



ISSN: 2525-815X

# Journal of Environmental Analysis and Progress

Journal homepage: [www.ufrpe.br/jeap](http://www.ufrpe.br/jeap)  
<http://dx.doi.org/10.24221/jeap.1.1.2016.983.24-33>



## Microtomografia computadorizada de raios-X na caracterização morfométrica dos poros de Neossolo Regolítico Eutrófico

### X-ray computed microtomography in morphometric characterization of pore of Regolitic Eutrophic Neosol

Larissa Fernandes Costa<sup>a</sup>, Antonio Celso Dantas Antonino<sup>b</sup>, Richard John Heck<sup>c</sup>, Artur Paiva Coutinho<sup>d</sup>, Rejane Magalhães de Mendonça Pimentel<sup>e</sup>, Fernando José Ribeiro Sales<sup>f</sup>, Cássia Bezerra Machado<sup>g</sup>, Thiago Campos Vasconcelos<sup>h</sup>, Daniel Amancio Duarte<sup>i</sup>

<sup>a</sup>Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares, da Universidade Federal de Pernambuco-UFPE. Av. Luiz Freire, 1000. Cidade Universitária, Recife-PE, Brasil. CEP: 50740-545. E-mail: [larissafcosta@hotmail.com](mailto:larissafcosta@hotmail.com).

<sup>b</sup>Prof. do Departamento de Energia Nuclear-DEN da UFPE. E-mail: [acdantonino@gmail.com](mailto:acdantonino@gmail.com).

<sup>c</sup>Prof. da University of Guelph, Ontario, Canadá. E-mail: [rheck@uoguelph.ca](mailto:rheck@uoguelph.ca).

<sup>d</sup>Prof. da UFPE, Centro Acadêmico do Agreste. E-mail: [arthur.coutinho@yahoo.com.br](mailto:arthur.coutinho@yahoo.com.br).

<sup>e</sup>Profa. da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife-PE. Brasil. CEP: 52171-900. E-mail: [rmmpimentel@hotmail.com](mailto:rmmpimentel@hotmail.com).

<sup>f</sup>Prof. do Departamento de Engenharia Biomédica da UFPE. E-mail: [fernando.sales.ufpe@gmail.com](mailto:fernando.sales.ufpe@gmail.com).

<sup>g</sup>Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFPE. E-mail: [cassiabmachado@gmail.com](mailto:cassiabmachado@gmail.com).

<sup>h</sup>Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFPE. E-mail: [tcampos@gmail.com](mailto:tcampos@gmail.com).

<sup>i</sup>Físico do DEN-UFPE. E-mail: [daniel.aduarte@ufpe.br](mailto:daniel.aduarte@ufpe.br).

#### ARTICLE INFO

Received 28 Sep 2016

Accepted 01 Oct 2016

Published 13 Oct 2016

#### ABSTRACT

Soil particles arrangement, orientation and organization determine soil structure and soil porosity. The porosity has a strong influence on aeration, flux of water/solute/gas/heat, roots resistance to penetration, microorganism development and is important to determining the soil quality. The morphometric analysis of the pore space of a Regossols using the X-rays computed microtomography is the objective of this study, where the soil physical attributes and the sizes, shapes and slopes of the intra-aggregate voids were analyze. The Regossol had a porosity of 28% (27% inter-aggregate void and 1% intra-aggregate void) and 73% of aggregates. About 73% of intra-aggregate voids have volumes of  $1,278 \times 6,545 \times 10^{-4}$  to  $10^{-2}$  mm<sup>3</sup>. There is a greater volume of complex and elongated voids, which favor the driving water through the soil. In addition, a larger volume of flattened pores that may indicate a certain compression that medium. Intra-aggregate voids showed mostly as nearly horizontal or inclined, as a result of resistance to root penetration due to presence of clay bridges ('lamellic') in the soil. The application of X-rays computed microtomography is efficient for micromorphometric characterization of soil porosity.

**Keywords:**  $\mu$ CT, porosity, pore size distribution, sandy soils.

#### RESUMO

O arranjo, orientação e organização dos grãos do solo de diferentes características são fatores determinísticos da estrutura do solo, como também, da porosidade desse meio. A porosidade possui forte influência na aeração, na transferência de água/solutos/gases/calor, na resistência à penetração e ramificação de raízes e no desenvolvimento de microorganismos, podendo ser um elemento importante na

determinação da qualidade de um solo. A avaliação morfométrica do espaço poroso de um Neossolo Regolítico Eutrófico (NRe) utilizando a Microtomografia Computadorizada de Raios-X é objetivo deste estudo, onde foram analisados os atributos físicos do solo e os tamanhos, as formas e as inclinações dos vazios intra-agregados. O NRe apresentou uma porosidade de 28% (27% de vazios inter-agregados e 1% de vazios intra-agregados) e 73% de agregados. Cerca de 73% dos vazios intra-agregados possuem volumes entre  $1,278 \times 10^{-4}$  a  $6,545 \times 10^{-2}$  mm<sup>3</sup>. Há um maior volume de vazios complexos e alongados, os quais favorecem a condução de água pelo solo, e um maior volume de poros achatados, podendo indicar um certa compactação desse meio. Os vazios apresentaram-se em sua maioria como quase horizontais e inclinado, resultado da resistência a penetração de raízes devido a presença de lamelas argilosas nesse solo. A aplicação de Microtomografia Computadorizada de Raios-X se mostrou eficiente na caracterização micromorfométrica da porosidade do solo.

**Palavras-Chave:**  $\mu$ TC, porosidade, distribuição dos tamanhos dos poros, solos arenosos.

## Introdução

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, esta podendo variar em uma escala de nanômetro a centímetros (Hillel, 2013; Regelink et al., 2015).

A porosidade do solo é uma propriedade física tradicionalmente determinada pela relação entre volumes ou densidades (Hillel, 2013). Os poros são espaços vazios responsáveis pelos processos de aeração, condução e retenção de água e nutrientes fundamentais para o desenvolvimento e crescimento de plantas e microorganismos. Esta característica está fortemente relacionada à fertilidade, estabilidade estrutural e à qualidade física do solo (Tormena et al., 1998; De Freitas et al., 2012; Stefanoski et al., 2013; Pires et al., 2014; Ouoba et al., 2014). Portanto, estudos do espaço poral de um solo vêm sendo importantes tanto para caracterização do solo, como para avaliação estrutural e da qualidade física (Lu et al., 2014).

Os poros podem ser classificados em inter e intra-agregados, segundo à distribuição destes no meio. Adicionalmente, podemos classificá-los de acordo com o diâmetro do capilar como micro, meso e macroporos. Não existe ainda um padrão dos limites de diâmetros para essas classes e nem uma terminologia única.

Por exemplo, Lu et al. (2014) consideram os poros intra-agregados com tamanhos de 0,4-70  $\mu$ m e os inter-agregados com 0,01-0,3  $\mu$ m. Richards (1965) utiliza como limite de separação entre macro e microporos um diâmetro de 0,05 mm; enquanto Kiehl (1979) considera os macro e microporos são aqueles com diâmetro maior e menor que 0,06 mm, respectivamente

Para Luxmoore (1981), a classificação dos poros com diâmetro menor que 0,01 como microporos; como mesoporos aqueles que

apresentam diâmetro entre 0,01 e 1,0 mm; e como macroporos, os poros com diâmetro maior que 1,0 mm. Klein & Libardi (2002), consideraram como criptoporos, os poros com diâmetro menor que 0,0002 mm, microporos, aqueles com diâmetro entre 0,05 e 0,0002 mm, e macroporos, poros com diâmetro maior que 0,05 mm.

Os poros inter-agregados são responsáveis pela aeração e drenagem da água, soluto e calor no solo, caracterizando-se pelo esvaziamento e fluxo rápido de água. Os intra-agregados são responsáveis pela retenção e disponibilidade de água para as plantas, caracterizando-se por uma condução mais lenta da água no solo (Othmer et al., 1991; Ribeiro et al., 2006).

As características dos poros são influenciadas pelas propriedades do solo e fatores externos (Luo et al., 2010; Lamandé et al., 2011; Hu et al., 2016). A porosidade pode ser reduzida pelo entupimento dos poros com partículas que se soltaram de agregados sob o impacto das chuvas ou por deposição das partículas que se soltaram da superfície, formando crostas. Por outro lado, ela pode sofrer modificações morfológicas devido à reorientação das partículas, de acordo com o manejo do solo (Gonçalves & Moraes, 2012; Jorge et al., 2012; Shaxson & Kassam, 2015; Shaxson & Barber, 2016).

Problemas de gestão agrícola acarretam na compactação do solo, principalmente pelo uso de maquinários pesados, sendo esta, uma das causas mais importantes de perda de qualidade estrutural do meio (Marsili et al., 1998; Pagliai et al., 2003).

Tradicionalmente, o estudo das estruturas do solo é feito, em diferentes escalas, por meio de amostragem e análise laboratorial. A partir da década de 1980, a Tomografia Computadorizada por Raios-X tem sido cada vez mais utilizada (Petrovic et al., 1982; Hainsworth & Aylmore, 1983; Crestana et al., 1985), com o avanço nos sistemas computacionais. Esta técnica é

interessante por possibilitar a caracterização quantitativa e qualitativa do espaço poroso, tridimensionalmente, de modo não destrutivo e em alta resolução (Wang et al., 2016).

O Neossolo Regolítico Eutrófico (NRe) é um tipo de solo encontrado no agreste pernambucano, predominante em regiões onde a agricultura familiar desempenha um papel importante na economia local.

Diante disso, o objetivo deste estudo é caracterizar morfometricamente o espaço poroso de um Neossolo Regolítico Eutrófico utilizando a Microtomografia Computadorizada de Raios-X. Para tal, foram analisados os atributos físicos do solo e os tamanhos, as formas e as inclinações dos vazios intra-agregados.

## Material e Métodos

### Descrição da amostra

A amostra utilizada foi extraída no município de São João (PE) onde foram abertas trincheiras com dimensões de, aproximadamente, 2,0 x 1,5 x 2,5 m para a coleta da amostra indeformada da camada superficial de 0 – 20 cm. Esta amostra foi coletada em cilindro de PVC com 7,5 cm de diâmetro e 7,5 cm de altura, seca em estufa a 40°C e periodicamente pesada até a estabilização da medida da massa, indicando a perda total de umidade.

O solo foi classificado como Neossolo Regolítico Eutrófico, cuja composição é predominantemente de areia, baixo teor de argila e matéria orgânica (Tabela 1). Devido ao seu caráter arenoso, ele apresenta elevada permeabilidade e baixa capacidade de retenção de umidade. Por essas características, este solo é considerado pouco desenvolvido.

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 pelo seguinte processo: uma primeira gradagem, adubação orgânica, segunda gradagem e plantio da cultura, sem uso de maquinários pesados nos processos de cultivo e com uma colheita manual.

### Aquisição de imagens

As imagens tomográficas da amostra do Neossolo Regolítico foram obtidas com o microtomógrafo de raios-X de terceira geração modelo NIKON XT H 225 ST, pertencente ao grupo de pesquisa do Laboratório de Tomografia Computadorizada de Raios-X (LTC-RX) do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (DEN-UFPE), Brasil. Foram utilizados os seguintes parâmetros no processo de aquisição da amostra: tensão 150 kV, corrente 226  $\mu$ A e tempo de exposição 3500 ms, totalizando uma aquisição de 3017 imagens.

A resolução espacial utilizada foi de 50  $\mu$ m nas três dimensões (50 x 50 x 50  $\mu$ m<sup>3</sup>) com utilização de filtro de cobre com espessura 0,5 mm para minimizar artefatos do tipo feixe de endurecimento (*beam hardening*).

### Reconstrução de imagens

As imagens do NRe foram reconstruídas em 3D utilizando o CTPro 3D XT 3.0.3 (Nikon Metrology NV) em um subvolume de interesse de 840 x 840 x 840 voxels e resolução espacial de 50  $\mu$ m (50 x 50 x 50  $\mu$ m<sup>3</sup>). No *software* VGStudio MAX 2.2 (*Volume graphics*, 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. Para a minimização de ruídos foi aplicado filtro Gaussiano 3 x 3 x 3.

### Segmentação de imagens

A segmentação é o processo pelo qual separa-se a região de interesse do restante da imagem. Neste caso, a região de interesse é composta pelos vazios existentes na amostra de solo.

A abordagem proposta é realizada *voxel a voxel*, com base no valor da radiodensidade dos mesmos. Entretanto, devido à resolução espacial, há voxels mistos, que são compostos por mais de uma fase, por exemplo, vazios e matriz do solo. Para tal, visou-se a identificação de *voxels* puros a partir da avaliação da vizinhança dos mesmos.

Tabela 1. Atributos físicos do Neossolo Regolítico Eutrófico obtidos de acordo com a EMBRAPA (1997). Fonte: De Almeida et al. (2015).

Perfil	Tipo de solo	Uso da terra	Amostra	Prof. camada	PT	Areia	Silte	Argila	Classe textural
				(cm)		(%)			
P5	NRe	Milho/feijão/mandioca	NRe	0-20	43	88	10	2	Arenoso

Todo o processo de segmentação de imagens foi executado no *ImageJ* 1.50i (Rasband – NIH), onde para a identificação e extração dos voxels puros foi utilizado um *plug-in* chamado *Pure Voxel Extration* (PVE), com o qual analisa a variabilidade de um voxel com a média dos valores de uma vizinhança de 124 voxels (janela de 5 x 5 x 5 voxels), conforme proposto por Elliot & Heck (2007).

Foi adotado um coeficiente de variabilidade limite da intensidade do voxel em relação à média igual a 20%, considerando como puros aqueles com intensidade pertencendo ao seguinte intervalo  $[\mu - 1. \sigma, \mu + 1. \sigma]$  (Costa et al., 2016).

Esses limites são adotados visando localizar um histograma multimodal, que pode ser modelado como uma mistura de gaussianas, sendo cada gaussiana associada a uma fase da amostra, visto que estamos representando somente os voxels puros.

O histograma gerado pela imagem do PVE foi utilizado para identificação das distribuições de radiodensidade para cada fase, por meio da média e da variância das respectivas gaussianas.

A identificação e determinação das fases dos voxels mistos a partir das médias e variância das fases de interesse foram realizadas pelo *plug-in CT Segmentation*, utilizando quatro métodos: *Clamping*, *Laplacian Filter*, *Edge Detection* e *Seeded Region Growing*. A imagem resultante desse processo foi uma imagem segmentada de vazios e não vazios.

#### Análise das imagens

A análise dos vazios foi feita com a imagem final segmentada utilizando o *plug-in Particle Analyzer*, presente no *ImageJ*. Na análise de partículas, os vazios foram classificados em três faixas de tamanho: pequenos (P), médios (M) e grandes (G) (Costa et al., 2016). Os vazios pequenos são aqueles formados por até oito voxels, os médios entre 9-100.000 voxels e o grandes são aqueles com uma quantidade maior que 100 mil voxels.

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 de solo. Esse *plug-in* associa elipsoides aos vazios, fornecendo dados como volume de voxels (pixels<sup>3</sup>), área superficial (pixels<sup>2</sup>), coordenadas e tamanho dos eixos do elipsoide de referência, por exemplo.

A porosidade foi calculada com a relação entre a soma dos volumes dos vazios (P, M e G) (Equação 2) e o volume do subvolume reconstruído

da amostra (Equação 3). Para isso, os volumes dos poros (mm<sup>3</sup>) foram calculados pela multiplicação do volume (em voxel), fornecido pelo *plug-in*, pela resolução da imagem (tamanho do voxel) (Equação 1).

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

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

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

Os vazios do tipo grande (G) foram considerados como vazios inter-agregados e os vazios classificados como médio (M) e pequeno (P) formam os vazios intra-agregados.

Também foi calculado a quantidade de agregado no subvolume adotado, sendo este igual ao volume total da região em estudo, ou seja, o subvolume reconstruído, menos o volume de vazios inter-agregados (Equação 4).

$$V_{\text{agregado}} = V_{\text{subvolume}} - V_{\text{poro(G)}} \quad (4)$$

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

A forma foi classificada de acordo com a classificação de Zingg (1935) e terminologias adotadas por Bullock et al. (1985) em *equant*, *prolate*, *oblate*, *triaxial*. O *plug-in* utilizado pode não ser capaz de contabilizar os voxels constituintes de um eixo do vazio, impossibilitando a determinação de sua forma. Esses vazios foram, portanto, classificados como complexos (CP).

Os vazios intra-agregados 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 feita através de uma 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, segundo a Sociedade Internacional de Ciência do Solo, seguindo os critérios de classificação adotado por Passoni et al. (2015).

A inclinação dos poros foi determinada com base em Taina et al. (2013), onde foram classificados de acordo com os valores dos ângulos entre o eixo maior do poro e o eixo perpendicular à superfície do solo em: quase horizontais (QH) (75-105°), inclinados-horizontais (IH) (60-75° e 105-120°), inclinados (I) (30-60° e 120-150°), inclinados- verticais (IV) (15-30° e 150-165°) e quase verticais (QV) (0-15° e 165-180°).

**Resultados**

Com as imagens dos subvolumes reconstruídos da amostra de solo NRe Costa et al. (2016) obteve uma porosidade de 28%, da qual, 27% são de vazios inter-agregados (Figura 1a) e 1% de vazios intra-agregados (Figura 1b). Além disso, o solo é composto por 73% de agregados (Tabela 2).

Em relação aos tamanhos dos poros intra-agregados, o solo NRe analisado possui uma maior quantidade de mesovazios do tipo médio a fino

(vazios com volumes variando entre  $1,278 \times 10^{-4}$  a  $6,545 \times 10^{-2} \text{.mm}^3$ ), cerca de 73% (Figura 2a).

Apenas, aproximadamente, 0,5% dos vazios intra-agregados representou os microvazios, isso ocorre devido a limitação da técnica decorrente da resolução das imagens, onde só é possível analisar vazios maiores que o volume do voxel, ou seja, vazios maiores que  $1,25 \times 10^{-4} \text{.mm}^3$ .

A distribuição acumulada dos tamanhos dos poros na curva da Figura 2b apresenta uma distribuição contínua dos vazios, onde cerca de 80% deles possuem volumes menores que  $0,1 \text{ mm}^3$ .

Tabela 2. Atributos físicos do Neossolo Regolítico Eutrófico obtidos com a microtomografia computadorizada de raios-X. Fonte: Costa et al. (2016).

Amostra	Prof. cm	P	AG	V. Inter (%)	V. Intra
NRe	0-20	28	73	27	1

Profundidade (Prof.), porosidade (P), agregados (AG), vazios inter-agregados (V.Inter) e vazios intra-agregados (V.Intra) do solo.



Figura 1. Imagem em 3D do espaço poroso inter-agregados e intra-agregados do Neossolo Regolítico Eutrófico (a-b).

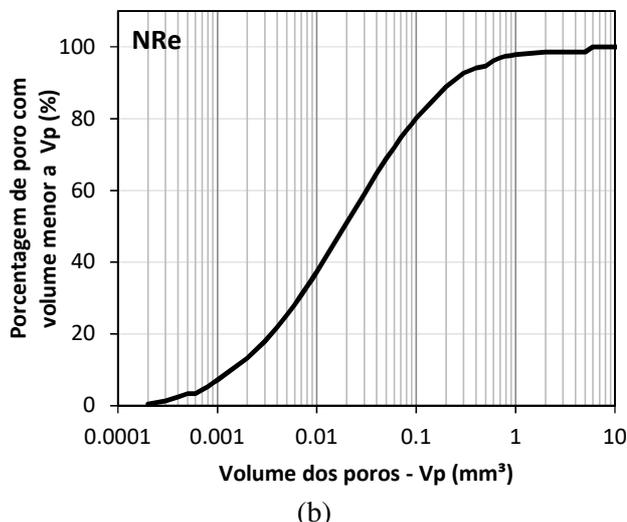
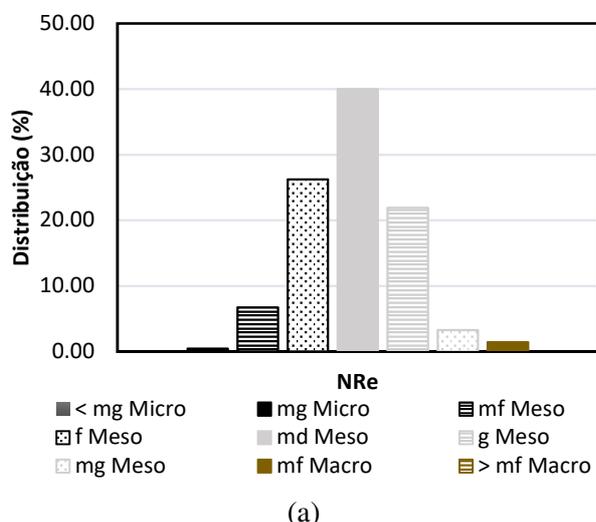


Figura 2. Classificação dos vazios intra-agregados em relação a seus tamanhos (a) e curva de distribuição acumulada dos tamanhos dos poros (b).

Em relação à forma dos poros intra-agregados, verificou-se uma maior presença de poros complexos (CP), com aproximadamente 66%, seguido por poros com formato *triaxial* (TRI), *prolate* (PRO), *oblate* (OBL) e *equant* (EQT) com, aproximadamente, 19%, 7%, 5% e 3%, respectivamente (Figura 3a).

Os vazios no formato *triaxial* e *prolate* são mais alongados que as duas outras forma, como também, os vazios com formato *triaxial* e *oblate* são poros mais achatados que os outros dois tipos (Arasan et al., 2011).

Diante disso, verificou-se uma maior presença de vazios intra-agregados alongados, aproximadamente 26%, do que regulares, cerca de 9% (Figura 3b). Como também, verificou-se uma maior quantidade de vazios intra-agregados achatados, aproximadamente 24%, contra cerca de 10% de vazios arredondados (Figura 3c).

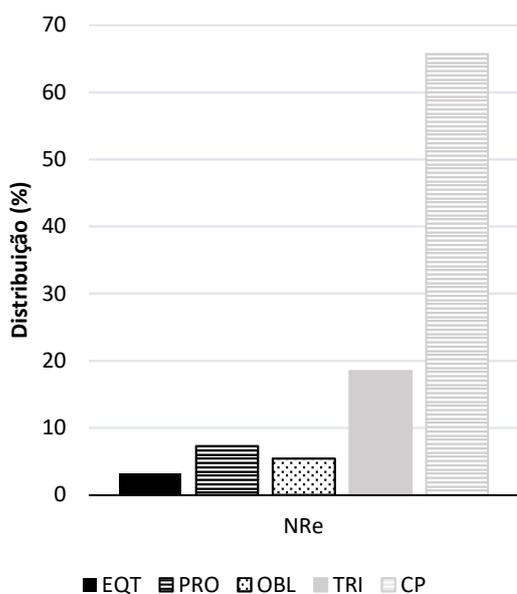
A distribuição acumulada dos tamanhos de cada formato dos vazios intra-agregados, mostra que os vazios no formato *equant* e *prolate* são menores que os vazios no formato *oblate* e *triaxial*. Mais de 94% dos poros *equant* e *prolate* possuem volumes menores que  $6,545 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$ , enquanto que apenas um pouco mais de 75% dos vazios

*oblate*, *triaxial* e 67% dos complexos possuem volumes menores que este (Figura 3d).

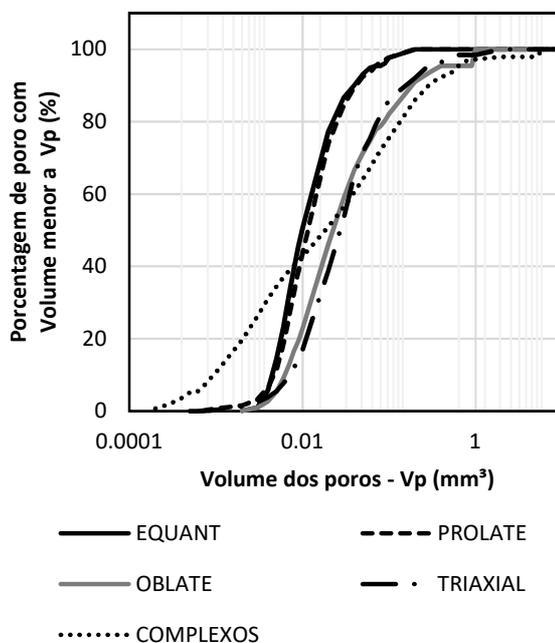
Os vazios intra-agregados regulares e alongados possuem curvas de distribuição de tamanhos semelhantes, onde cerca de 82% dos poros com esses formatos possuem volumes menores que  $6,545 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$  (Figura 3e).

As curvas de distribuição dos tamanhos dos vazios arredondados e achatados possuem comportamentos distintos, onde, na primeira, aproximadamente 94% dos vazios apresentam tamanhos menores que  $6,545 \times 10^{-2} \text{ mm}^3$ , enquanto que para esse mesmo volume a amostra de solo NRe apresentou apenas cerca de 75% de poros achatados (Figura 3f). Com isso, os poros achatados nesse solo possuem volumes maiores que os poros arredondados.

O solo analisado apresentou uma maior quantidade de vazios com inclinação quase-horizontal (QH), aproximadamente 40%, seguido pelos vazios inclinados (I) com cerca de 33% e inclinados-horizontais (IH) com 12%. Os vazios quase-verticais (QV) e inclinados-verticais (IV) representaram respectivamente cerca de 8% e 7% dos vazios intra-agregados (Figura 4).



(a)



(d)

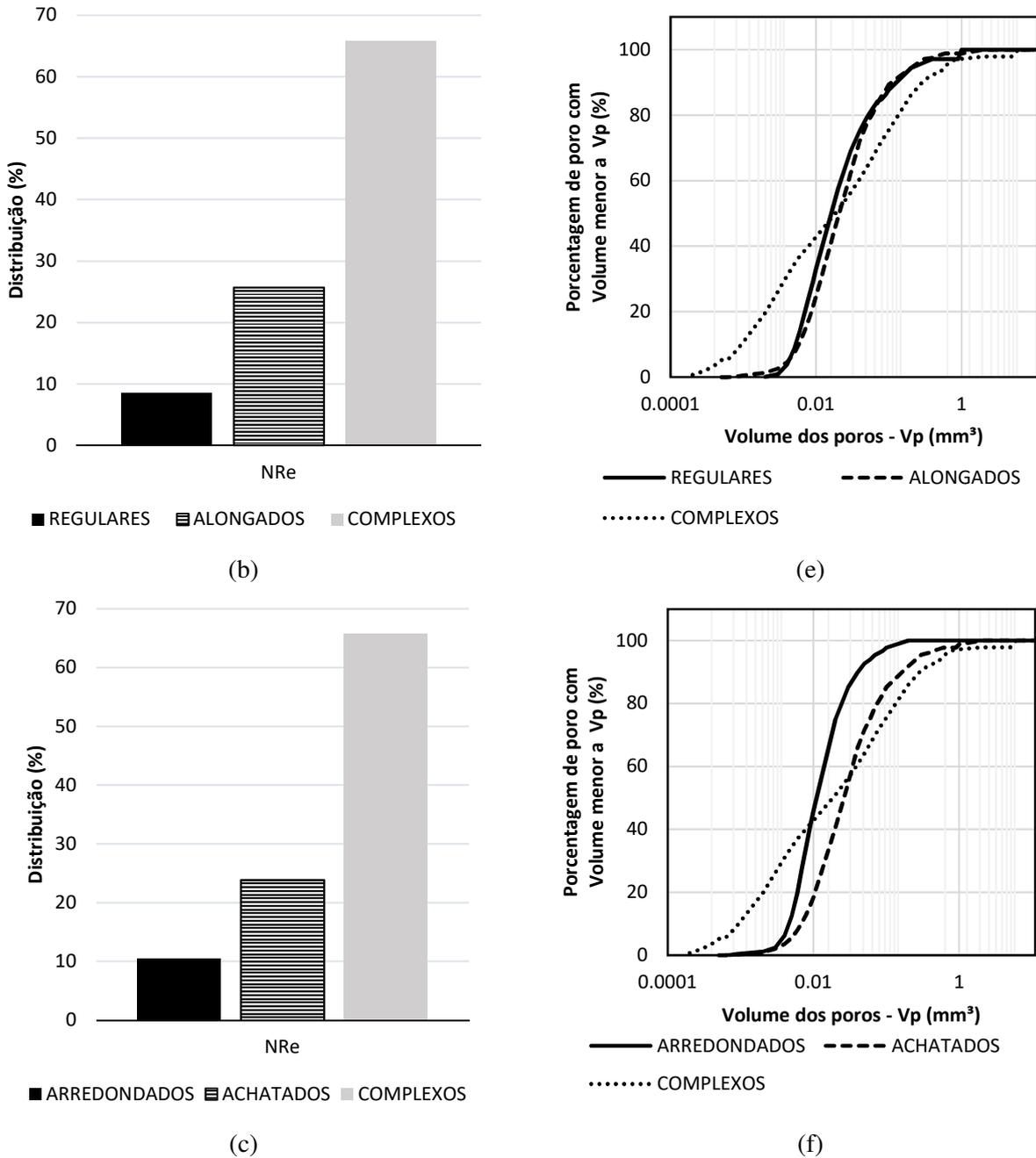


Figura 3. Classificação dos vazios intra-agregados em relação a seus formatos (a-c) e curva de distribuição acumulada dos tamanhos de cada formato dos poros (d-f).

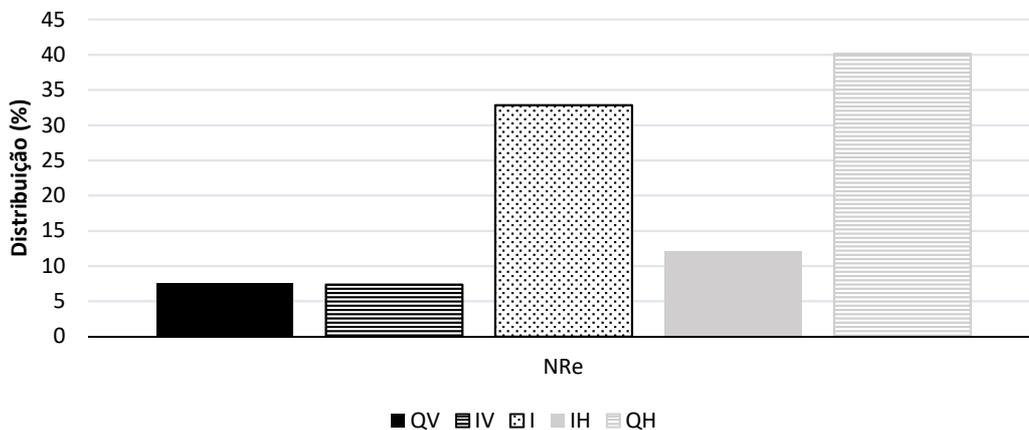


Figura 4. Classificação dos vazios intra-agregados em relação ao seus ângulos de inclinação.

## Discussão

O uso do solo para agricultura e pastagem, podem causar mudanças na estrutura do solo dependendo do manejo adotado. O uso excessivo de maquinários pesados e o pisoteio de animais podem gerar desagregação do solo e alterações no tamanho, formato e inclinação dos poros, afetando a condução e retenção de água.

Os vazios inter-agregados são poros com grande conectividade que são responsáveis pelo fluxo rápido de água no solo. Os poros intra-agregado são poros menores, com pequena conectividade ou isolados, responsáveis por um fluxo mais lento de água e pelo seu armazenamento. Os solos arenosos, como o solo aqui estudado, possuem a tendência de possuir um maior volume de poros inter-agregados. Uma redução de tamanho dos poros pode afetar a condução de água pelo meio, prejudicando o desenvolvimento das plantas e microorganismos e deixando-o mais suscetível a erosão.

A formação de agregados em um 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, por exemplo.

A condutividade hidráulica e a retenção de água no solo estão fortemente relacionados ao formato dos poros, onde poros complexos e alogados são poros que favorecem a infiltração da água no solo, enquanto que poros regulares são poros mais predispostos a retenção da água. Além disso, uma grande quantidade de poros achatados pode caracterizar uma compactação do solo (Schäffer et al., 2008).

Poros verticais ou quase-verticais são comumente encontrados em solos de baixa resistência a penetração de raízes e naqueles que contêm minhocas (Pierret et al., 2002). Poros inclinados indicam uma necessidade das raízes das plantas em se proliferarem em busca de nutrientes quando se tem uma resistência a penetração das mesmas. Poros horizontais indicam uma resistência maior a penetração de raízes e conseqüentemente um prejuízo no desenvolvimento e crescimento das plantas. (Jassogne et al., 2007). No caso do solo NRe analisado já foi detectada a presença de lamelas argilosas (Rolim Neto e Santos 1994; de Almeida et al., 2015) o que pode justificar a maior proporção de poros horizontais e de poros inclinados, uma vez que, as lamelas se comportam como barreiras a penetração das raízes.

## Conclusão

A Microtomografia Computadorizada de Raios-x proporcionou de forma rápida, detalhada, eficiente, não destrutiva e em três dimensões a análise do espaço poral do solo, permitindo a caracterização morfométrica dos vazios e possibilitando uma compreensão da capacidade de condução/retenção de água, como também, o entendimento do desenvolvimento radicular de plantas e do nível de qualidade do solo.

## Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo auxílio à pesquisa, através da concessão da bolsa de estudo de mestrado da primeira autora (Processo N°. 130874/2015-9) e das Bolsas de Produtividade dos professores Antonio Celso Dantas Antonino e Rejane Magalhães de Mendonça Pimentel (Bolsa Sênior da CAPES, BEX no 1752/14-6). Ao grupo de pesquisa de Física do Solo da Universidade Federal Rural de Pernambuco, Garanhuns, Brasil, pelo fornecimento de dados utilizados nesse estudo. Ao Laboratório de Tomografia Computadorizada de Raios-X do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco (DEN-UFPE) pela disponibilização de imagens utilizadas nesse estudo, pelo espaço em seu servidor e acesso aos programas utilizados nas análises.

## Referências

- ARASAN, S.; AKBULUT, S.; HASILOGLU, A. S. 2011. 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.
- BULLOCK, P.; FEDOROFF, N.; JONGERIUS, A.; STOOPS, G.; TURSINA, T. 1985. *Handbook for soil thin section description*. Wayne Research.
- COSTA, L. F.; ANTONINO, A. C. D.; HECK, R. J.; COUTINHO, A. P.; PIMENTEL, R. M. M.; VASCONCELOS, T. C.; MACHADO, C. B. 2016. Espaço poroso em solos brasileiros usando tomografia computadorizada de raios-X. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.9, n.3, p.692-706.
- CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S.; POZZI-MUCELLI, R. S. 1985. Static and dynamic three-dimensional studies of water in soil using computed tomographic scanning. *Soil Science*, v.140, p.326-332.
- DE ALMEIDA, A. V. D. L.; CORRÊA, M. M.; LIMA, J. R. DE S.; SOUZA, E. S.; SANTORO, K.

- R.; ANTONINO, A. C. D. 2015. Atributos Físicos, Macro e Micromorfológicos de Neossolos Regolíticos no Agreste Meridional de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.39, p.1235-1246.
- DE FREITAS, D. A. F.; SILVA, M. L. N.; CARDOSO, E. L.; CURI, N. 2012. Índices de qualidade do solo sob diferentes sistemas de uso e manejo florestal e cerrado nativo adjacente. *Revista Ciência Agronômica*, v.43, p.417-428, 2012.
- ELLIOT, T. R.; HECK, R. J. 2007. A comparison of 2D vs. 3D thresholding of X-ray CT imagery. *Canadian Journal of Soil Science*, v.87, n.4, p.405-412.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 1997. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. Rio de Janeiro.
- GONÇALVES, F. C.; MORAES, M. H. 2012. Porosidade e infiltração de água do solo sob diferentes sistemas de manejo. *Irriga*, v.17, p.337-345.
- HAINSWORTH, J. M.; AYLMOORE, L. A. G. 1983. The use of computer assisted tomography to determine spatial distribution of soil water content. *Australian Journal of Soil Research*, v.21, p.435-443.
- HILLEL, D. 2013 *Introduction to environmental soil physics*. Academic Press. San Diego, CA.
- HU, X.; LI, Z. C.; LI, X. Y.; LIU, L. Y. 2016. Quantification of soil macropores under alpine vegetation using computed tomography in the Qinghai Lake Watershed, NE Qinghai-Tibet Plateau. *Geoderma*, v.264, p.244-251.
- JASSOGNE, L.; MCNEILL, A.; CHITTLEBOROUGH, D. 2007. 3D-visualization and analysis of macro-and meso-porosity of the upper horizons of a sodic, texture-contrast soil. *European Journal of Soil Science*, v.58, n.3, p.589-598.
- JORGE, R. F.; DE ALMEIDA, C. X.; BORGES, E. N.; PASSOS, R. R. 2012. Distribuição de poros e densidade de latossolos submetidos a diferentes sistemas de uso e manejo. *Bioscience Journal*, v.28, p.159-169.
- KIEHL, E. J. 1979. *Manual de edafologia: relações solo-planta*. São Paulo: Ceres. 262 p.
- KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. 2002. Condutividade hidráulica de um Latossolo Roxo, não saturado, sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Ciência Rural*, v.32, n.6, p.945-953.
- LAMANDÉ, M.; LABOURIAU, R.; HOLMSTRUP, M.; TORP, S. B.; GREVE, M. H.; HECKRATH, G.; JACOBSEN, O. H. 2011. Density of macropores as related to soil and earthworm community parameters in cultivated grasslands. *Geoderma*, v.162, n.3, p.319-326.
- LU, S. G.; SUN, F. F.; ZONG, Y. T. 2014. Effect of rice husk biochar and coal fly ash on some physical properties of expansive clayey soil (Vertisol). *Catena*, v.114, p.37-44.
- LUO, L.; LIN, H.; LI, S. 2010. Quantification of 3-D soil macropore networks in different soil types and land uses using computed tomography. *Journal of Hydrology*, v.393, n.1, p.53-64.
- LUXMOORE, R. J. 1981. Micro, meso and macroporosity of soil. *Soil Science Society American Journal*, v.45, p.671-672.
- MARSILI, A.; SERVADIO, P.; PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N. 1998. Changes of some physical properties of a clay soil following passage of rubber-and metal-tracked tractors. *Soil and Tillage Research*, v.49, p.185-199.
- OTHMER, H.; DIEKKRÜGER, B.; KUTILEK, M. 1991. Bimodal Porosity and Unsaturated Hydraulic Conductivity. *Soil Science*, v.152, p.139-150.
- OUOBA, S.; COUSIN, B.; CHERBLANC, F.; KOULIDIATI, J.; BÉNET, J. C. 2014. Une méthode mécanique pour déterminer la porosité totale d'un sol. *Comptes Rendus Mécanique*, v.342, n.12, p.732-738.
- PAGLIAI, M.; MARSILI, A.; SERVADIO, P.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S. 2003. 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, p.119-129.
- 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.

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

PIERRET, A.; CAPIOWIEZ, Y.; BELZUNCES, L.; MORAN, C. J. 2002. 3D reconstruction and quantification of macropores using X-ray computed tomography and image analysis. Geoderma, v.106, p.247-271.

PIRES, L. F.; BRINATTI, A. M.; SAAB, S. C.; CÁSSARO, F. A. 2014. Porosity distribution by computed tomography and its importance to characterize soil clod samples. Applied Radiation and Isotopes, v.92, p.37-45.

RASBAND, W. S. ImageJ. 1997-2012. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA. Available at: <http://imagej.nih.gov/ij>.

REGELINK, I. C.; STOOF, C. R.; ROUSSEVA, S.; WENG, L.; LAIR, G. J.; KRAM, P.; COMANS, R. N. 2015. Linkages between aggregate formation, porosity and soil chemical properties. Geoderma, v.247, p.24-37.

RIBEIRO, K. D.; MENEZES, S. M.; MESQUITA, M. D. G. B. D.; SAMPAIO, F. D. M. T. 2007. Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras-MG. Ciênc. Agrotec., v.31, n.4, p.1167-1175.

RICHARDS, L. A. 1965. Physical conditions of water in soil. In: BLACK, C. A. (Ed.). Methods of soil analysis. Madison: American Society for Testing and Materials, p.128-152.

ROLIM NETO, F. C.; SANTOS, M. C. 1994. Gênese de solo arenoso com lamelas e fragipã no Agreste de Pernambuco. Rev. Bras. Cien. Solo, v.18, p.243-53.

SCHÄFFER, B.; MUELLER, T. L.; STAUBER, M.; MÜLLER, R.; KELLER, M.; SCHULIN, R.

2008a. Soil and macro-pores under uniaxial compression. II. Morphometric analysis of macro-pore stability in undisturbed and repacked soil. Geoderma, v.146, p.175-182.

SCHÄFFER, B.; STAUBER, M.; MUELLER, T. L.; MÜLLER, R.; SCHULIN, R. 2008b. Soil and macro-pores under uniaxial compression. I. Mechanical stability of repacked soil and deformation of different types of macro-pores. Geoderma, v.146, p.183-191.

SHAXSON, F.; BARBER, R. 2016. Optimizing soil moisture for plant production: The significance of soil porosity. Rome, Italy: UN-FAO.

SHAXSON, F.; KASSAM, A. 2015. Soil erosion and conservation. Agric. for Develop., v.24, p.21-25.

STEFANOSKI, D. C.; SANTOS, G. G.; MARCHÃO, R. L.; PETTER, F. A.; PACHECO, L. P. 2013. Uso e manejo do solo e seus impactos sobre a qualidade física. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.17, p.1301-1309.

TAINA, I. A.; HECK, R. J.; DEEN, W.; MA, E. Y. 2013. 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.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. D.; LIBARDI, P. L. 1998. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. Bras. Ci. Solo, v.22, p.573-581.

WANG, J.; GUO, L.; BAI, Z.; YANG, L. 2016. Using computed tomography (CT) images and multi-fractal theory to quantify the pore distribution of reconstructed soils during ecological restoration in opencast coal-mine. Ecological Engineering, v.92, p.148-157.

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