau funcionamento dos sensores do detector, comprometendo quantitativamente e qualitativamente as imagens, prejudicando suas análises. Portanto, correções desses defeitos devem ser feitas para garantir uma melhor qualidade dos dados analisados.

As imagens das amostras de LVd apresentaram artefatos de anéis bem acentuados (Figura 8a), sendo necessário correções, as quais foram feitas como base na metodologia de Münch et al. (2009) e Wei et al. (2013). Para essas correções, ou seja, para supressão dos artefatos, as imagens segmentadas e em coordenadas cartesianas foram transformadas para coordenadas polares e foi aplicada uma combinação dos filtros wavelet e Fourier. Os parâmetros que melhor se ajustaram para remoção dos artefatos foram: nível de decomposição $L=12$, função base do wavelet db25 e filtro de Gauss $\sigma=10$, como se pode observar na imagem pós-filtragem (Figura 8b).

Figura 8: Imagens antes (a) e depois (b) da correção dos artefatos de anéis.



Fonte: O Autor (2016).

4.4 PROCESSAMENTO DE IMAGENS

Todo o processamento das imagens foi realizado no Laboratório de Tomografia Computadorizada de Raios-X do Departamento de Energia Nuclear, da Universidade de Federal de Pernambuco (DEN – UFPE), onde os arquivos foram salvos e trabalhados no Cluster do Laboratório, que possui uma excelente capacidade de processamento de dados em tempo hábil. Nesse Cluster estão os softwares utilizados na execução dessa etapa: ImageJ 1.50e (Rasband 1997-2015) e uma rotina de Matlab (MATrix LABORatory) desenvolvida para fitar gaussianas ao histogramas de imagens no intuito de calcular os valores dos picos (médias) e suas variâncias.

4.4.1 IMAGEJ

As funções ou plug-ins do ImageJ utilizadas neste trabalho foram:

- I. CTSegmentation (Plugin → CTofSoil → CTSegmentation): utilizada na segmentação de imagens para a separação de suas fases. A imagem utilizada é a imagem original em escala de Hounsfield com resolução radiométrica de 16 bits. Além disso, são utilizados como dados de entrada os picos (*Mean*) e as variâncias (*Variance*) das gaussianas de um histograma, como também, o número de desvios padrões (*ZScore*) representando uma dispersão em relação aos picos, ou seja, quanto se poderá adotar além do valor do pico para representar cada fase. A imagem segmentada gerada com 8 bits de resolução é binária, cujos pixels possuem valor 1 ou 2.

- II. Histogram (Analyse → Histogram): utilizada para gerar o histograma das imagens, são apresentados a contagem de voxels, a média, a moda, o desvio padrão, o valor máximo e mínimo para um determinado nível de cinza.
- III. Image Calculator (Process → Image Calculator): utilizada para realizar operações aritméticas e lógicas entre duas imagens. Por exemplo, a função soma executa a soma dos valores dos voxels de duas imagens, gerando uma única imagem com o valor resultante da soma. Essa imagem resultante pode ser gerada em 32 bits.
- IV. Large Bitwidth Thresholding (Plugin → CTofSoil → Large Bitwidth Thresholding): usada para binarização dos valores dos voxels. Em uma imagem de 8 bits, por exemplo, os voxels com o intervalo de valores selecionados são transformados para 255 e o que não fazem parte desse intervalo ficam com valor 0 (zero).
- V. Math (Process → Math): utilizada para realizar operações matemáticas entre o voxel da imagem e uma constante estabelecida. Por exemplo, adicionar uma unidade em cada voxel da imagem ou multiplicar cada voxel por 100.
- VI. Nan Computer (Plugin → CTofSoil → NaN Computer): utilizada para transformar valores de voxels em NaN (*not a number*), ou seja, sem número.
- VII. Particle Analyze (Plugin → CTofSoil → Particle Analyze): ferramenta utilizada para análise de partículas de uma imagem segmentada, fornecendo informações de cada partícula, como por exemplo, volume, área superficial, coordenadas XYZ do centro, eixos do elipsoide, momento de inércia e característica de Euler das partículas. As imagens utilizadas devem estar binarizadas. Esse plug-in há uma limitação de processamento, sendo em alguns casos necessário executá-lo por partes.
- VIII. Plot Z-axis Profile (Image → Stacks → Plot Z-axis Profile): ferramenta utilizada para gerar gráfico representando o valor médio de cinza das fatias ao longo do eixo Z (vertical).
- IX. Pure Voxel Extration (Plugin → CTofSoil → Pure Voxel Extration): ferramenta utilizada na localização dos voxels puros em uma imagem em escala de Hounsfield (HU) de 16 bits, no intuito de identificar as diferentes fases de um objeto. Esse plug-in busca os voxels de valores semelhantes aos da vizinhança (*Cube length*), dentro de um desvio padrão (*Threshold Ratio Limits* - σ) e um coeficiente de variabilidade limite (*Coefficient of Variability Limit* - CV). Esses voxels puros são mostrados na imagem gerada em 32 bit.

- X. Threshold (Image → Adjust → Threshold): ferramenta usada para visualizar as regiões de interesse dentro de um intervalo.

4.4.2 *SEGMENTAÇÃO DAS IMAGENS*

A segmentação de imagens consiste em distinguir as diferentes fases de interesse dentro de uma imagem. Ela consiste em um processo empírico, adaptativo e complexo que tenta traduzir para o computador um processo sofisticado realizado pela visão humana, sendo uma etapa bastante crítica e importante para se garantir a qualidade das análises posteriores.

A segmentação aqui adotada consiste em duas etapas:

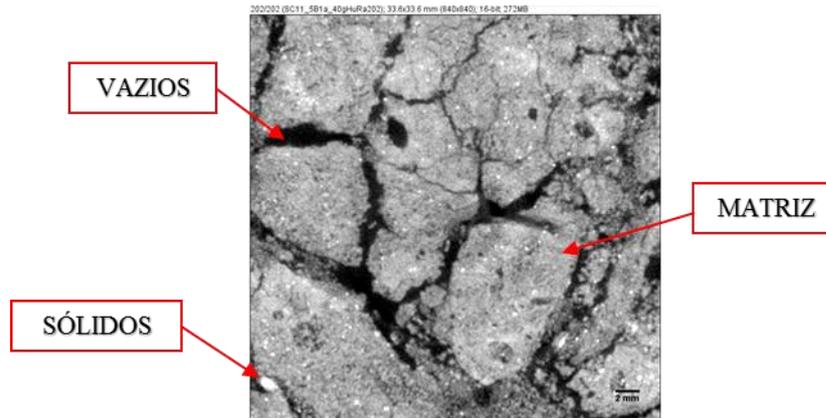
- Localização das fases dos voxels puros – Pure Voxel Extraction (PVE);
- Localização das fases dos voxels mistos – CT Segmentation.

Amostras de solo são constituídas de diversos materiais, com diferentes capacidades de atenuação, que são divididos em fases: fase dos vazios, da matéria orgânica, da matriz e dos fragmentos de rocha ou sólidos. A fase dos vazios, por estar preenchida por ar, constitui uma região menos densa e é representada na imagem em escala de cinza por tons mais escuros. A medida que a densidade do material aumenta, os tons que o representa na imagem são mais claros, por exemplo os fragmentos de rocha que são representados em coloração próxima a branco.

Como a metodologia aqui apresentada visa fazer uma segmentação multifásica para identificação de 3 regiões distintas da imagem (vazios, matriz e fragmentos de rocha ou sólidos) (Figura 9), a segunda etapa da segmentação foi realizada duas vezes:

- Segmentação A – segmentação de vazios e não-vazios;
- Segmentação B – segmentação de sólidos e não-sólidos.

Figura 9: fases do solo que serão segmentadas.



Fonte: O Autor (2016).

O fluxograma apresentado na Figura 10 mostra de forma resumida todas as etapas da segmentação das imagens adotadas neste trabalho e em seguida cada etapa desse procedimento é apresentada de forma detalhada.

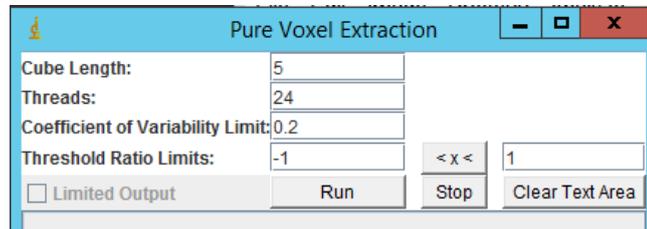
4.4.2.1 LOCALIZAÇÃO DOS VOXELS PUROS - PURE VOXEL EXTRACTION (PVE)

O PVE é uma ferramenta que tem como objetivo localizar os voxels relativamente puros dentro de uma imagem. Nela os voxels semelhantes a uma vizinhança, ou seja, aqueles que representam predominantemente uma única fase, são extraídos. As imagens dos voxels puros geradas por essa ferramenta possuem histogramas multimodais, nos quais cada curva gaussiana representa as fases em que esses voxels estão inseridos.

Para a localização dos voxels relativamente puros foram utilizadas as imagens em escala de cinza (HU) geradas após processo de reconstrução. Os parâmetros utilizados na ferramenta PVE do ImageJ foram: vizinhança de $5 \times 5 \times 5$, que significa que o voxel analisado está sendo comparado com 124 voxels vizinhos; coeficiente de variabilidade $CV=20\%$ e um desvio padrão 1σ (Figura 11). Esses dois últimos dados foram encontrados por tentativa e erro, sendo vários valores testados até se obter imagens com as quais foram possíveis gerar histogramas com maiores quantidades de picos, ou seja, aqueles que foram capazes de isolar melhor as regiões de interesse (Figura 12a-b).

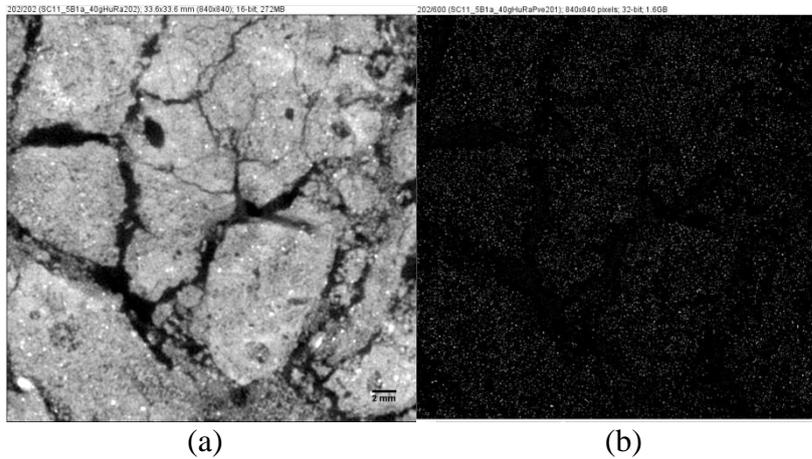
Percebe-se que o histograma obtido após PVE (Figura 13b), quando comparado com o histograma da imagem original em escala de cinza (HU) (Figura 13a), possui novos picos. Isso confirma que o método é válido para separar as curvas de cada fase, antes sobrepostas.

Figura 10: Interface do plug-in PVE com os dados utilizados.



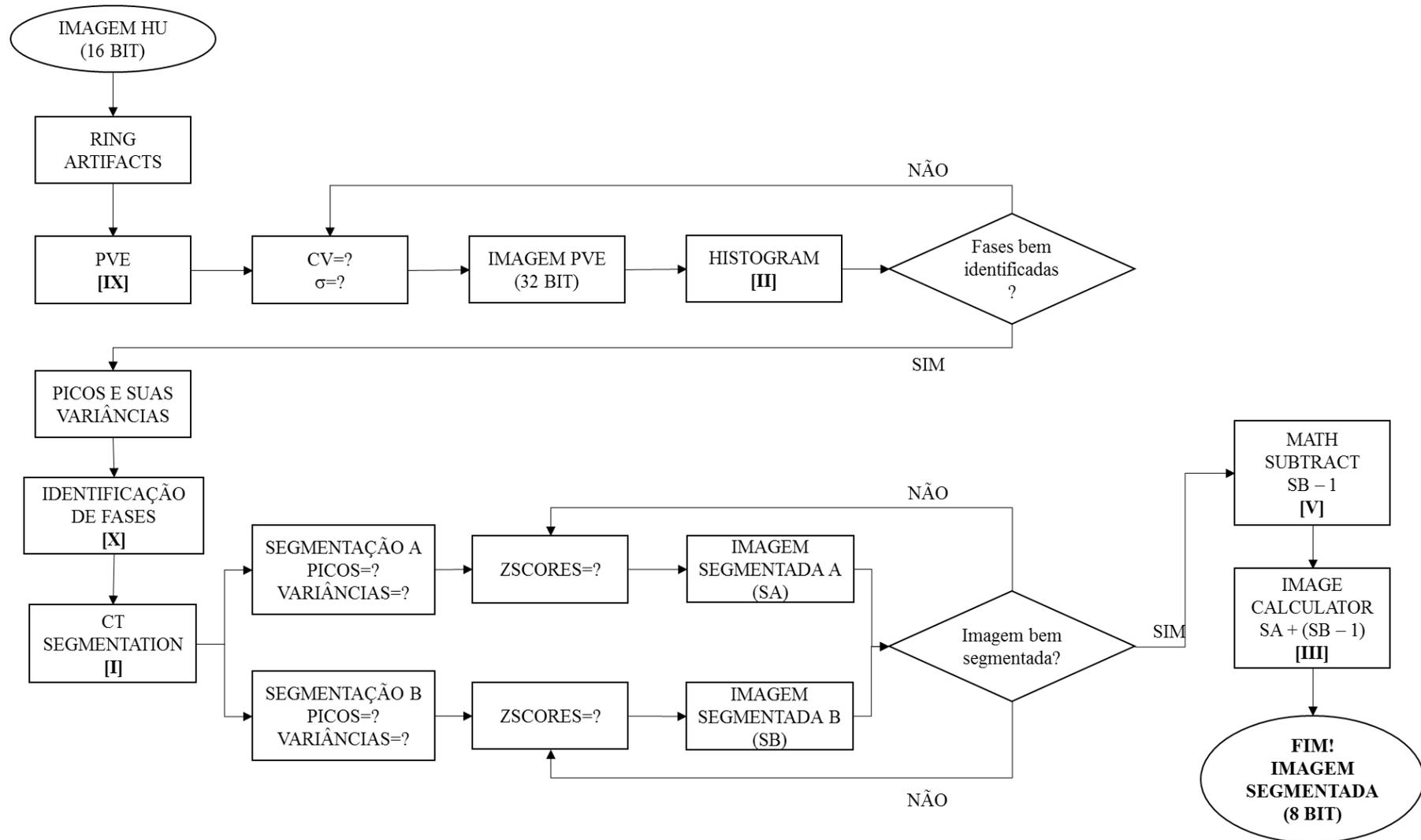
Fonte: O Autor (2016).

Figura 11: Imagem original em HU (a) e Imagem após PVE (b).



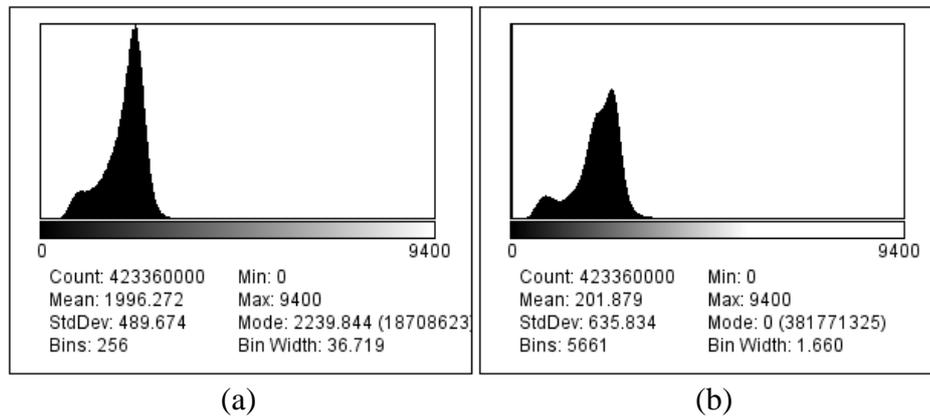
Fonte: O Autor (2016).

Figura 12: fluxograma do processo de segmentação de imagens



[I, II, III, V e IX] indicam as funções do ImageJ descritas no item 4.4.1 desse trabalho que foram utilizadas nas atividades apresentadas nesse fluxograma. Fonte: O Autor (2016).

Figura 13: Histograma da imagem original em HU (a) e Histograma da imagem após PVE (b).

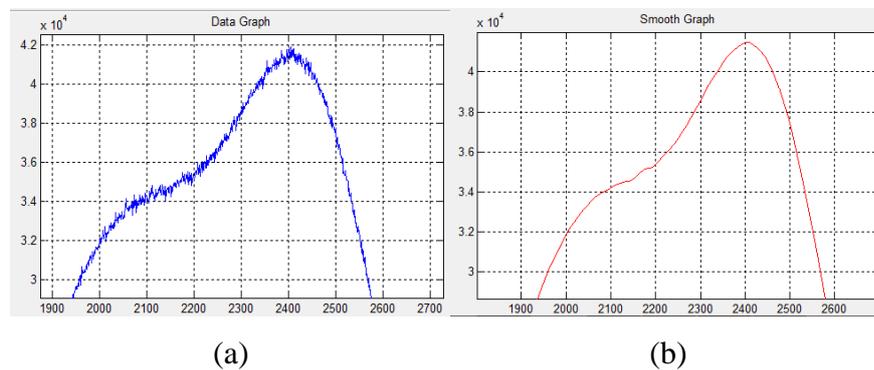


Fonte: O Autor (2016).

O histograma da imagem gerada no PVE é utilizado em uma rotina do Matlab com interface gráfica que ajustam gaussianas aos dados do histograma das imagens após PVE, no intuito de localizar os valores dos picos (médias) e calcular suas variâncias. Os valores obtidos com essa ferramenta estão apresentados na Tabela 2. Essa rotina consiste nos seguintes processos:

- *Smoothing Steps*: utilizado para suavizar os dados do histograma (Figura 14) e quanto mais *steps* utilizados, melhor a suavização. Neste trabalho foram utilizados 25 *steps*.

Figura 14: Histograma original (a); Utilizando o Smooth com 25 steps (b).

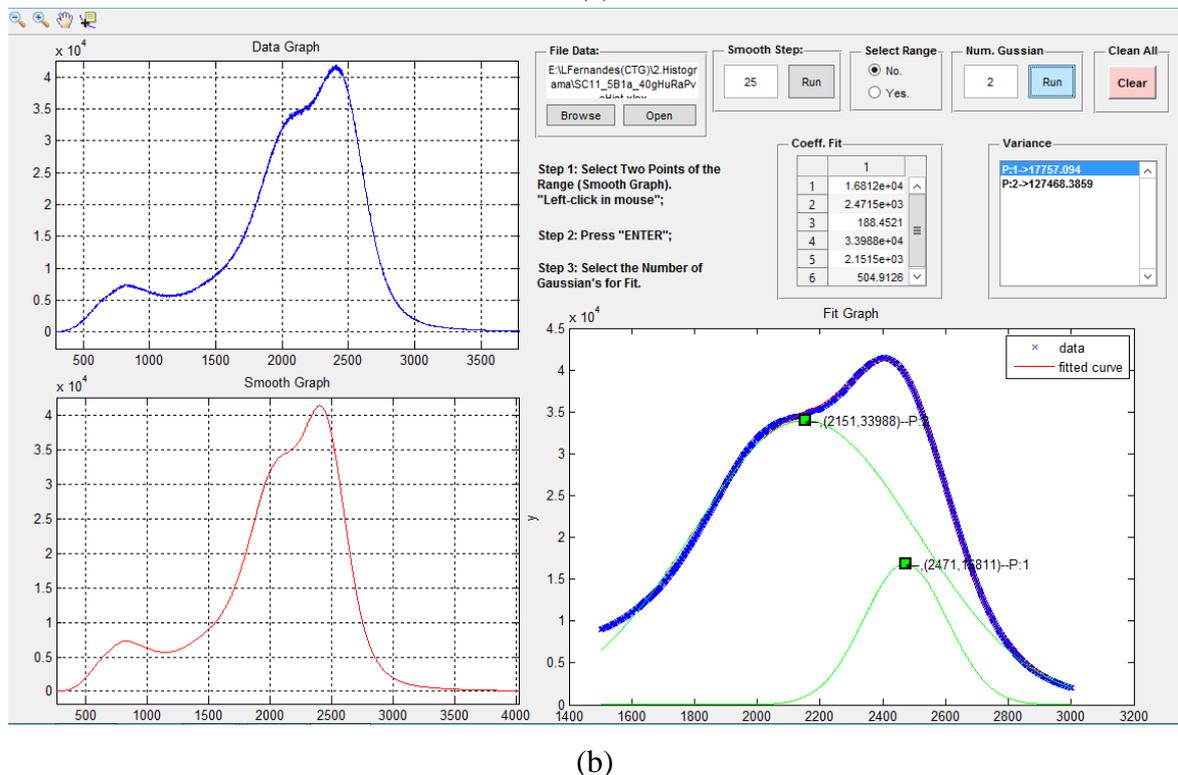
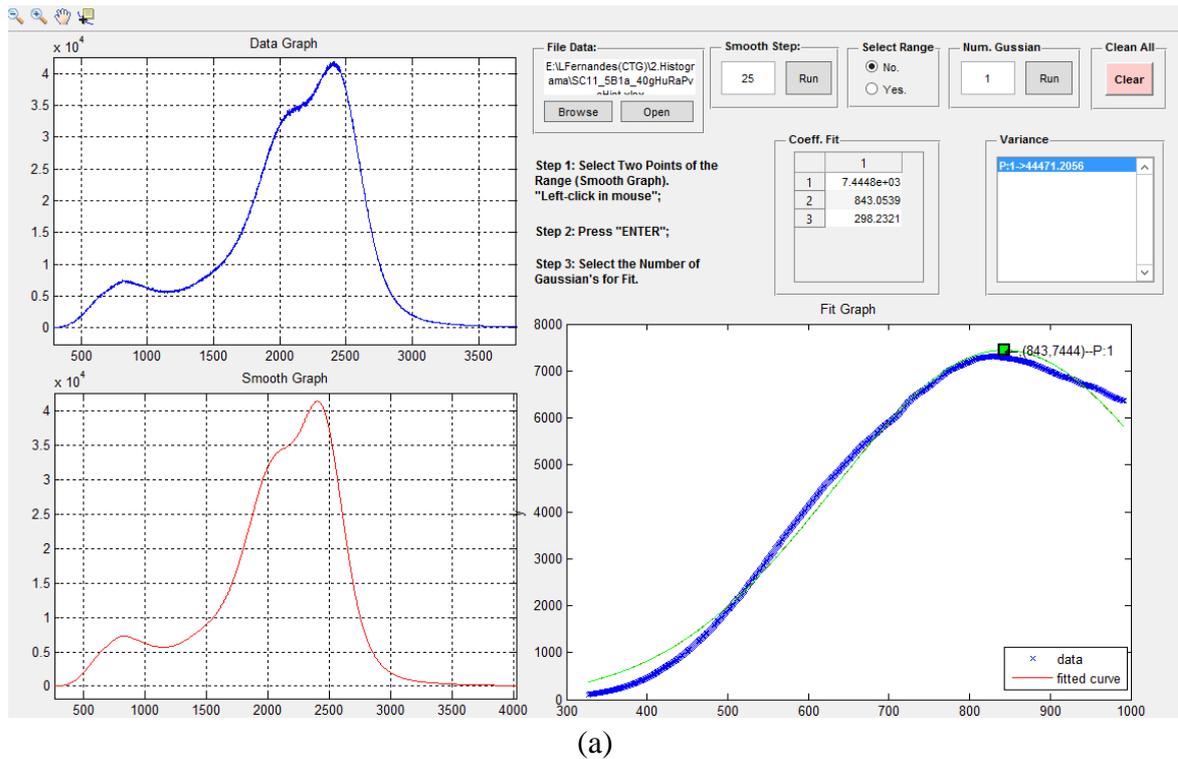


Fonte: O Autor (2016).

- *Select Range*: usado para selecionar parte do histograma. Foram utilizadas dois alcances diferentes na determinação dos dados: a) alcance de 300 a 1000 e b) alcance de 1500 a 3000 (Figura 15a-b).

- *Num. Gaussian*: quantidade de gaussianas que se ajustaram dos dados do histograma. As gaussianas encontradas então representadas pelas curvas em verde na Figura 15.

Figura 15: Seleção de alcance de 300 a 1000 (a); e de 1500 a 3000 (b).



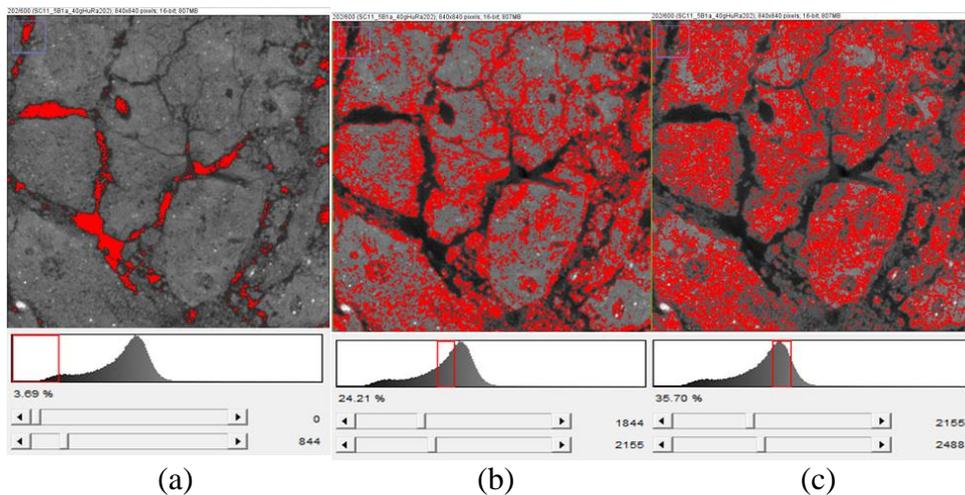
Fonte: O Autor (2016).

As médias das gaussianas calculadas na rotina de Matlab foram utilizadas para identificação das fases que cada pico representa. Para tal, foi utilizada uma ferramenta do ImageJ chamada *Threshold* para realizar a limiarização manual desses valores e identificar na

imagem original o que eles representam, ressaltando que não foi executado nenhum processo de segmentação com essa ferramenta, foi apenas feito uma verificação do que cada pico calculado na rotina do Matlab representava na imagem.

Com o processo de limiarização manual foi possível, portanto, verificar que o pico 1 representava os vazios e os picos 2 e 3 a matriz do solo (Figura 16) e que não foi possível encontrar um pico que representasse a fase dos fragmentos de rocha no histograma fornecido após PVE.

Figura 16: Threshold manual: a) região próxima ao P1 que representa os vazios; b) região próxima ao P2 representando matriz; e c) região do P3 que também representa matriz.



Fonte: O Autor (2016).

Com os valores das médias das curvas gaussianas geradas a partir de histogramas de voxels relativamente puros, suas variâncias e as fases do solo que esses valores representam (Tabela 2), foi possível identificar os voxels mistos, as fases em que eles estão inseridos e realizar a segmentação da imagem de fato.

Tabela 2: Valores dos Picos e das Variâncias resultantes da rotina do Matlab e as fases em que se encontram.

PICO	VALOR	VARIÂNCIA	FASE
1	843,7444	44471,2056	VAZIO
2	2151,33988	127468,3859	MATRIZ 1
3	2471,16811	17757,094	MATRIZ 2

Fonte: O Autor (2016).

4.4.2.2 LOCALIZAÇÃO DE VOXELS MISTOS - CT SEGMENTATION

O *CT Segmentation* (Figura 17) é utilizado para a segmentação das fases de uma imagem, dividindo-a em regiões distintas, cada uma com voxels de características semelhantes. Para tal, foi necessário localizar e determinar as fase em que os voxels mistos podem ser inseridos.

Os voxels mistos são aqueles que apresentam características de mais de uma fase, possuindo grande variabilidade quando comparado com seu entorno. Para localizá-los e determinar a fase em que eles possuem maior probabilidade de estarem inserido foram utilizados quatro métodos: *Clamping*, *Laplacian Filter*, *Edge Detection* e *Seeded Region Growing*.

Como o objetivo é segmentar três fases distintas, o processo utilizando esse plug-in foi dividido em duas etapas Segmentação A e Segmentação B. Para isso, foram utilizados os valores dos picos (*Mean*) e suas variâncias (*Variance*) encontrados a partir das gaussianas geradas na rotina do Matlab, como também, foram adotados quantidade de desvios padrões (*ZScore*) em busca por tentativa e erro dos valores que resultassem na melhor segmentação das fases de interesse quando comparadas com a imagem original.

Figura 17: Interface do plug-in CT Segmentation.

	Mean	Variance	SD	ZScore	Clamp
Left:	843.7444	44471.2056	210.881970779	0.5	853853899328
Right:	2151.33988	127468.3859	357.027150088	-1.5	991548679145

Fonte: O Autor (2016).

- Segmentação A (SA)

Nessa etapa foi realizada a segmentação dos vazios e não-vazios, na qual a matriz e os sólidos do solo constituem a fase dos não-vazios. Dessa forma, os picos que foram utilizados nessa segmentação foram os que representaram os vazios, ou seja, Pico 1, e o primeiro pico da matriz do solo (Pico 2) (Tabela 2).

Na Tabela 3 estão apresentados os valores utilizados nessa primeira segmentação, sendo 0,5 e -1,5 o valores da quantidade de desvios padrões que melhor segmentaram a imagem.

Tabela 3: Valores utilizados na segmentação dos vazios e não vazios.

SEGMENTAÇÃO A – AS			
PICO	VALOR(Mean)	VARIÂNCIA(Variance)	DESVIO PADRÃO (ZScore)
1	843,7444	44471,2056	0,5
2	2151,33988	127468,3859	-1,5

Fonte: O Autor (2016).

- Segmentação B

Nessa etapa foi feita a segmentação dos sólidos e não-sólidos. Nos não-sólidos estão inseridos os vazios e a matriz do solo. Porém, diferentemente da primeira segmentação, não foi encontrado um pico representando os fragmentos de rocha, apenas uma longa calda a direita do pico da matriz (Tabela 2). Segundo Jefferies (2014), para realizar a segmentação de uma fase, quando não se tem um pico a representando, basta utilizar o pico mais próximo com até 4 desvios-padrão, o que corresponde a 99,99% da curva normal, região está com baixa probabilidade de se encontrar não-sólidos. Portanto, os valores dos picos utilizados na SB foi o mesmo, pico da matriz 2 (Tabela 2), mudando apenas a dispersão utilizada.

Os valores utilizados nessa etapa foram apresentados na Tabela 4. As quantidades de desvios padrões que melhor segmentaram a imagem foram 2,0 e 4,0.

Tabela 4: Valores utilizados na segmentação dos sólidos e não sólidos.

SEGMENTAÇÃO B – SB			
PICO	VALOR(Mean)	VARIÂNCIA(Variance)	DESVIO PADRÃO (ZScore)
2	2471,16811	17757,094	2,0
3	2471,16811	17757,094	4,0

Fonte: O Autor (2016).

As etapas do processo de segmentação A operadas na ferramenta *CT Segmentation*, cujas imagens estão ilustradas na Figura 18, são:

a) *Imagem original*: imagens com resolução radiométrica de 16 bit, ou seja, com escala de cinza variando de 0 a 65535 tons. Os valores dessa imagem representam a atenuação de cada material constituinte da amostra na escala de Hounsfield.

b) Clamped: o *clamp* é o valor resultante da dispersão do pico devido à quantidade de desvios padrões utilizados. Na imagem gerada nessa etapa, a região entre os valores do *clamp* são representados pelos valores da imagem original e as outras regiões pelos valores de *clamp*.

c) Laplacian: o edge segmentation ou segmentação da borda foi uma teoria desenvolvida por Marr e Hildreth (1980), na qual foram utilizados gradientes para a determinação do zero-crossings (cruza o valor zero). O vetor gradiente fornece a direção e sentido de maior crescimento dos valores dos pixels, ou seja, a maior taxa de variação desses valores em relação à distância. Os autores utilizaram uma laplaciana como base para detectar as bordas, cujo objetivo era encontrar as posições na imagem em que a segunda derivada cruzava o valor zero (zero-crossings). Então a imagem era dividida em valores positivos e negativos representando as fases e o zero, indicando a borda, ou seja, o ponto de transição entre as fases. Nessa etapa, para o caso da Segmentação A, os valores negativos representam os vazios e os positivos os não-vazios. Para a Segmentação B, os positivos são os não-sólidos e os valores negativos, os sólidos.

d) Zero-crossing: são mostrados os valores mais próximos de zero, ou seja, aqueles que indicam o limite entre uma fase e outra. Essa região está representada na cor branca e possui valor de 255.

e) Unknown-255: voxels mistos são aqueles que se encontram no limite entre diferentes fases, não sabendo em qual ele está inserido e o Seeded Region Growing é uma teoria utilizada para determinar em qual fase inseri-los, na qual é analisada a diferença entre o nível de cinza de um voxel com a intensidade média dos níveis de cinza de uma região vizinha. A menor diferença indica que esse voxel é pertencente a essa fase e é adicionado a essa região. Portanto, essa etapa determina a região dos voxels que não se sabe em qual fase estão inseridos. Essa região encontra-se representada pela cor branca e valor 255.

f) Unknown-Laplacian: a imagem representa a variação nos valores dos voxels mistos definidos em (e) ao longo da distância. Eles possuem valores negativos e positivos indicando a mudança de fase.

g) MoreAir-255: a imagem gerada representa em branco e com valor de 255 os voxels com maior probabilidade de fazer parte dos poros.

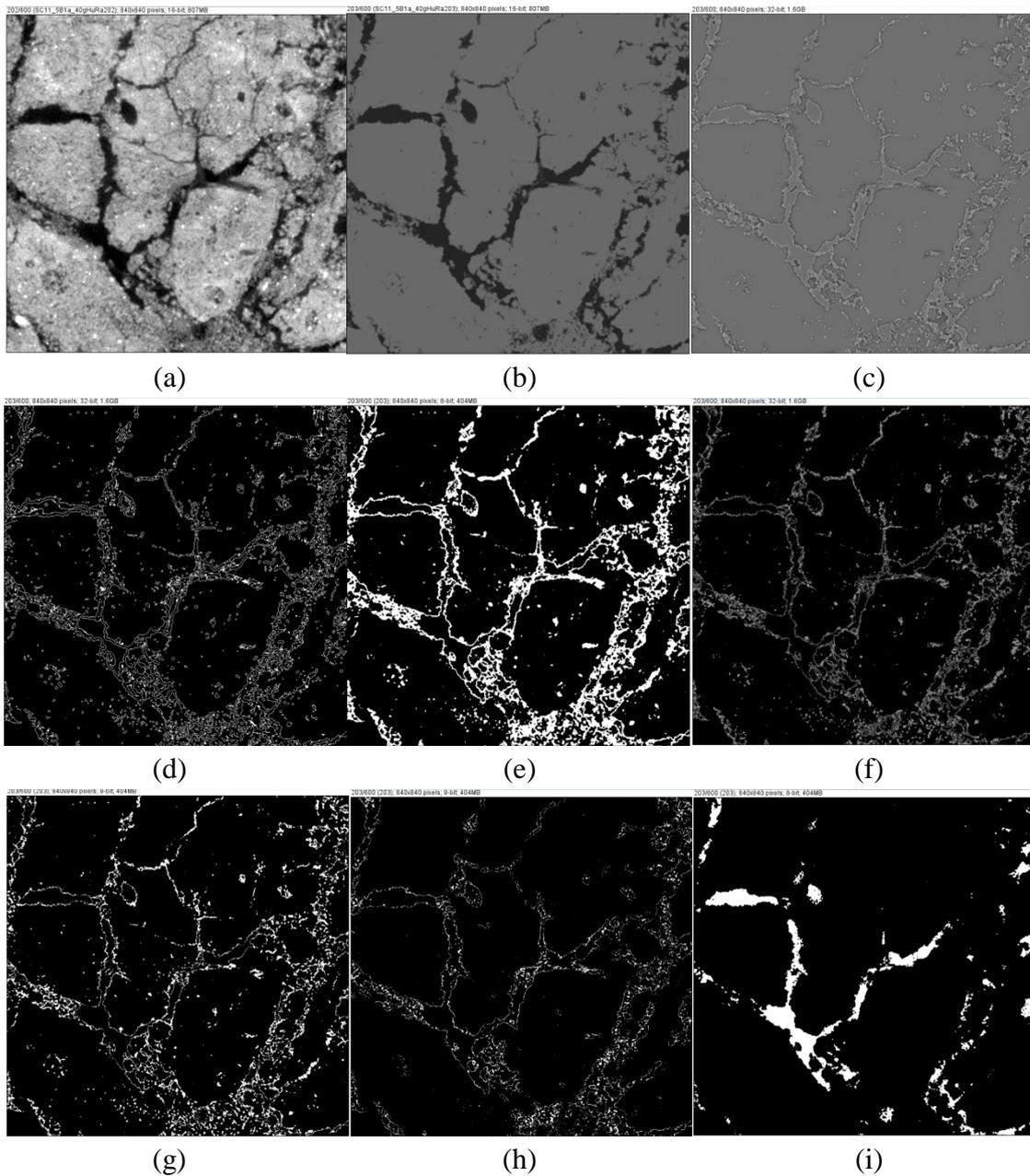
h) MoreSolid-255: a imagem representa em branco e com valor de 255 os voxels com maior probabilidade de não serem poros.

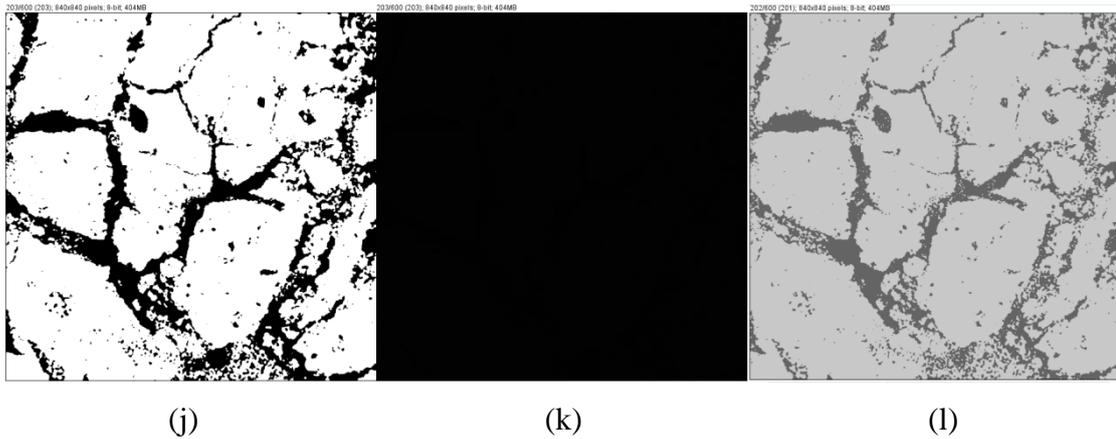
i) Air-255: representação dos vazios na cor branca e com valor de 255.

j) Solid-255: representação dos não-vazios pela cor branca e valor de 255.

k) Seed Image: imagem com os vazios e não-vazios segmentados, cujos valores estão apresentados na Tabela 5.

Figura 18: Segmentação A: imagem original Hu (a); Clamped (b); Laplacian (c); Zero-crossings (d); Unknown-255 (e); Unknown-Laplacian (f); MoreAir-255 (g); MoreSolid-255 (h); Air-255 (i); Solid-255 (j); Seed Image (k); e Seed Image multiplicada por 100 (l).

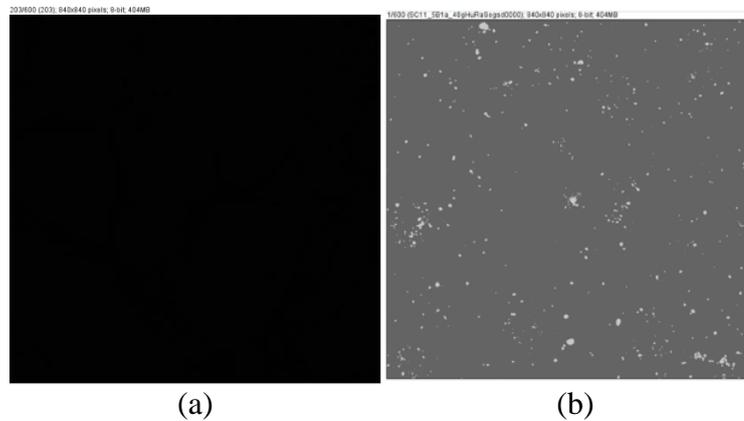




Fonte: O Autor (2016).

O *CT Segmentation* gera imagens binárias de 8-bits com voxels de valores 1 ou 2. Na SA o valor 1 representa os vazios e o valor 2 representa os não-vazios e na SB (Figura 19a-b), o 1 representa os não-sólidos e o valor 2, os sólidos (Tabela 5).

Figura 19: Imagem resultante da Segmentação B (a) e multiplicada por 100 (b).



Fonte: O Autor (2016).

Tabela 5: Valores das fases nas imagens geradas pelo processo de segmentação.

VALORES DOS VOXEL APÓS SEGMENTAÇÃO			
	VAZIOS	MATRIZ	SÓLIDOS
SEGMENTAÇÃO A	1	2	2
SEGMENTAÇÃO B	1	1	2

Fonte: o autor, 2016.

Como a escala em uma imagem de 8-bits vai de 0 até 255, os valores 1 e 2 são muito próximos de 0 (zero), deixando a imagem totalmente preta. Portanto, para uma melhor visualização, a imagem final do processo de *CT Segmentation* foi multiplicada (*Math*) por uma constante de 100, como mostrado na Figura 18 k-l

Após finalizadas as duas segmentações, foi gerada uma imagem final com as diferentes fases do objeto possuindo valores distintos. Para tal, foi feita uma redução de uma unidade do valor de cada voxel da imagem gerada em SB (*Math*), resultando em imagem com voxels de valor zero representando os não-sólidos e voxels de valor 1 representando os sólidos, que foi somada com a imagem da SA (*Image Calculator*). A Tabela 6 resume esse processo.

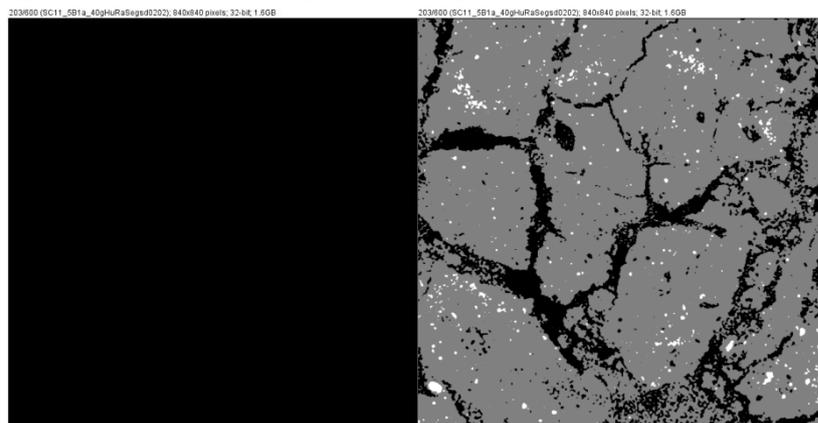
Tabela 6: Processo de geração de imagem final segmentada – valores das fases da imagem final.

IMAGEM SEGMENTADA			
	VAZIOS	MATRIZ	SÓLIDOS
SEGMENTAÇÃO A	1	2	2
SEGMENTAÇÃO B	0	0	1
SOMA	1	2	3

Fonte: O Autor (2016).

Com isso, a imagem final com as três fases segmentadas possui valor 1 representando os vazios, 2 indicando matriz e valor 3 para os sólidos (Tabela 6 e Figura 20a-b). Sendo a partir dessa imagem que os processos de análise dos poros foram realizados.

Figura 20: Imagem final segmentada original (a) multiplicada por 100 (b).



(a)

(b)

Fonte: O Autor (2016).

4.4.3 ANÁLISES DAS IMAGENS

Para a análise das imagens também foi utilizado o Cluster do Laboratório de Tomografia Computadorizada de Raios-X do Departamento de Energia Nuclear, da Universidade de Federal de Pernambuco (DEN – UFPE). Foram utilizados o software de licença livre, ImageJ 1.50e e planilhas elaboradas em Microsoft Office Excel 2013 para execução das etapas e armazenamento de resultados.

As análises dos vazios foram realizadas em duas etapas:

- Análise morfométrica dos vazios;
- Análise da variabilidade espacial da matriz.

A primeira etapa visou a análise os vazios inter-agregados e intra-agregados que foram possíveis serem detectados. E a segunda etapa visou correlacionar a variabilidade espacial da matriz do solo com os vazios intra-agregados que não foram possíveis serem detectados devido a limitação da resolução.

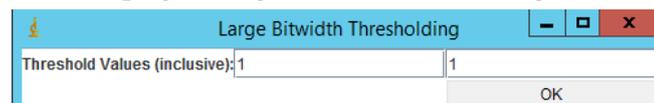
4.4.3.1 ANÁLISE MORFOMÉTRICA DOS VAZIOS

Foi utilizada a imagem segmentada de 8 bit resultante do processo descrito no item 4.4.2 deste trabalho para a análise da porosidade do solo, sendo determinados parâmetros quantitativos e qualitativo, como porosidade, densidade, porosidade inter-agregados e intra-agregados, como também, tamanho, forma e inclinação dos vazios intra-agregados.

Como a fase estudada é a de vazios, foi utilizada a ferramenta *Large Bitwidth Thresholding* para binarizar os valores dos voxels que representam essa fase no valor máximo da escala de cinza de 8 bit, ou seja, valor 255, e modificar os valores da fase de não interesse (não-vazios) para 0 (zero). A imagem resultante desse processo representa na cor branca os vazios e na cor preta os não-vazios (Figura 22).

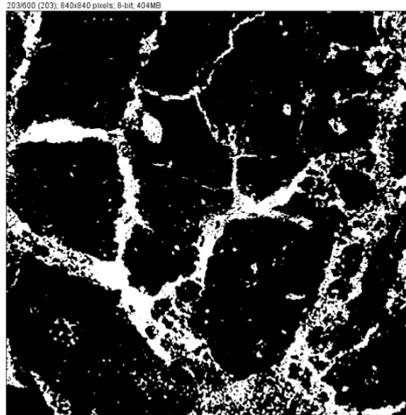
Para tal, foi inserido o valor que representa os voxels da fase de interesse na imagem segmentada, ou seja, valor 1, como mostrado na Figura 21. O resultado desse procedimento foi utilizado no estudo de partículas, utilizando o plug-in *Particle Analyzer*, o qual fita elipsoides para cada poro, calculando as dimensões e coordenadas de seus eixos (maior, intermediário e menor).

Figura 21: Interface do plug-in Large Bitwidth Thresholding com os dados utilizados.



Fonte: O Autor (2016).

Figura 22: Imagem gerada após Large Bitwidth Thresholding: o branco tem valor de 255 e o preto possui valor 0.



Fonte: O Autor (2016).

Na análise de partículas, os vazios foram classificados em 3 faixas de tamanho: pequenos (P), médios (M) e grandes (G). Os vazios pequenos são aqueles que em uma imagem de resolução de 40 μm são formados por até 8 voxels, os médios entre 9-100000 voxels e os grandes são aqueles com uma quantidade de voxels maior que 100001 (Tabela 7). Essa divisão foi feita devido a capacidade limitada de processamento do plug-in Particle Analyzer em identificar e rotular os muitos vazios existentes em uma imagem tomográfica. Na Tabela 7 foram apresentados os volumes adotados para cada faixa de classificação de vazios para uma resolução de 40 μm .

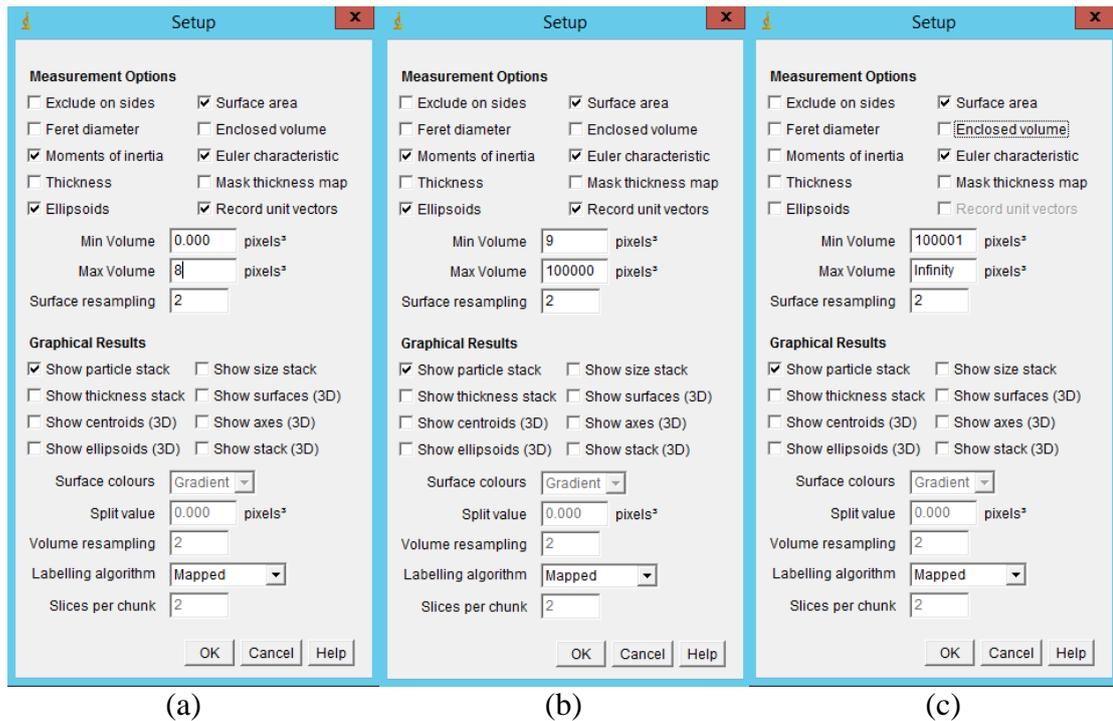
Tabela 7: Classificação dos vazios e seus volumes para uma resolução de 40 μm .

Classificação dos Macroporos	Tamanho(voxel)	Volume(mm^3)
Resolução de 40 μm		
Pequeno (P)	0 – 8	$\leq 5,12 \times 10^{-4}$
Médio (M)	9 – 100000	$5,76 \times 10^{-4} - 6,4$
Grande (G)	≥ 100001	$>6,4$

Fonte: O Autor (2016).

No plug-in *Particle Analyzer* (Figura 23) foram medidos alguns parâmetros dos vazios, como momento de inércia, dados dos eixos do elipsóides, área superficial e característica de Euler.

Figura 23: Interface do plug-in Particle Analyzer com os dados utilizados para Pequenos (P) (a); Médios (M) (b); e Grandes (G) (c).



Fonte: O Autor (2016).

O fluxograma da Figura 24 resume as atividades executadas na determinação dos dados necessários a análise morfométrica dos vazios.

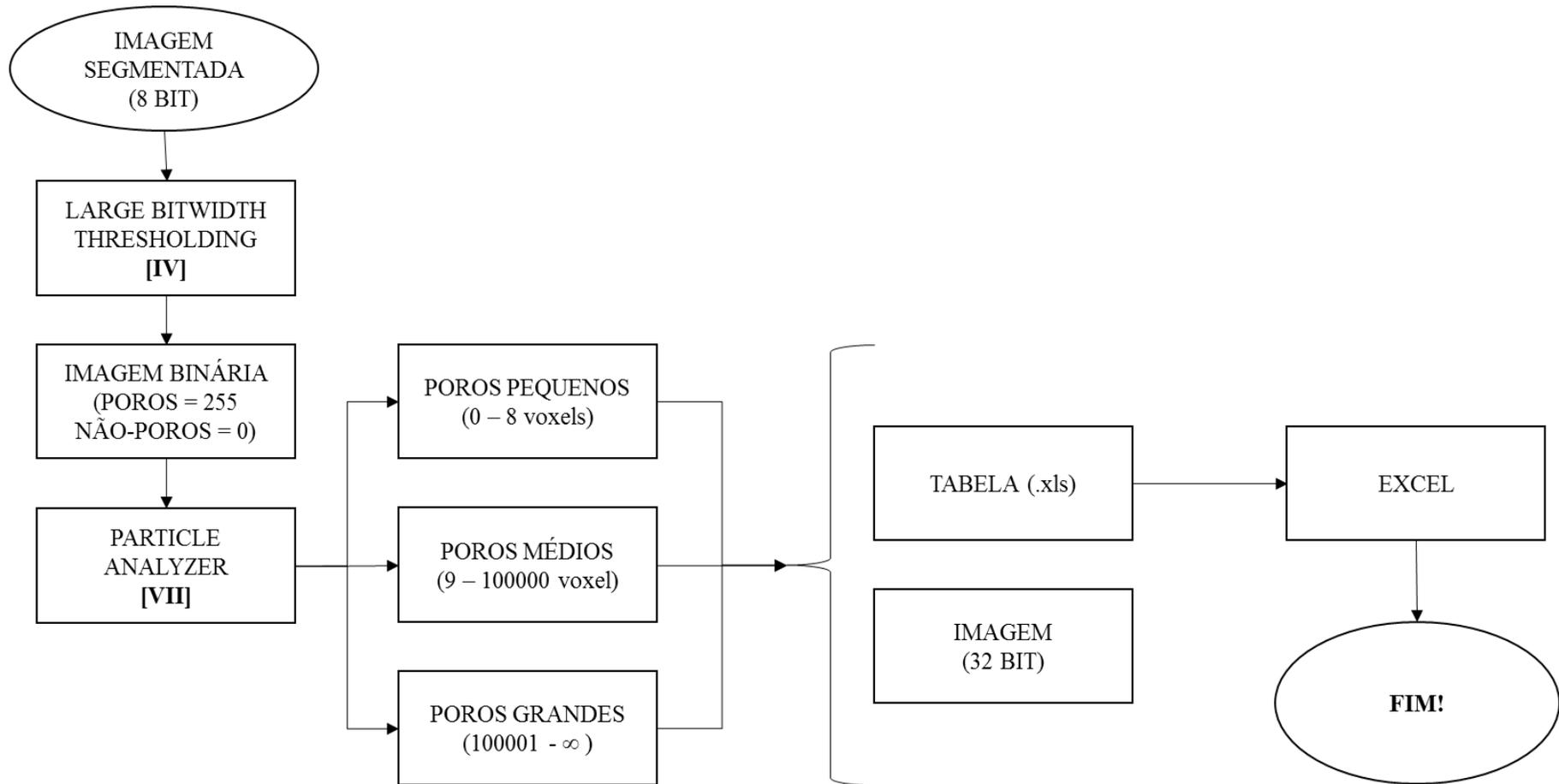
A porosidade foi calculada pela relação entre a soma dos volumes dos vazios (P, M e G) (Equação 2) e o subvolume reconstruído da amostra (Equação 3). Para isso, os volumes dos poros (mm^3) foram calculados como sendo a multiplicação do volume (em voxel) fornecido pelo plug-in e a resolução da imagem (tamanho do voxel) (Equação 1).

$$V_{\text{poro}} = V_{\text{Voxel}} \cdot (\text{voxel}^3) \quad (1)$$

$$V_{\text{total}} = \sum V_{\text{poro (P)}} + \sum V_{\text{poro (M)}} + \sum V_{\text{poro (G)}} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{V_{\text{total}}}{V_{\text{subvolume}}} \times 100 \quad (3)$$

Figura 24: fluxograma do processo de análise de vazios



[IV e VII] indicam as funções do ImageJ descritas no item 4.4.1 desse trabalho que foram utilizadas nas atividades apresentadas nesse fluxograma. Fonte: O Autor (2016).

Os vazios do tipo (P) e (M) foram classificados quanto a sua forma, tamanho, inclinação e orientação. Para tal, foram utilizados parâmetros como o valor e posição no elipsoide do eixo menor (Me), eixo intermediário (In) e eixo maior (Ma) calculados pelo plug-in *Particle Analyzer*.

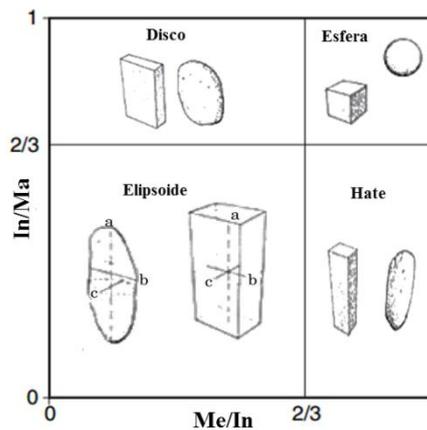
A classificação da forma foi feita de acordo com a Classificação de Zingg (1935) e terminologias adotadas por Bullock et al. (1985) (Tabela 8 e Figura 25).

Tabela 8: Classificação dos poros quanto sua forma.

CLASSIFICAÇÃO QUANTO À FORMA	CONDIÇÕES DE FORMA	
	In/Ma	Me/In
Esfera (ESF) - equant	$\geq 2/3$	$\geq 2/3$
Haste (HAT) - prolate	$< 2/3$	$\geq 2/3$
Disco (DSC) - oblate	$\geq 2/3$	$< 2/3$
Elipsoide (ELP) - triaxial	$< 2/3$	$< 2/3$

Fonte: Adaptado de Zingg (1935)

Figura 25: Forma de um objeto definida por meio de seus eixos principais.



Fonte: Adaptada de Zingg (1935) e Bullock et al. (1985).

Pode ocorrer do plug-in *Particle Analyzer* não ser capaz de contabilizar os voxels constituintes de um eixo do vazio, impossibilitando a determinação de sua forma. Esses vazios foram classificados como complexos (CP).

Os vazios intra-agregados também foram agrupados de acordo com o tamanho em microvazios, mesovazios e macrovazios, e subclassificados em muito grosso (mg), grosso (g), médio (md), fino (f) e muito fino (mf). Essa subclassificação foi baseada na correlação com os volumes ocupados pelos grãos do solo, como cascalho, areia e silte de acordo com o diâmetro

de uma esfera equivalente desses grãos, seguindo os critérios de classificação adotado por Passoni et al. (2015). Na Tabela 9, estão apresentados os volumes dos poros para cada classe.

Tabela 9: Classificação dos poros em relação ao volume.

SUBDIVISÃO DOS VAZIOS	DIÂMETRO DE UMA ESFERA EQUIVALENTE (mm)	VOLUME (mm ³)
MICROVAZIOS (SILTE)		
< mg Micro	0,03125	1,598 x 10 ⁻⁵
mg Micro	0,0625	1,278 x 10 ⁻⁴
MESOVAZIOS (AREIA)		
mf Meso	0,125	1,023 x 10 ⁻³
f Meso	0,25	8,181 x 10 ⁻³
md Meso	0,50	6,545 x 10 ⁻²
g Meso	1,00	5,230 x 10 ⁻¹
mg Meso	2,00	4,189 x 10 ⁰
MACROVAZIOS (CASCALHO)		
mf Macro	4,00	3,351 x 10 ¹
>mf Macro	8,00	2,2681 x 10 ²

Fonte: adaptada de Passoni et al. (2015).

4.4.3.2 ANÁLISE ESPACIAL DA MATRIZ DO SOLO

Foi feita uma análise espacial da matriz do solo para o estudo da sua anisotropia por meio da densidade da estrutura relacionada à atenuação. O perfil da radiodensidade em relação ao eixo Z foi construído a partir de imagem em escala de cinza dessa fase (Figura 26).

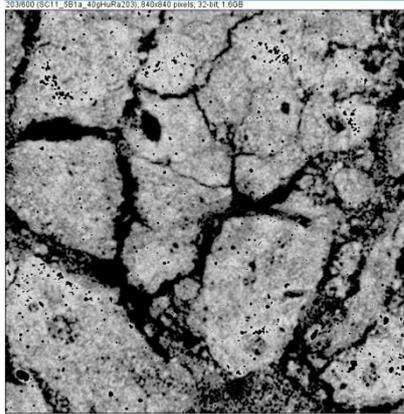
Para isso, os voxels da imagem final do processo de segmentação foram convertidos para 1, representando a matriz, e NAN (*Not a number* – sem número) para as fases de não interesse (vazios e sólidos), com o plug-in *Nan Converter*. A imagem resultante foi então multiplicada pela imagem original em escala de cinza (HU) (*Image Calculator*), gerando uma imagem da matriz com os valores originais da escala de cinza e a fase de vazios e sólidos com valores de NAN. Na Tabela 10 estão apresentados os valores dos voxels após utilização dos plug-ins mencionados.

Tabela 10: Valores da imagem para análise espacial

	VAZIOS	MATRIZ	SÓLIDOS
NAN CONVERTER	NAN	1	NAN
IMAGE CALCULATOR	NAN	HU	NAN

Fonte: O Autor (2016).

Figura 26: Matriz do solo em escala de cinza (HU).



Fonte: O Autor (2016).

A imagem da matriz em escala de cinza foi utilizada no plug-in *Plot Z-axis Profile* para determinação da radiodensidade média das fatias dos subvolumes reconstruídos ao longo de suas profundidades.

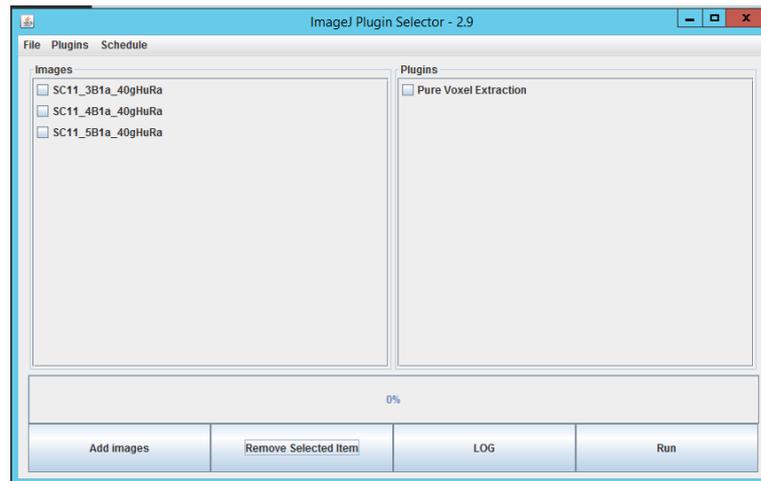
4.5 BATELADA (BATCH)

Como as imagens do LVd aqui analisadas passaram pelo mesmo processo de aquisição, os procedimentos descrito anteriormente para PVE e Segmentação foram realizados apenas para duas amostras do conjunto, afim de escolher os parâmetros ideais a serem utilizados em cada etapa. Após determinação dos mesmos, o processo de segmentação e análise foram feitos em batch.

Executar em batch significa realizar o mesmo procedimento em muitos arquivos ao mesmo tempo com o objetivo de otimizar tarefas e evita erros humanos.

O programa que executa as etapas de segmentação e análise em batch, Figura 27, possui todos os plug-ins mencionados anteriormente. A única diferença do procedimento descrito é que foi gerado um histograma médio de todos os histogramas gerados após PVE, o qual foi utilizado na rotina do Matlab para a determinação dos picos e variâncias das curvas que representam cada fase da imagem. Esses valores da média foram os utilizados no *CT Segmentation*.

Figura 27: Interface gráfica do plug-in batch.



Fonte: O Autor (2016).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 POROSIDADE

Para o solo Latossolo Vermelho distrófico (LVd) a porosidade variou de 13% a 22% para solos sob cultura da cana-de-açúcar (Tabela 11), valores esses bem menores que as porosidades totais encontradas por Silva e Castro (2014) para o mesmo tipo de solo e nas mesmas condições de manejo (Tabela 1).

Essa redução da porosidade encontrada nas análises de imagens tomográficas pode ser justificada pela limitação decorrente da resolução dessas imagens. No caso do LVd, por exemplo, os voxels das imagens possuem dimensões $0,04 \times 0,04 \times 0,04 \text{ mm}^3$, restringindo a possibilidade de análise das partículas com volumes superiores ao volume do voxel, ou seja, maiores que $6,4 \times 10^{-5} \text{ mm}^3$.

O mesmo foi verificado para o Neossolo Regolítico eutrófico (NRe) quando comparada sua porosidade determinada pela análise de imagens (28%) com a porosidade total obtida por Santos et al. (2012), Da Silva et al. (2014) e De Almeida et al. (2015). Nesse caso a limitação foi de $12,5 \times 10^{-5} \text{ mm}^3$, visto que, a resolução das imagens é de $50 \mu\text{m}$.

Tabela 11: Atributos físicos do Latossolo Vermelho e do Neossolo Regolítico obtidos com a aplicação de Microtomografia Computadorizada de Raios-X.

AMOSTRA	PROF	P	AG	V. INTER	V. INTRA
	Cm			(%)	
Latossolo Vermelho distrófico – LVd					
LVd_soja	30-70	13	90	10	3
LVd_pasto	20-44	18	84	16	2
LVd_suc.	29-56	22	79	21	1
Neossolo Regolítico eutrófico – NRe					
NRe	0-20	28	73	27	1

Profundidade (PROF), porosidade (P), agregados (AG), vazios inter-agregados (V. INTER) e vazios intra-agregados (V. INTRA) dos solos. Fonte: O Autor (2016).

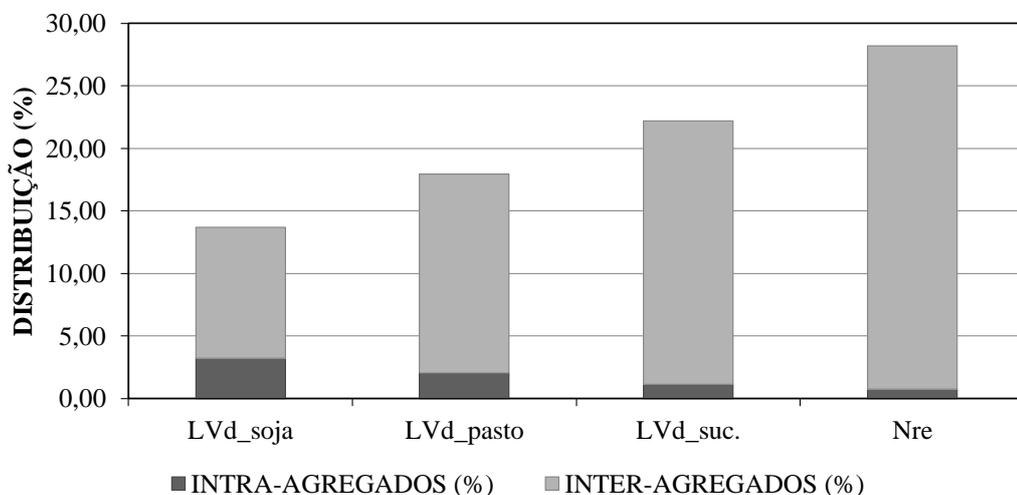
Para os solos LVd, a porosidade encontrada representou 41% da porosidade total obtida por Silva e Castro (2014) para o LVd_soja, 49% para o LVd_pasto e 55% para solo LVd_suc. A porosidade obtida para o solo NRe foi 65% da porosidade apresentada por De Almeida et al. (2015) (Tabela 1). Portanto, houve uma redução mais acentuada na porosidade dos solos LVd

que no solo NRe, isso podendo ser justificado pela diferença em suas classes texturais, visto que, solos arenosos como o NRe tem como característica possuir poros de tamanhos maiores que os solos com maior teor de argila, como o LVd. Sendo esse último mais prejudicado pela limitação da técnica em analisar os poros menores.

Diante dessa limitação da técnica devido a resolução das imagens, a porosidade encontrada pela μ TC de raios-x não pode ser considerada como porosidade total do solo.

Em relação aos vazios inter e intra-agregados, verificou-se uma redução na quantidade do primeiro tipo e um aumento do segundo com a redução da porosidade, tanto quando analisado solos com classes texturais diferentes, como para mesmo tipo de solo submetido a diferentes manejos (Figura 28).

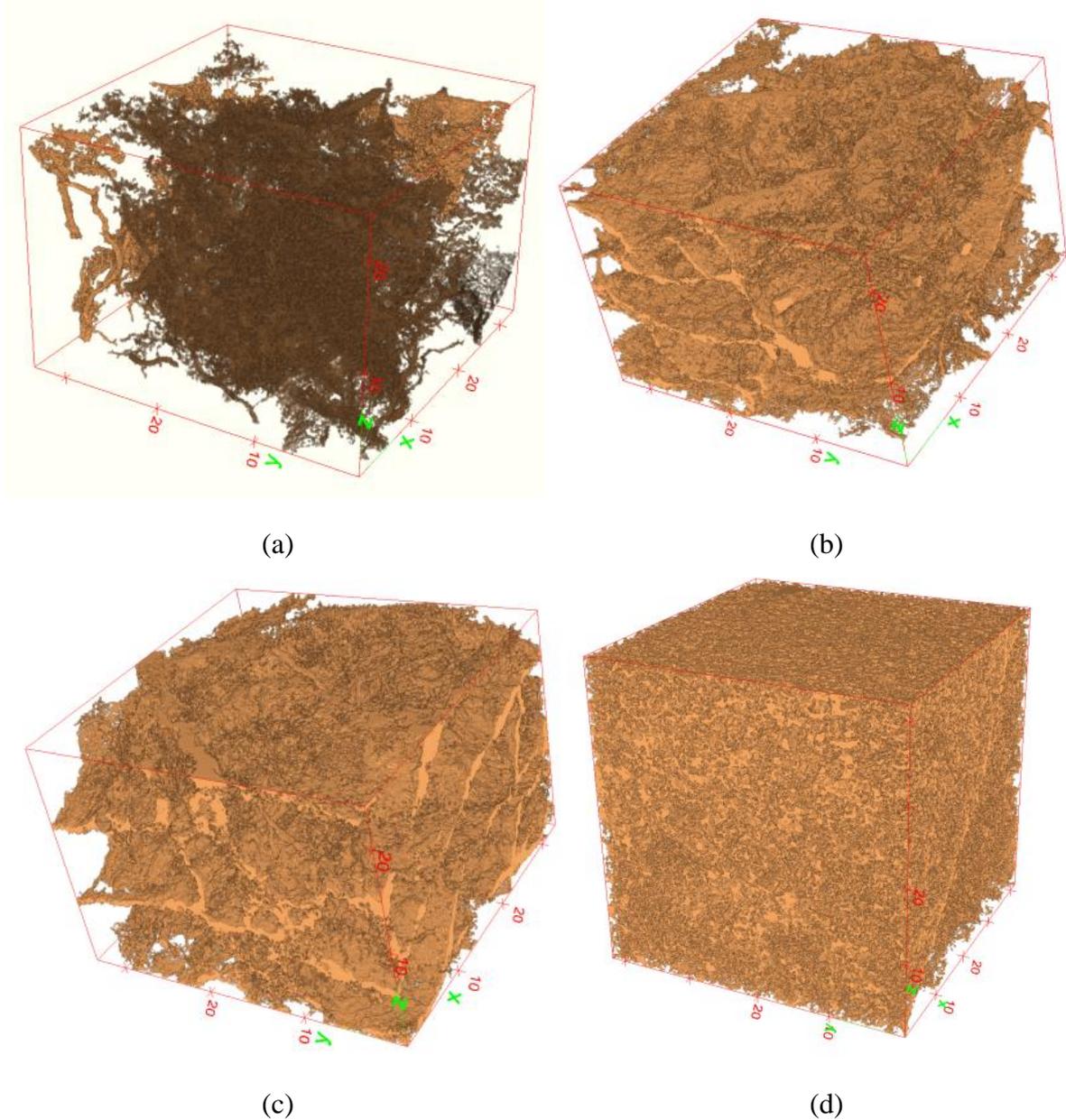
Figura 28: Distribuição dos vazios inter-agregados e dos vazios-intra-agregados para o solo Latossolo Vermelho distrófico (LVd) submetido a diferentes manejos e para um solo Neossolo Regolítico eutrófico (NRe).



Fonte: O Autor (2016).

O solo NRe apresentou uma porosidade inter-agregados maior que o solo LVd, se constituindo em um comportamento esperado, uma vez que solos de textura arenosa tendem a possuir uma macroporosidade maior que solos com maiores teores de argila. As imagens tomográficas em 3D da Figura 26a-d ilustram bem o comportamento do espaço poroso desses dois tipos de solo, mostrando uma rede de macroporos maior e mais contínua no solo NRe.

Figura 29: Espaço poroso inter-agregados do Latossolo Vermelho distrófico: LVd_soja (a), LVd_pasto (b), LVd_suc (c) e do Neossolo Regolítico eutrófico (d).



Fonte: O Autor (2016).

Comparando as amostras de um único tipo de solo (LVd), observou-se uma maior frequência de poros inter-agregados no LVd_suc, seguida por LVd_pasto e, por último, o LVd_soja. A compressão do solo que é ocasionada pelas diferentes práticas de manejo, com uso intensivo do solo e a presença de maquinários durante os processos de cultivo e colheita, promovem mudanças na estrutura do solo (WENDLING et al., 2005). Isto diminui os tamanhos dos vazios maiores, devido ao aumento da separação desses poros e uma perda de continuidade e conectividade, reduzindo, assim, sua capacidade de conduzir água e, conseqüentemente,

alterando o desenvolvimento do sistema radicular das plantas estabelecidas sobre ele (SHÄFFER et al., 2008 I e SHÄFFER et al., 2008 II). Diante disso, e considerando que as condições de cultivo da cana-de-açúcar foram iguais em todos os solos analisados, a redução dos vazios inter-agregados detectada nas amostras de solo LVd pode representar uma diferença no grau de compactação causada pelos tipos de manejo utilizados antes do cultivo da cana-de-açúcar, com o solo LVd_soja sendo aquele que apresentou uma maior compactação. Porém, ao se analisar as imagens tomográficas dos subvolumes em 3D (Figura 5b-c), percebeu-se a presença de fissuras nas amostras do solo LVd_pasto e do solo LVd_suc. Essas fissuras podem ter sido geradas em consequência de uma coleta inadequada, como também pelo manejo inadequado das amostras, resultando em um aumento na frequência de poros inter-agregados nessas duas amostras.

Considerando os poros intra-agregados, os valores de porosidade obtidos foram de 3%, 2% e 1% para os solos LVd_soja, LVd_pasto e LVd_suc, respectivamente. O NRe também apresentou uma porosidade intra-agregados de 1%. Como esperado, o NRe apresentou uma das menores porosidade intra-agregada, devido a uma baixa capacidade de agregação das partículas característica dos solos arenosos.

A agregação das partículas do solo está fortemente relacionada à concentração e tipo de argila, ao teor de matéria orgânica e à presença de microrganismos e raízes de plantas. Solos arenosos possuem partículas menos predispostas à formação de agregados, quando comparados aos solos com maiores teores de argila, justificando, também, a menor quantidade de agregados encontrada no solo NRe, com 73%, em função de sua maior concentração de areia.

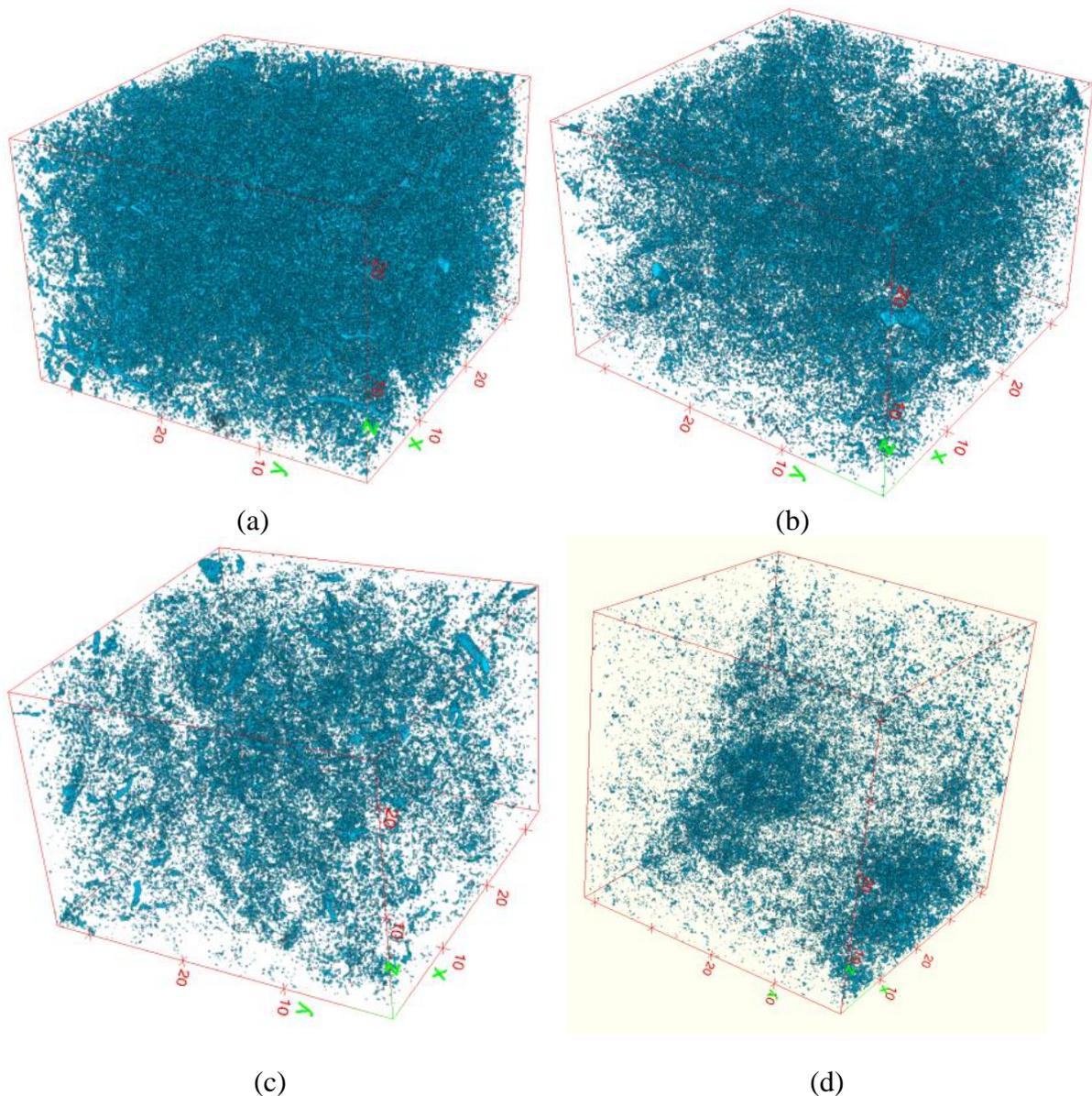
Analisando as amostras de solo LVd, a amostra LVd_suc, com 79%, possui menor agregação que as outras duas, mesmo tendo maior concentração de argila (Tabela 2). Uma possível justificativa para esse comportamento estar relacionada às fissuras verificadas a partir das análises nas imagens tomográficas em 3D desses solos (Figura 5b-c), pois o aumento de poros maiores resultou na redução da quantidade de agregados desses solos. Porém, deve ser feito um estudo mais detalhado do teor de matéria orgânica e densidade do solo para entender melhor esse comportamento e verificar se existe alguma relação com a compactação desse meio.

A perda de continuidade dos poros maiores causada pela compactação do solo resulta em um aumento na quantidade de meso e microporos. Com isso, analisando o comportamento dos vazios intra-agregados (Tabela 2), verificou-se uma maior quantidade desse tipo de poro no LVd_soja, seguido por LVd_pasto e LVd_suc. Pode-se verificar esse comportamento na

distribuição no espaço poroso intra-agregados dos solos LVd_soja, LVd_pasto, LVd_suc (Figura 30a-c), tendo uma menor densidade desse tipo de poro no LVd_suc, (Figura 30c).

Porém, como há uma limitação da técnica devido à resolução das imagens; a quantidade desse tipo de poros pode não estar sendo bem representada. O solo LVd_suc pode apresentar uma quantidade bem maior de microporos que o solo LVd_soja, os quais não estão sendo computados em consequência dessa limitação.

Figura 30: Espaço poroso intra-agregados do Latossolo Vermelho distrófico: LVd_soja (a), LVd_pasto (b), LVd_suc (c) e do Neossolo Regolítico eutrófico (d).



Fonte: O Autor (2016).

Com isso, não se pode determinar o grau de compactação dessas amostras analisando apenas os dados obtidos. É necessária uma análise mais detalhada do poros intra-agregados por

meio de um estudo morfométrico, para que se possa entender melhor as mudanças na estrutura de um solo e, conseqüentemente, a dinâmica dos fluidos e o desenvolvimento das plantas estabelecidas sobre ele, visto que, o estudo unicamente da porosidade total de um solo não é suficiente para a análise das suas propriedades físico-hídricas.

5.2 MORFOMETRIA DOS POROS INTRA-AGREGADOS

5.2.1 TAMANHO

Na Tabela 12 são apresentados os resultados da distribuição dos vazios intra-agregados em intervalo de tamanho para LVd, com o cultivado com cana-de-açúcar substituindo o cultivo de soja, de pastagem ou uma sucessão dessas duas (LVd_soja, LVd_pasto e LVd_suc.). Como também, a distribuição dos vazios em intervalo de tamanhos para a camada superficial de NRe.

Tabela 12: Distribuição dos vazios em intervalos de tamanhos dos solo.

Amostra	< mg Micro	mg Micro	mf Meso	f Meso	md Meso	g Meso	mg Meso	mf Macro	> mf Macro
%									
Latossolo Vermelho Distrófico –LVd									
LVd_soja	0,00	0,11	3,41	22,07	43,60	24,05	6,75	0,00	0,00
LVd_pasto	0,00	0,19	4,88	39,38	40,85	13,11	1,58	0,00	0,00
LVd_suc.	0,00	0,23	5,81	41,08	34,48	13,94	4,46	0,00	0,00
Neossolo Regolítico Eutrófico – NRe									
NRe	0,00	0,46	6,74	26,23	40,00	21,90	3,26	1,40	0,00

Fonte: O Autor (2016).

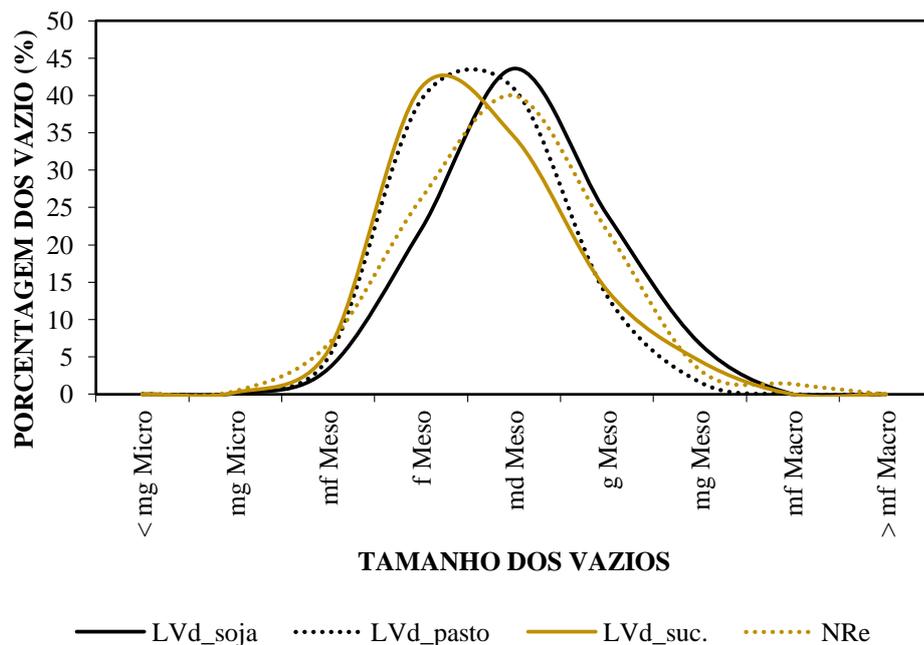
Dos vazios intra-agregados de todos os tipos de solo estudados, menos de 1% representa os microvazios. Esse baixo valor ocorre devido à limitação da resolução das imagens nas análises de porosidade por meio da μ TC raios-x (Tabela 12 e Figura 28). Os vazios “<mgMicro”, por exemplo, não foram identificados, pois possuem volume máximo de $1,598 \times 10^{-5} \text{ mm}^3$, o qual é menor que os volumes dos voxels adotados nas imagens: $4 \times 10^{-5} \text{ mm}^3$ (resolução de 40 μm) e $12,5 \times 10^{-5} \text{ mm}^3$ (resolução de 50 μm). Nas curvas de distribuição dos volumes dos vazios nos solos, Figura 29, também é possível visualizar a restrição à análise de partículas menores devido à resolução.

Um comportamento unimodal bem definido é observado na Tabela 12 e Figura 31 para todos os solos. As amostras LVd_pasto e LVd_suc apresentam uma assimetria positiva indicando uma maior frequência de poros menores e as amostras LVd_soja e NRe apresentaram curvas normais mais simétrica.

Esse comportamento dos volumes dos vazios também pode ser observado nas curvas de distribuição acumulada apresentadas na Figura 32. Os LVd_pasto e LVd_suc mostraram, além de uma maior frequência de vazios com volumes pequenos, uma grande uniformidade na distribuição desses vazios. As amostras LVd_soja e NRe apresentaram um comportamento de distribuição semelhante as outras, porem com vazios de volumes maiores.

A maior frequência de vazios pequenos e a maior diversidade dos poros podem ser justificadas pela textura dos solos analisados. O LVd é um solo de textura média, constituído predominantemente pelas frações de argila e areia e o NRe é um solo arenoso, dessa forma, as partículas no LVd tendem a se arranjar de forma mais densa que o NRe, com preenchimento dos espaços por partículas menores, fazendo com que predominem nesse solo pequenos vazios.

Figura 31: Distribuição normal unimodal dos tamanhos dos vazios.



Fonte: O Autor (2016).

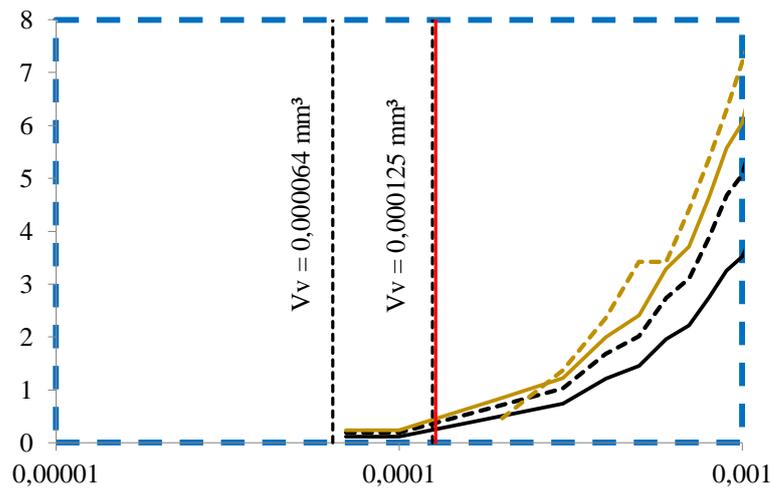
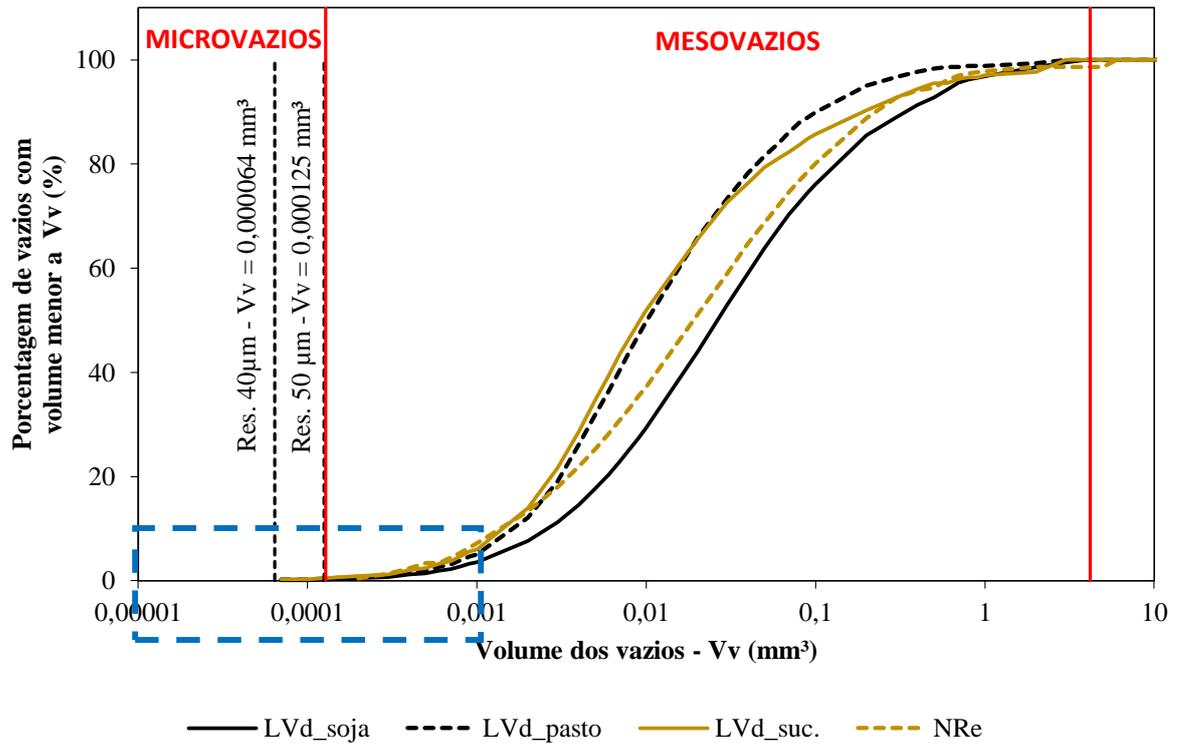
Dentre os LVd estudados, a amostra LVd_soja foi a que apresentou uma maior concentração de areia, o que justifica uma maior frequência de poros maiores e uma pior distribuição dos tamanhos. Na comparação do solo LVd_soja com o solo NRe, verificou-se que

o segundo, mesmo possuindo maior teor de areia, possui poros menores e uma melhor distribuição que o primeiro. Porém, segundo Ribeiro et al. (2007), um solo com maior concentração de areia pode apresentar maior inclinação na curva de distribuição dos tamanhos dos poros devido a uma maior quantidade de areia fina e silte, cujos grãos ocupam os espaços dos poros formados por grãos maiores. Isso pode ser uma possível justificativa para a disparidade entre o LVD_{soja} e NRe , sendo necessário realizar o fracionamento de areias para verificar a concentração de areias finas nos solos mencionados.

Além de associada à textura do solo, a distribuição acumulada do tamanho pode estar fortemente relacionada ao tipo de manejo dado ao solo e ao seu grau de compactação. Analisando as três amostras do LVD submetidas a diferentes manejos antes da expansão da cana-de-açúcar, pôde-se verificar uma distribuição de poros menores em LVD_{pasto} e LVD_{suc} e uma distribuição de poros maiores em LVD_{soja} , indicando que os solos antes submetidos a pastagem e a sucessão estão mais compactados que o solo submetido apenas a cultura anual da soja, corroborando com o estudo realizado por Silva e Castro (2014), que verificaram o mesmo comportamento em relação a compactação desses solos.

A variação espacial do tamanho dos poros é uma importante característica do meio que indica a complexidade da estrutura em mais detalhes que a porosidade total. Como está diretamente relacionado à textura, é útil para avaliar condutividade hidráulica e retenção de água, pois poros muito pequenos e poros muito grandes, responsáveis pela forte retenção de água no solo e pela drenagem de água respectivamente, estão associados à baixa disponibilidade de água no solo. Além disso, é utilizada para relacionar o transporte de solutos, uma vez que a dispersão de soluto é maior para uma distribuição de tamanhos mais ampla, como também, poros menores estão diretamente associados a tempo de residência mais longos e maior área superficial de contato (NIMMO, 2004).

Figura 32: Curva de distribuição acumulada dos vazios dos solos com limitação devidos a resolução das imagens.



Fonte: O Autor (2016).

5.2.2 FORMA

Foi feita uma análise da distribuição dos formatos dos vazios intra-agregados nas amostras de Latossolo Vermelho distrófico submetido a diferentes culturas antes do cultivo da cana-de-açúcar e na amostra de Neossolo Regolítico eutrófico (NRe) (Tabela 13 e Figura 33),

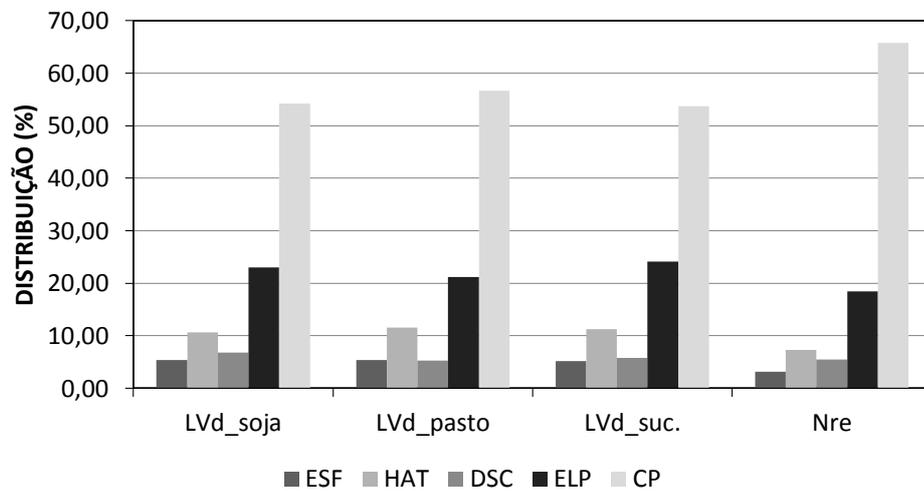
como também, uma análise da distribuição dos formatos dos vazios em relação ao seus tamanhos para os solos mencionados (Figura 34).

Tabela 13: Distribuição dos formatos dos vazios dos solos.

Amostra	ESFERA	HASTE	DISCO	ELIPSOIDE	COMPLEXO.
	ESF	HAT	DSC	ELP	CP
Latossolo Vermelho Distrófico –LVd					
LVd_soja	5,37	10,59	6,82	23,00	54,22
LVd_pasto	5,36	11,52	5,26	21,19	56,66
LVd_suc.	5,16	11,28	5,77	24,10	53,69
Neossolo Regolítico Eutrófico – Nre					
NRe	3,12	7,28	5,42	18,44	65,75

Fonte: o autor, 2016.

Figura 33: Distribuição dos formatos dos vazios dos solos.



Fonte: O Autor (2016).

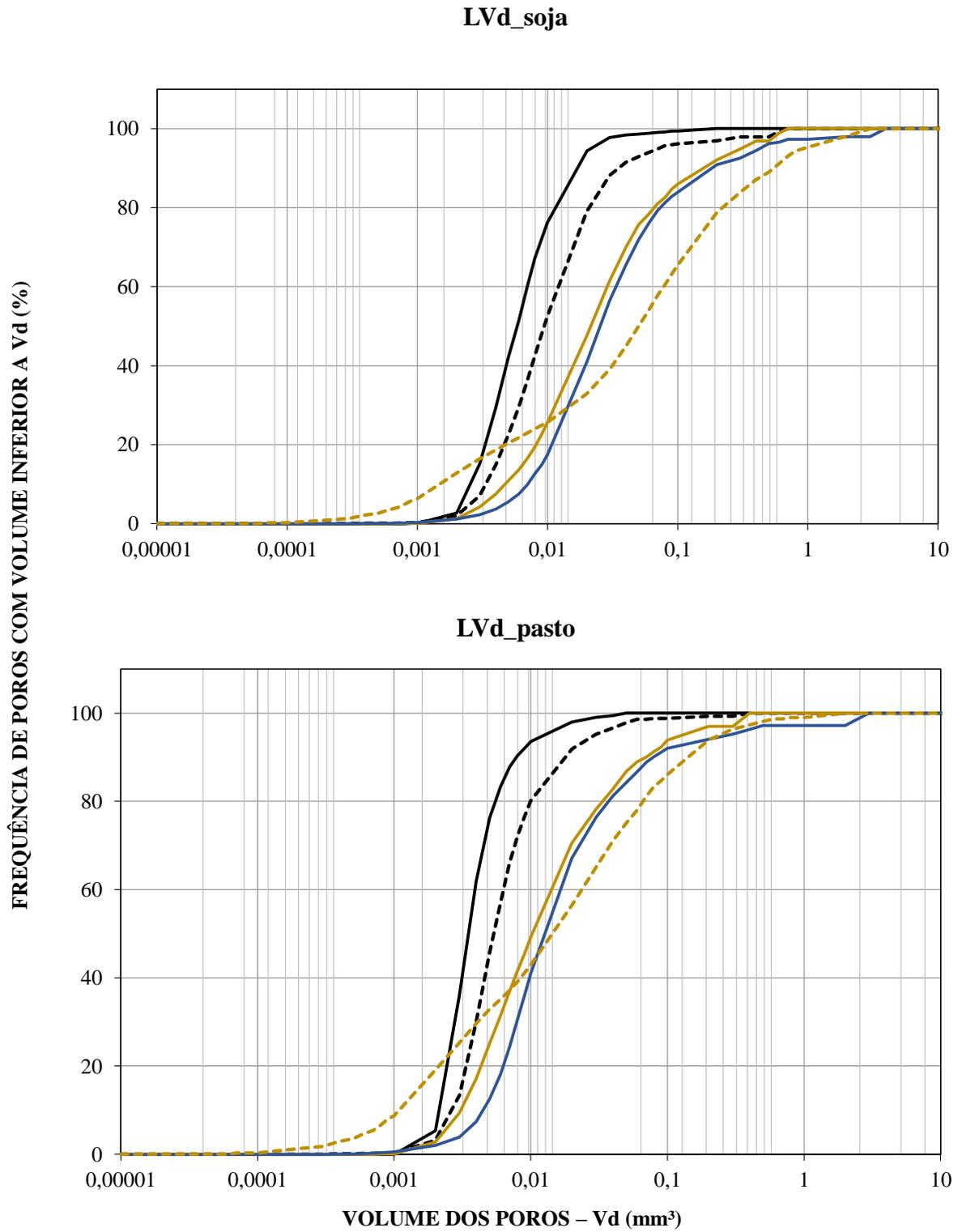
Todos os tipos de solo apresentaram um mesmo comportamento em relação à distribuição dos formatos de seus vazios, com maior presença de vazios complexos, seguido por elipsoidais, haste, disco e esférico.

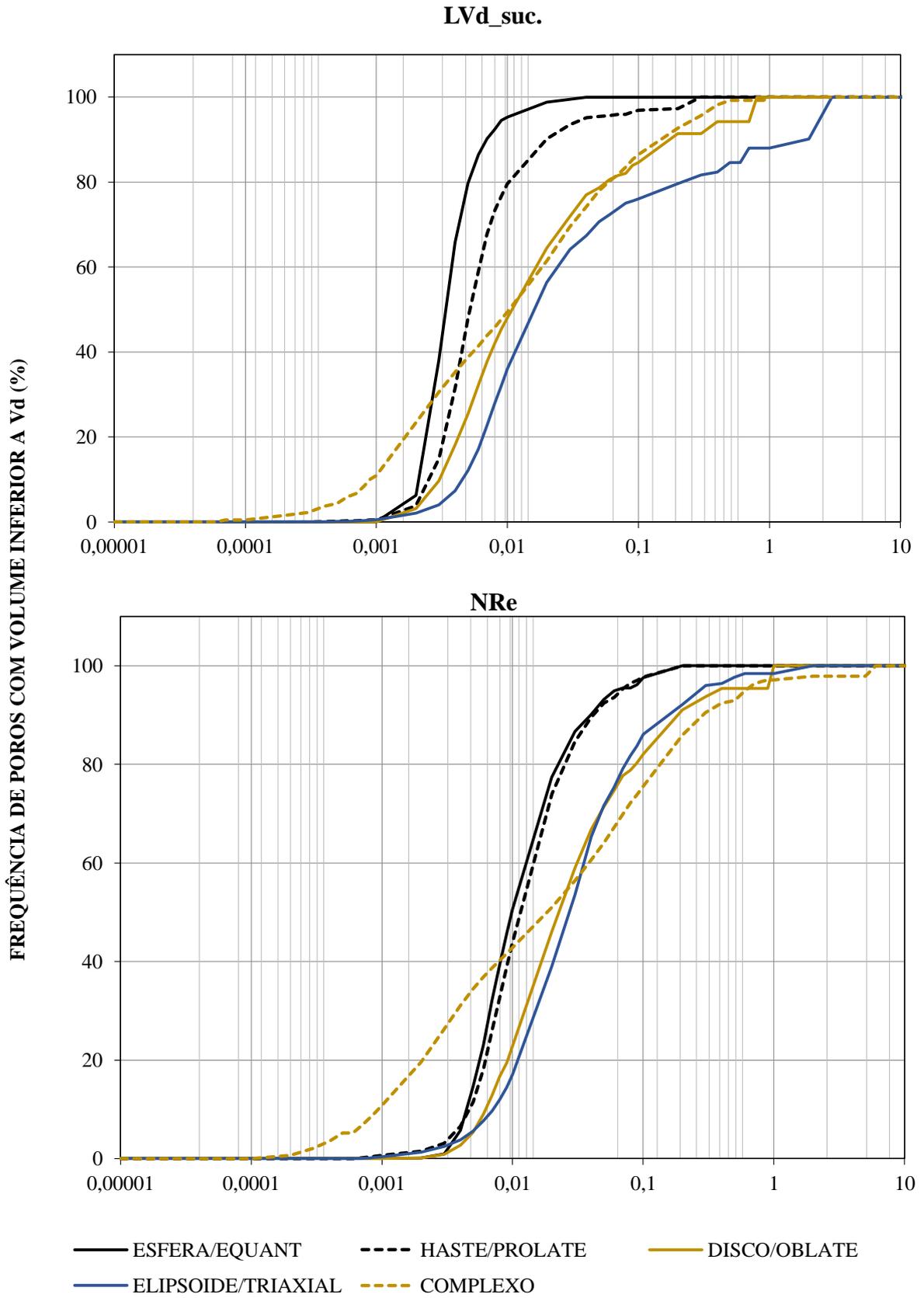
Analisando apenas as amostras de LVd, a amostra que teve sucessão de pastagem e soja (LVd_suc) apresentou uma redução na quantidade de vazios complexos e aumento de vazios elipsoidal e haste quando comparada com as outras duas amostras do mesmo tipo de solo. Segundo Arasan et al. (2011), os vazios elipsoide e em formato de haste são mais alongados

que os outros dois tipos de vazios, portanto, o comportamento apresentado pelo solo LVd_suc propõe uma diminuição na continuidade dos vazios complexos, os quais foram transformados em poros isolados e alongados, indicando forte compactação para esse tipo de solo. Analisando a curva de distribuição dos formatos dos vazios em relação aos seus tamanhos (Figura 34), pôde-se verificar que esse solo apresentou uma redução no tamanho dos vazios complexos, esféricos e em forma de haste, como também, um aumento no tamanho dos vazios elipsoidais e em forma de disco, quando comparado com as outras amostras de LVd. Arasan et al. (2011) consideraram os vazios elipsoidais e em formato de disco como sendo mais achatados que os outros dois tipos. Portanto, o comportamento observado nos solos LVd demonstra um achatamento do vazios, comportamento este também causado pela forte compactação do solo (SCHÄFFER et al., 2008). Diante disso, verificou-se que o solo da amostra LVd_suc apresentou-se mais compactado que as outras duas amostras do mesmo tipo de solo, corroborando com os dados obtidos por Silva e Castro (2014).

A amostra de LVd_pasto apresentou uma maior distribuição de vazios complexos que o solo LVd_soja, porém quando analisada a distribuição do tamanho desse formato, verificou-se que este possui tamanhos menores que o mesmo formato na amostra LVd_soja, indicando uma maior compactação desse tipo de formato no LVd_pasto. Essas duas amostras apresentaram comportamento bem semelhante em relação à distribuição dos formatos dos vazios, com apenas pequenas reduções de seus tamanhos no LVd_pasto em relação a LVd_soja. Esse comportamento também está apoiando os dados obtidos por Silva e Castro (2014), visto que, para o horizonte analisado há uma aproximação nos valores de resistência a penetração de raízes desses dois tipos de solo.

Figura 34: Distribuição dos tamanhos dos poros em relação ao seus formatos.





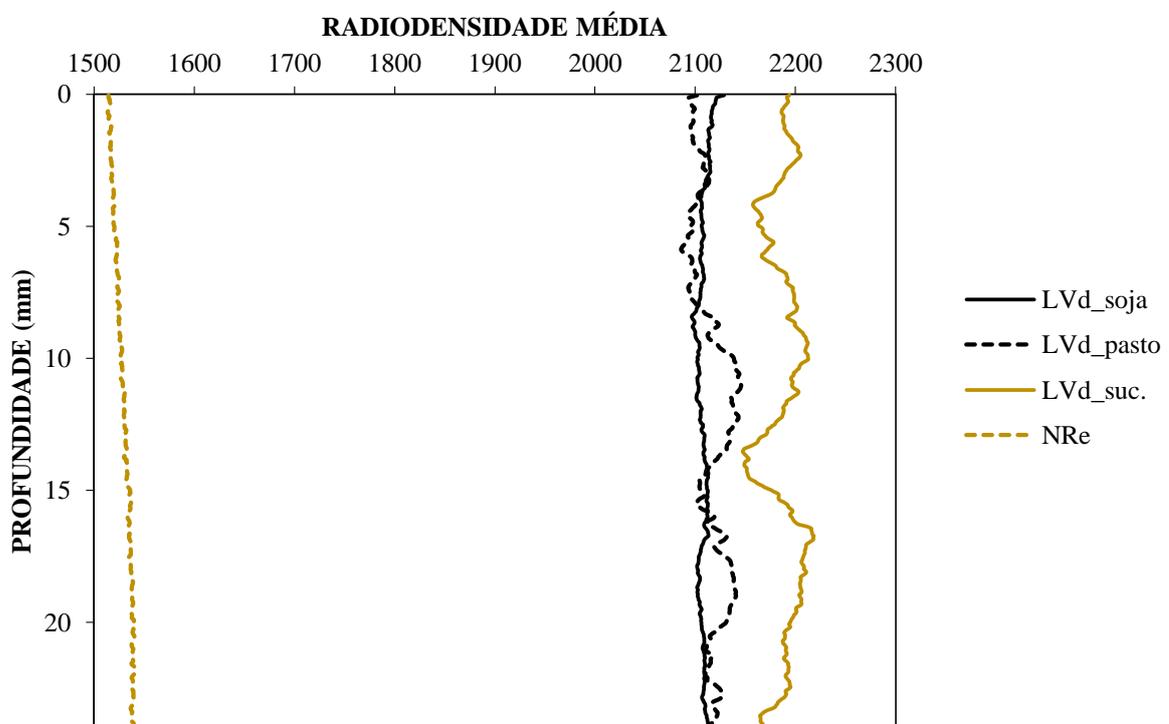
VOLUME DOS POROS – Vd (mm³)
Fonte: O Autor (2016).

5.3 VARIABILIDADE ESPACIAL DA MATRIZ DO SOLO

Os poros que não foram analisados anteriormente devido à limitação das resoluções das imagens, foram avaliados por meio da variabilidade espacial da matriz do solo. A matriz consiste da região do solo sem sólidos (partículas mais densas) e sem poros de volumes maiores que o volume do voxel da imagem, ou seja, é a região do solo onde estão apresentados os microporos e agregados.

A atenuação média da matriz é influenciada pela composição química do solo. Materiais mais densos apresentam maiores valores de atenuação. O LVd é um solo com alto teor de óxido de ferro, sendo este material bem mais denso que o quartzo. Isso justifica os valores maiores de radiodensidade média para os LVd analisados quando comparado com o solo NRe (Figura 35).

Figura 35: Perfil da radiodensidade média dos subvolumes de amostras de Latossolo Vermelho distrófico (LVd) submetidos a diferentes culturas antes do cultivo da cana-se-açúcare de amostra de Neossolo Regolítico eutrófico (NRe).



Fonte: O Autor (2016).

Analisando as amostras do mesmo tipo de solo, a atenuação média sofre maior influência da quantidade e o tamanho dos poros do que da presença de grãos de alta atenuação, pois estes últimos se encontram isolados e em menores tamanhos ao longo da matriz do solo (TAINA et al., 2013). Diante disto, o solo que apresentou um menor índice de vazios, ou seja, uma maior

compactação, foi aquele submetido anteriormente a sucessão de pasto/soja, seguido do LVd_pasto e LVd_soja. Essas duas últimas amostras apresentaram radiodensidade média semelhantes. Esse comportamento das amostras de LVd corroborando o estudo realizado por Silva e Castro (2014), que verificaram uma maior resistência a penetração de raízes para o solo submetido a sucessão e uma aproximação da resistência para LVd_pasto e LVd_soja no horizonte analisado.

6 CONCLUSÃO

- A técnica se mostrou eficaz na determinação da porosidade inter e intra-agregados, visto que, o NRe apresentou uma maior porosidade inter-agregados e uma menor intra-agregados em relação ao LVd, comportamento comum quando comparado solos arenosos e solos com maior teor de argila
- Com a técnica foi possível caracterizar morfometricamente a porosidade intra-agregados do solo. Os solos com maior teor de areia apresentaram vazios maiores que os solos com maior teor de argila, comportamento esperado para esses diferentes tipos de textura de solo. Em relação à forma, houve uma maior predominância de vazios complexos e uma menor frequência de vazios esféricos para todos os tipos de solo. O Latossolo Vermelho distrófico submetido à sucessão de pasto e soja antes da expansão da cana-de-açúcar foi o que apresentou menores tamanhos de poros intra-agregados, com poros de formato complexo menores e poros achatados de tamanho maiores que nas outras amostras do mesmo tipo de solo, indicando uma maior compactação.
- O uso da técnica possibilitou a visualização da diferença de radiodensidade dos materiais constituintes dos solos, mostrando que elementos mais densos como o óxido de ferro apresentaram uma radiodensidade maior que minerais menos densos, como o quartzo. Para um mesmo solo, foi possível verificar um menor grau de microvazios no Latossolo Vermelho distrófico submetido a sucessão de pasto e soja antes da expansão da cana-de-açúcar, demonstrando que a radiodensidade média da matriz do solo pode ser usada na análise dos microvazios antes não analisados devido a limitação da resolução.

REFERÊNCIAS

- ARASAN, S., AKBULUT, S., & HASILOGLU, A. S. **Effect of particle size and shape on the grain-size distribution using Image analysis.** International Journal of Civil & Structural Engineering, v. 1, n. 4, p. 968-985, 2011.
- BALAGUER, A., RUIZ, L. A., HERMOSILLA, T., & RECIO, J. A. **Definition of a comprehensive set of texture semivariogram features and their evaluation for object-oriented image classification.** Computers & Geosciences, v. 36, n. 2, p. 231-240, 2010.
- BECKERS, E., PLOUGONVEN, E., ROISIN, C., HAPCA, S., LÉONARD, A., & DEGRÉ, A. **X-ray microtomography: A porosity-based thresholding method to improve soil pore network characterization?** Geoderma, v. 219, p. 145-154, 2014.
- BERALDO, JOSÉ MG; SCANNAVINO JUNIOR, FRANCISCO DE A.; CRUVINEL, PAULO E. **Application of x-ray computed tomography in the evaluation of soil porosity in soil management systems.** Engenharia Agrícola, v. 34, n. 6, p. 1162-1174, 2014.
- BOUCKAERT, L., VAN LOO, D., AMELOOT, N., BUCHAN, D., VAN HOOREBEKE, L., & SLEUTEL, S. **Compatibility of X-ray micro-Computed Tomography with soil biological experiments.** Soil Biology and Biochemistry, v. 56, p. 10-12, 2013.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. **Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado de Pernambuco.** V. 1. Recife: Sudene, 1973, 359p. (Boletim Técnico, 26).
- BREWER, R. **Fabric and Mineral Analysis of Soils.** Wiley, New York (1964)
- BRONICK, C. J., & LAL, R. **Soil structure and management: a review.** Geoderma, 124 (1), 3-22, 2005.
- BULLOCK, P., FEDOROFF, N., JONGERIUS, A., STOOPS, G., & TURSINA, T. **Handbook for soil thin section description.** Waine Research, 1985.
- CAMARGO, L. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; HORVAT, R. A. **Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um Latossolo sob diferentes**

- formas do relevo. II- correlação espacial entre mineralogia e agregados.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 32, n. 6, p. 2279-2288, 2008.
- CARDUCCI, C. E., OLIVEIRA, G. C., LIMA, J. M., ROSSONI, D. F., COSTA, A. L., & OLIVEIRA, L. M. **Distribuição espacial das raízes de cafeeiro e dos poros de dois Latossolos sob manejo conservacionista.** R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental, v. 18, n. 3, p. 270-278, 2014.
- CNUDDÉ, V., & BOONE, M. N. **High-resolution X-ray computed tomography in geosciences: A review of the current technology and applications.** Earth-Science Reviews, v. 123, p. 1-17, 2013.
- CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S.; POZZI-MUCELLI, R.S. **Static and dynamic three-dimensional studies of water in soil using computed tomographic scanning.** Soil Science, v.140, p.326-332, 1985.
- DA SILVA, R. A. B., DE SOUSA LIMA, J. R., ANTONINO, A. C. D., DE SALES GONDIM, P. S., DE SOUZA, E. S., & JÚNIOR, G. B. **Balanço hídrico em Neossolo Regolítico cultivado com braquiária (Brachiaria decumbens Stapf).** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 38, n. 1, p. 147-157, 2014.
- DAS NEVES¹, C. M. N., SILVA, M. L. N., CURI, N., CARDOSO, E. L., MACEDO, R. L. G., FERREIRA, M. M., & DE SOUZA, F. S. **Atributos indicadores da qualidade do solo em sistema agrossilvopastoril no noroeste do estado de Minas Gerais.** Brazil, 2002.
- DE ALMEIDA, A. V. D. L., CORRÊA, M. M., DE SOUSA LIMA, J. R., DE SOUZA, E. S., SANTORO, K. R., & ANTONINO, A. C. D. **Atributos Físicos, Macro e Micromorfológicos de Neossolos Regolíticos no Agreste Meridional de Pernambuco.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 39, n. 5, p. 1235-1246, 2015.
- DOHNAL, M., JELINKOVA, V., SNEHOTA, M., DUSEK, J., & BREZINA, J. **Tree-Dimensional Numerical Analysis of Water Flow Affected by Entrapped Air: Application of Noninvasive Imaging Techniques.** Vadose Zone Journal, v. 12, n. 1, 2013.
- ELLIOT, T. R., REYNOLDS, W. D., & HECK, R. J. **Use of existing pore models and X-ray computed tomography to predict saturated soil hydraulic conductivity.** Geoderma, v. 156, n. 3, p. 133-142, 2010.

- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.
- FLAVEL, R. J., GUPPY, C. N., TIGHE, M., WATT, M., MCNEILL, A., & YOUNG, I. M. **Non-destructive quantification of cereal roots in soil using high-resolution X-ray tomography**. *Journal of Experimental Botany*, p. err421, 2012.
- GARBOUT, A., MUNKHOLM, L. J., & HANSEN, S. B. **Tillage effects on topsoil structural quality assessed using X-ray CT, soil cores and visual soil evaluation**. *Soil and Tillage Research*, v. 128, p. 104-109, 2013.
- HAINSWORTH, J.M.; AYLMORE, L.A.G. **The use of computerassisted tomography to determine spatial distribution of soil water content**. *Australian Journal of Soil Research*, v.21, p.435-443, 1983.
- HASHEMI, M. A., KHADDOUR, G., FRANÇOIS, B., MASSART, T. J., & SALAGER, S. **A tomographic imagery segmentation methodology for three-phase geomaterials based on simultaneous region growing**. *Acta Geotechnica*, v. 9, n. 5, p. 831-846, 2014.
- HECK, R. J. **X-ray Computed Tomography of Soil**. *Tópicos Ciências do Solo*, University of Guelph, Canadian, v.5, p.1-30, 2009.
- HELLIWELL, J. R., STURROCK, C. J., GRAYLING, K. M., TRACY, S. R., FLAVEL, R. J., YOUNG, I. M., ... & MOONEY, S. J. **Applications of X-ray computed tomography for examining biophysical interactions and structural development in soil systems: a review**. *European Journal of Soil Science*, v. 64, n. 3, p. 279-297, 2013.
- HILLEL, Daniel. **Environmental soil physics: Fundamentals, applications, and environmental considerations**. Academic press, 1998.
- JACOMINE, P.K.T. Solos sob caatinga: Características e uso agrícola. In: ALVAREZ V., V.H.; FONTES, L.E.F. & FONTES, M.P.F., eds. *O solo nos grandes domínios morfoclimáticos do Brasil e o desenvolvimento sustentado*. Viçosa, MG, SBCS/UFV/DPS, 1996. p.95-111
- JEFFERIES, D. A. **X-ray Computed Micro-Tomography Indices of Soil Microstructure within a Tree-Based Intercropping System**. Thesis of Master of Science in Environmental Sciences – University of Guelph, Canada, 2014.

- JOHNSON, W. M., MCCLELLAND, J. E., MCCALED, S. B., ULRICH, R., HARPER, W. G., & HUTCHINGS, T. B. **Classification and description of soil pores.** Soil Science, v. 89, n. 6, p. 319-321, 1960.
- JONGERIUS, A. **Morphologic investigations of soil structure.** Meded. Sticht. Bodemkartering, Bodem Stud, Wageningen, The Netherlands, p. 2, 1957.
- KELLER, T., LAMANDÉ, M., PETH, S., BERLI, M., DELENNE, J. Y., BAUMGARTEN, W., ... & OR, D. **An interdisciplinary approach towards improved understanding of soil deformation during compaction.** Soil and Tillage Research, v. 128, p. 61-80, 2013.
- KLEIN, V. A., & LIBARDI, P. L. **Condutividade hidráulica de um Latossolo Roxo, não saturado, sob diferentes sistemas de uso e manejo.** Ciência Rural, 32(6), 945-953, 2002.
- KOOREVAAR, P.; MENELIK, G.; DIRKSEN, Christiaan. **Elements of soil physics.** Elsevier, 1983.
- LUXMOORE, R. J., JARDINE, P. M., WILSON, G. V., JONES, J. R., & ZELAZNY, L. W. **Physical and chemical controls of preferred path flow through a forested hillslope.** Geoderma, v. 46, n. 1, p. 139-154, 1990.
- MACEDO, A.; CRESTANA, S. **Avaliação da macroporosidade e da densidade de partículas do solo através da microtomografia de raios-X.** Revista brasileira de ciência do solo, v. 23, n. 4, p. 763-771, 1999.
- MARCHINI, D. C., LING, T. C., ALVES, M. C., CRESTANA, S., FILHO, S. N. S., & DE ARRUDA, O.G. **Matéria orgânica, infiltração e imagens tomográficas de Latossolo em recuperação sob diferentes tipos de manejo.** R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental, v. 19, n. 6, p. 574-580, 2015.
- MARR, D., & HILDRETH, E. **Theory of edge detection.** Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences, v. 207, n. 1167, p. 187-217, 1980.
- MARSILI, A., SERVADIO, P., PAGLIAI, M., & VIGNOZZI, N. **Changes of some physical properties of a clay soil following passage of rubber-and metal-tracked tractors.** Soil and Tillage Research, v. 49, n. 3, p. 185-199, 1998.

- MEES, F., SWENNEN, R., VAN GEET, M., & JACOBS, P. **Applications of X-ray computed tomography in the geosciences.** Geological Society, London, Special Publications, v. 215, n. 1, p. 1-6, 2003.
- MELO, R. O., PACHECO, E. P., DE CASTRO MENEZES, J., & CANTALICE, J. R. **B. Susceptibilidade à compactação e correlação entre as propriedades físicas de um Neossolo sob vegetação de caatinga.** Revista Caatinga, v. 21, n. 5, 2008.
- MOONEY, S. J., PRIDMORE, T. P., HELLIWELL, J., & BENNETT, M. J. **Developing X-ray computed tomography to non-invasively image 3-D root systems architecture in soil.** Plant and soil, v. 352, n. 1-2, p. 1-22, 2012.
- MÜNCH, B., TRTIK, P., MARONE, F., & STAMPANONI, M. **Stripe and ring artifact removal with combined wavelet—Fourier filtering.** Optics express, v. 17, n. 10, p. 8567-8591, 2009.
- NIMMO, J. **Porosity and pore size distribution.** Encyclopedia of Soils in the Environment, v. 3, p. 295-303, 2004.
- NÓBREGA, J. C. A., LIMA, J. M., CURI, N., SIQUEIRA, J. O., & MOTTA, P. E. F. **Fosfato e micorriza na estabilidade de agregados em amostras de latossolos cultivados e não-cultivados.** Pesq. Agropec. Bras, v. 36, p. 1425-1435, 2001.
- OLIVEIRA, G. C., DIAS JUNIOR, M. S., RESCK, D. V. S., & CURI, N. **Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 28, n. 2, p. 327-336, 2004.
- OTHMER, HEINRICH; DIEKKRÜGER, BERND; KUTILEK, MIROSLAV. **Bimodal Porosity and Unsaturated Hydraulic Conductivity.** Soil Science, v. 152, n. 3, p. 139-150, 1991.
- PAGLIAI, M., MARSILI, A., SERVADIO, P., VIGNOZZI, N., & PELLEGRINI, S. **Changes in some physical properties of a clay soil in Central Italy following the passage of rubber tracked and wheeled tractors of medium power.** Soil and Tillage Research, v. 73, n. 1, p. 119-129, 2003.
- PAGLIAI, M., PELLEGRINI, S., VIGNOZZI, N., ROUSSEVA, S., & GRASSELLI, O. **The quantification of the effect of subsoil compaction on soil porosity and related**

physical properties under conventional to reduced management practices. *Advances in GeoEcology*, n. 32, p. 305-313, 2000.

PAGLIAI, M.; LAMARCA, M.; LUCAMANTE, G. **Micromorphometric and micromorphological investigations of a clay loam soil in viticulture under zero and conventional tillage.** *Journal of Soil Science*, v. 34, n. 2, p. 391-403, 1983.

PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S. **Soil structure and the effect of management practices.** *Soil and Tillage Research*, v. 79, n. 2, p. 131-143, 2004.

PASSONI, S.; PIRES, L. F.; HECK, R.; ROSA, J. A. 2015. **Three Dimensional Characterization of Soil Macroporosity by X-ray Microtomography.** *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.39, n.2, p.448-457, 2015.

PEDROTTI, A., PAULETTO, E. A., CRESTANA, S., CRUVINEL, P. E., VAZ, C. M. P., DE MENDONÇA NAIME, J., & DA SILVA, A. M. **Tomografia computadorizada aplicada a estudos de um Planossolo.** *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 38, n. 7, p. 819-826, 2003.

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

PIRES, L. F., BORGES, J. A., BACCHI, O. O., & REICHARDT, K. **Twenty-five years of computed tomography in soil physics: A literature review of the Brazilian contribution.** *Soil and Tillage Research*, v. 110, n. 2, p. 197-210, 2010.

RAB, M. A., HALING, R. E., AARONS, S. R., HANNAH, M., YOUNG, I. M., & GIBSON, D. **Evaluation of X-ray computed tomography for quantifying macroporosity of loamy pasture soils.** *Geoderma*, v. 213, p. 460-470, 2014.

REICHARDT, K. **Processos de transferência no sistema solo-planta-atmosfera**, 1976.

REZANEZHAD, F., QUINTON, W. L., PRICE, J. S., ELRICK, D., ELLIOT, T. R., & HECK, R. J. **Examining the effect of pore size distribution and shape on flow through unsaturated peat using 3-D computed tomography.** *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*, v. 6, n. 3, 2009.

- RIBEIRO, K. D., MENEZES, S. M., MESQUITA, M. D. G. B. D., & SAMPAIO, F. D. M. T. **Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras-MG.** Ciênc. agrotec.,(Impr.), v. 31, n. 4, p. 1167-1175, 2007.
- SANTOS, J. C. B. D., SOUZA JÚNIOR, V. S. D., CORRÊA, M. M., RIBEIRO, M. R., ALMEIDA, M. D. C. D., & BORGES, L. E. P. **Caracterização de Neossolos Regolíticos da região semiárida do Estado de Pernambuco.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 36, n. 3, p. 683-696, 2012.
- SANTOS, J. C. B. D., SOUZA JÚNIOR, V. S. D., CORRÊA, M. M., RIBEIRO, M. R., ALMEIDA, M. D. C. D., & BORGES, L. E. P. **Caracterização de Neossolos Regolíticos da região semiárida do Estado de Pernambuco.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, 36(3), 683-696, 2012.
- SCHÄFFER, B., MUELLER, T. L., STAUBER, M., MÜLLER, R., KELLER, M., & SCHULIN, R. **Soil and macro-pores under uniaxial compression. II. Morphometric analysis of macro-pore stability in undisturbed and repacked soil.** Geoderma, v. 146, n. 1, p. 175-182, 2008.
- SCHÄFFER, B., STAUBER, M., MUELLER, T. L., MÜLLER, R., & SCHULIN, R. **Soil and macro-pores under uniaxial compression. I. Mechanical stability of repacked soil and deformation of different types of macro-pores.** Geoderma, v. 146, n. 1, p. 183-191, 2008.
- SILVA, A. A. **Transformações no uso da terra e na estrutura de solos no cerrado em áreas de expansão da cana-de-açúcar—o caso da microrregião de Quirinópolis, Goiás.** Tese de Doutorado em Geografia - Universidade Federal de Goiás, Instituto de Estudos Sócio-Ambientais, 134f, 2012.
- SILVA, A. A., & DE CASTRO, S. S. **Indicadores macro e micromorfológicos da qualidade física de um latossolo vermelho textura média cultivado com cana-de-açúcar na microrregião de Quirinópolis, Goiás.** Boletim Goiano de Geografia, v. 34, n. 2, p. 233-251, 2014.
- SILVA, S. M. S.; SOUSA, A. R.; ALBUQUERQUE, S. F. ; NUNES FILHO, J. ; SILVA, A. B. ; LOPES, G. M. B. . **Características Físicas e Químicas de um Neossolo Regolítico**

Eutrófico do Agreste Pernambucano. In: XXXIV Congresso Brasileiro de Ciências do Solo, 2013, Florianópolis. XXXIV Congresso Brasileiro de Ciências do Solo - Para quem e para quem?, 2013.

SOLIMAN, AIMAN S.; RAHMAN, MOHAMED E. ABDEL; HECK, RICHARD J. **Comparing time-resolved infrared thermography and X-ray computed tomography in distinguishing soil surface crusts.** Geoderma, v. 158, n. 3, p. 101-109, 2010.

TAINA, I. A., HECK, R. J., DEEN, W., & MA, E. Y. **Quantification of freeze-thaw related structure in cultivated topsoils using X-ray computer tomography.** Canadian Journal of Soil Science, v. 93, n. 4, p. 533-553, 2013.

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

U.S. SOIL SURVEY STAFF. **U.S. Soil Survey Manual**, Soil Conservation Service, U.S. Dep. Agric, Washington, D.C (1989) Draft.

WEI, Z., WIEBE, S., & CHAPMAN, D. **Ring artifacts removal from synchrotron CT image slices.** Journal of Instrumentation, v. 8, n. 06, p. C06006, 2013.

Wendling, B., Jucksch, I., Mendonça, E. D. S., Neves, J. C. L. **Carbono orgânico e estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho sob diferentes manejos.** Pesquisa Agropecuária Brasileira 40, 487-494, 2005.

ZHOU, L., XIE, J., SHEN, W., ZHENG, Y., YANG, Y., SHI, H., & RITZWOLLER, M. H. **The structure of the crust and uppermost mantle beneath South China from ambient noise and earthquake tomography.** Geophysical Journal International, v. 189, n. 3, p. 1565-1583, 2012.

ZINGG, THEODOR. **Beitrag zur schotteranalyse.** Diss. Diss. Naturwiss. ETH Zürich, Nr. 849, 1935 Ref.: Niggli, P.; Korref.: Burri, C., 1935.

GONÇALVES, A.C.A.; FOLEGATTI, M.V. & MATA, J.D.V. **Análise exploratória e geoestatística da variabilidade de propriedades físicas de um Argissolo Vermelho.** Acta Sci., 23:1149-1157, 2001.