

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE INFORMÁTICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO

DIONICIO ÁNGEL VÁSQUEZ ROSALES

**Descrição da Estrutura Tridimensional da  
Frente de Molhamento na Região Não-  
Saturada do Solo**

Dissertação apresentada como requisito parcial  
para a obtenção do grau de Mestre em Ciência  
da Computação

Prof. Dr. Jacob Scharcanski  
Orientador

Porto Alegre, Abril de 2013.

**CIP – CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO**

Vásquez, Dionicio

Descrição da Estrutura Tridimensional da Frente de Molhamento na Região Não-Saturada do Solo / Dionicio Ángel Vásquez Rosales. – Porto Alegre:PPGC da UFRGS, 2013.

74 f.:il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Computação. Porto Alegre, BR – RS, 2013. Orientador: Jacob Scharcanski.

1. Processamento de Imagens 3D. 2. Tomografia Computadorizada 3. Infiltração. I. Dionicio Vásquez. II. Jacob Scharcanski. III. Descrição da Estrutura Tridimensional da Frente de Molhamento no Processo de Infiltração na Região Não-Saturada do Solo.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Reitor: Prof. Carlos Alexandre Netto

Vice-Reitor: Prof. Rui Vicente Oppermann

Pró-Reitor de Pós-Graduação: Prof. Vladimir Pinheiro do Nascimento

Diretor do Instituto de Informática: Prof. Luís da Cunha Lamb

Coordenador do PPGC: Prof. Luigi Carro

Bibliotecária-Chefe do Instituto de Informática: Beatriz Regina Bastos Haro

*"Tell me and I forget. Teach me and I remember. Involve me and I learn."*  
BENJAMIN FRANKLIN.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a meu orientador, Jacob Scharcanski, pelos ensinamentos, críticas, grande paciência e disposição com que guiou este trabalho. Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo auxílio financeiro. Agradeço a minha família e especialmente aos meus pais Dionicio e Ángela, pela educação, apoio e motivação nessa a minha caminhada acadêmica e pessoal. Finalmente aos meus amigos e colegas pela convivência e aprendizado.

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....</b>	<b>7</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS.....</b>	<b>9</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>11</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>13</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>14</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>15</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
1.1 <b>Objetivo e Contribuição do Trabalho.....</b>	<b>16</b>
1.1.1 <b>Objetivo do Trabalho.....</b>	<b>16</b>
1.1.2 <b>Contribuição do Trabalho.....</b>	<b>16</b>
1.2 <b>Justificativa.....</b>	<b>16</b>
1.3 <b>Caracterização do Problema.....</b>	<b>17</b>
1.4 <b>Organização da Dissertação.....</b>	<b>18</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>19</b>
2.1 <b>Meios Porosos e a Ciência dos Solos.....</b>	<b>19</b>
2.2 <b>Importância do Estudo do Movimento da Água no Solo.....</b>	<b>21</b>
2.3 <b>Movimento da Água Através do Solo.....</b>	<b>22</b>
2.4 <b>Frente de Molhamento no Processo de Infiltração.....</b>	<b>23</b>
2.5 <b>Importância do Fluxo Preferencial.....</b>	<b>24</b>
2.6 <b>Métodos para Análise do Processo de Infiltração.....</b>	<b>26</b>
2.6.1 <b>Métodos Convencionais.....</b>	<b>26</b>
2.6.2 <b>Métodos Não-Invasivos.....</b>	<b>27</b>

<b>3</b>	<b>METODOLOGIA DO TRABALHO .....</b>	<b>30</b>
3.1	Captura de Imagens .....	31
3.2	Pré-processamento .....	33
3.2.1	Minimização de Ruído em Imagens 3D (3DQRBSS).....	34
3.3	Algoritmo para a Detecção da Frente de Molhamento .....	35
3.3.1	Segmentação de Imagens 3D .....	36
3.3.2	Detecção da Frente de Molhamento.....	37
3.4	Descrição da Estrutura 3D da Frente de Molhamento .....	40
3.4.1	Características Morfológicas .....	40
3.4.2	Análise da Curvatura para descrever a Superfície da Frente de Molhamento.....	40
<b>4</b>	<b>RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>42</b>
4.1	Dados Experimentais .....	42
4.2	Detecção da Frente de Molhamento.....	43
4.2.1	Perfil do Processo de Infiltração .....	46
4.3	Descrição da Estrutura 3D da Frente de Molhamento .....	51
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>60</b>
5.1	Perspectivas e Trabalhos Futuros.....	60
<b>6</b>	<b>TRABALHOS RESULTANTES.....</b>	<b>62</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>63</b>
	<b>APÊNDICE A GERAÇÕES DE TOMÓGRAFOS.....</b>	<b>66</b>
	<b>APÊNDICE B PARÂMETROS DE QUALIDADE DE IMAGENS.....</b>	<b>71</b>

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
3DQRBSS	3D Quadric-Regressed Bilateral Scale-Space
3DSRM	3D Stochastic Region Merging
APC	Amostra de Solo com tratamento de Plantio Convencional
bmp	Bitmap ( <i>mapa de bits</i> )
CNPDIA	Centro Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento de Instrumentação Agropecuária
DoG	Derivada de Gaussiana ( <i>Derivated of Gaussian</i> )
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria
GPR	Geo Radar ( <i>ground penetrating radar</i> )
HSI	Espaço de cor Matiz, Saturação e Intensidade ( <i>Hue, Saturation and Instensity</i> )
LRd	Latossolo Roxo distrófico
<i>pixel</i>	Elementos de imagem – <i>picture elements</i>
PC	Computador Pessoal ( <i>Personal Computer</i> )
PPGC	programa de Pós-Graduação em Computação
PVC	Policloreto de Vinil ( <i>Polyvinyl Chloride</i> )
RGB	Espaço de cor Vermelho, Verde e Azul ( <i>Red, Green and Blue</i> )
RM	Ressonância Magnética
RMSE	Erro Médio Quadrático ( <i>Root Mean Square Error</i> )
TC	Tomografia Computadorizada
TCX	Tomografia Computadorizada de Raios X
TCN	Tomografia Computadorizada de Nêutrons
TDR	Reflectometria no Domínio do Tempo ( <i>Time Domain Reflectometry</i> )
TL	Transmissão de Luz

UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UT	Unidade Tomográfica
<i>voxel</i>	Elementos de volume – <i>volume cell</i>



## LISTA DE SÍMBOLOS

$\gamma$	Raio Gamma
$K$	Condutividade Hidráulica
$P$	Pressão
$z$	Distancia Vertical ou Profundidade
$\theta$	Conteúdo de Água
$\psi$	Potencial Hidráulico
$t$	Instante de tempo
$\mu$	Média
$R^2$	Coefficiente de Determinação
$R$	Correlação
$i$	Índice do tempo
$j$	Índice da escala para decomposição
$\sigma_j$	Escala de decomposição
$I_{wet}^i$	Imagem de solo molhado no instante de tempo $t_i$
$I_{dry}$	Imagem de solo seco
$I_{moisture}^i$	Imagem de solo úmido da amostra de LRd no instante de tempo $t_i$
$I_{interp}^i$	Imagem interpolada no instante de tempo $t_i$
$I_{denoised}^{ij}$	Imagem após eliminação de ruído no instante de tempo $t_i$ e na escala de decomposição $\sigma_j$
$X, Y$ e $Z$	Direções dos eixos coordenados no espaço 3D
$I_{srm}^i$	Imagem segmentada usando o método 3DSRM
$I_{m-otsu}^i$	Imagem após aplicar o método Multi-Otsu Thresholding
$I_{WettingFront}^i$	Imagem da frente de molhamento no instante de tempo $t_i$

$I_{wetzone}^i$	Imagem binária das zonas da Frente de molhamento
$I_{WettingSurf}^i$	Imagem binária que representa a superfície da frente de molhamento no instante de tempo $t_i$
$I_{m-otsu-B}^i$	Imagem binária resultado de mapear o valor dos $voxels > 0$ a 1 da imagem $I_{m-otsu}^i$ no instante de tempo $t_i$
$I_{moisture\_B}^i$	Imagem binária das densidades de umidade
$W$	Janela local
$E[.]$	Valor Esperado
$\alpha$	Predicado Estocástico
$\Lambda$	Função de penalidade estatística
$\Phi$	Número de voxels do objeto
$I$	Imagem
$R_a$	Região $a$
$Q$	Termo de regularização
$D_I$	Faixa de valores dos tons de cinza da imagem
$\sigma_{srm}$	Escala para o operador DoG
$H(.)$	Histograma

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Imagens 2D em tons de cinza (a) e (b) e imagens binárias após segmentação (c) e (d) de amostras de solo.....	20
Figura 2.2: Segmentação de imagens de solo usando um algoritmo adaptativo proposto por Felipussi et al.....	21
Figura 2.3: Regiões do solo, a região não saturada ou zona vadosa e a região saturada.....	22
Figura 2.5: Formas de transporte de água e solutos no processo de infiltração: (a) A frente de molhamento avança na matriz através de caminhos do fluxo preferencial, (b) avanço sem caminhos do fluxo preferencial. ....	24
Figura 2.6: Tipos de fluxo preferencial: (a) Macropore Flow, (b) Funnel Flow, (c) Finger Flow. ....	25
Figura 2.7: Detalhe do avanço da frente de molhamento em função do tempo. ....	27
Figura 2.8: Perfis de fluxo captados usando o método TCN (a) Imagens do processo de infiltração com 20.0 ml/min. (b) Imagens captadas no tempo no processo de infiltração com 10.0 ml/min, o tempo incrementa em intervalo de 1s da esquerda para a direita...	29
Figura 3.1: Esquema geral do método proposto para descrição da frente de molhamento. ....	30
Figura 3.2: Esquema do tomógrafo portátil, com sistema de varredura de 3ra geração, instalado em torno de um monólito de solo. ....	31
Figura 3.3: Reta de calibração do tomógrafo, equação da reta e coeficiente de determinação ( $R^2$ ).....	32
Figura 3.4: Exemplo da decomposição da imagem usando o método 3DQRBSS. (a) imagem original. (b) Imagem com ruído gaussiano. (c) Primeira escala. (d) Terceira escala. (e) Quinta escala. ....	35
Figura 3.5: Diagrama do método proposto para detecção da frente de molhamento. ....	35
Figura 3.6: Exemplo da segmentação por união de regiões. (a) Inicialização das regiões. (b) Iteração intermediária. (c) Iteração mais avançada. ....	37
Figura 3.7: Zonas de umidade geradas usando o método Multi-Otsu Thresholding. (a) Visualização 3D da amostra completa. (b) Visualização de um slice da amostra.....	38
Figura 3.8: Exemplo de detecção da frente de molhamento em imagens de TC de perfis de solo. (a) Zonas de umidade (esquerda) e a frente de molhamento (direita) da amostra no tempo inicial. (b) Zonas de umidade (esquerda) e a frente de molhamento (direita) da amostra no tempo final.....	39
Figura 3.9: Exemplo das curvaturas em uma estrutura 3D. (a) Estrutura 3D original. (b) Curvatura média. (c) Curvatura Gaussiana. (d) Curvatura absoluta.....	41
Figura 4.1: Corte e raspagem do bloco de solo para retirada de amostra cilíndrica.....	42
Figura 4.2: Exemplo do conteúdo da água antes de detectar a frente de molhamento para os tempos (a) $t_1$ , (b) $t_2$ , (c) $t_3$ e (d) $t_4$ .....	43

Figura 4.3: Exemplo da representação da frente de molhamento detectada nas amostras de perfis de solo. Vista frontal (fila superior) e vista superior (fila inferior) para os tempos (a) $t_1$ , (b) $t_2$ , (c) $t_3$ e (d) $t_4$ .	44
Figura 4.4: Zona de tolerância definida como uma aproximação do groundtruth para medir a proporção de erro na detecção da frente de molhamento com o método proposto.	45
Figura 4.5: Percentagem de umidade com relação ao nível de profundidade (a) e a distribuição das densidades de umidade (tons de cinza) (b) para cada tempo na sequencia de infiltração da amostra APC4.	46
Figura 4.6: Superfície da Frente de Molhamento para os tempos $t_1$ , $t_2$ , $t_3$ e $t_4$ de esquerda à direita (a), histograma com a percentagem de umidade com relação ao nível de profundidade (b) e a distribuição das densidades de umidade (tons de cinza) (c) para cada tempo na sequencia de infiltração da amostra APC1.	48
Figura 4.7: Superfície da Frente de Molhamento para os tempos $t_1$ , $t_2$ , $t_3$ e $t_4$ de esquerda à direita (a), histograma com a percentagem de umidade com relação ao nível de profundidade (b) e a distribuição das densidades de umidade (tons de cinza) (c) para cada tempo na sequencia de infiltração da amostra APC2.	49
Figura 4.8: Superfície da Frente de Molhamento para os tempos $t_1$ , $t_2$ , $t_3$ e $t_4$ de esquerda à direita (a), histograma com a percentagem de umidade com relação ao nível de profundidade (b) e a distribuição das densidades de umidade (tons de cinza) (c) para cada tempo na sequencia de infiltração da amostra APC5.	50
Figura 4.9: Histograma da área (a), diâmetro equivalente (b), eixo maior (c) e o eixo menor (d) para cada tempo na sequencia de infiltração da amostra APC1.	52
Figura 4.10: Histograma da área (a), diâmetro equivalente (b), eixo maior (c) e o eixo menor (d) para cada tempo na sequencia de infiltração da amostra APC2.	53
Figura 4.11: Histograma da área (a), diâmetro equivalente (b), eixo maior (c) e o eixo menor (d) para cada tempo na sequencia de infiltração da amostra APC5.	54
Figura 4.12: Visualização da curvatura média para cada tempo na sequencia de infiltração da amostra APC5 nos tempos $t_1$ , $t_2$ , $t_3$ e $t_4$ de esquerda à direita.	55
Figura 4.13: Visualização da curvatura gaussiana para cada tempo na sequencia de infiltração da amostra APC5 nos tempos $t_1$ , $t_2$ , $t_3$ e $t_4$ de esquerda à direita.	55
Figura 4.14: Visualização da curvatura absoluta para cada tempo na sequencia de infiltração da amostra APC5 nos tempos $t_1$ , $t_2$ , $t_3$ e $t_4$ de esquerda à direita.	56
Figura 4.15: Visualização das normais à curvatura para cada tempo na sequencia de infiltração da amostra APC5 nos tempos $t_1$ , $t_2$ , $t_3$ e $t_4$ de esquerda à direita.	56
Figura 4.16: Histograma da curvatura absoluta para cada tempo na sequencia de infiltração da amostra APC1 nos tempos $t_1$ (verde), $t_2$ (rosa), $t_3$ (azul) e $t_4$ (preto).	57
Figura 4.17: Histograma da curvatura absoluta para cada tempo na sequencia de infiltração da amostra APC2 nos tempos $t_1$ (verde), $t_2$ (rosa), $t_3$ (azul) e $t_4$ (preto).	58
Figura 4.18: Histograma da curvatura absoluta para cada tempo na sequencia de infiltração da amostra APC5 nos tempos $t_1$ (verde), $t_2$ (rosa), $t_3$ (azul) e $t_4$ (preto).	59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Especificações mecânicas dos PDAs.....	32
Tabela 4.1: Medida da estimação da proporção de erro na detecção da frente de molhamento em média para o método proposto.....	45
Tabela 4.2: Valores mínimos e máximos da curvatura para a amostra APC1 .....	57
Tabela 4.3: Valores mínimos e máximos da curvatura para a amostra APC2. ....	58
Tabela 4.4: Valores mínimos e máximos da curvatura para a amostra APC5. ....	59

## RESUMO

O estudo das propriedades de transporte do meio poroso é um tema importante para muitas áreas como a Ciência do Solo, onde o conhecimento dos processos que envolvem o movimento da água é de fundamental importância para o manejo e a conservação do mesmo. Nas últimas décadas, as técnicas não-invasivas e o processamento de imagens têm ajudado muito na modelagem e visualização da estrutura do meio, e têm sido aplicadas no estudo da distribuição dos fluidos com diferentes abordagens. Nesse trabalho é apresentado um novo método para análise do movimento da água, baseado na descrição da estrutura tridimensional da frente de molhamento no processo de infiltração vertical na região não-saturada do solo, considerando que a frente de molhamento tem informação relevante sobre os primeiros estágios da infiltração na interface líquido-sólido. O método proposto para a descrição da estrutura tridimensional da frente de molhamento compõe-se de dois principais módulos. O primeiro é responsável pela segmentação de imagens tomográficas para a detecção da frente de molhamento e cujo resultado é crucial para a análise da superfície resultante. O segundo módulo efetua a determinação de descritores da superfície obtida baseada na computação da variabilidade morfológica e a identificação de zonas de máxima adsorção através da análise da curvatura. As imagens usadas nos experimentos foram obtidas usando um tomógrafo de campo específico para estudos de solos, permitindo o processamento sem alterar a estrutura do solo. Os resultados preliminares são encorajadores e indicam que a abordagem utilizada consegue descrever o movimento da água usando informação da frente de molhamento no espaço tridimensional e no tempo.

**Palavras-Chave:** Processamento de Imagens 3D, Meios Porosos, Infiltração, Frente de Molhamento, Tomografia Computadorizada.

## **Description of the Three-Dimensional Wetting Front Structure in Unsaturated Soil**

### **ABSTRACT**

The study of the transport properties in porous media is an important issue for many areas such as soil science, where knowledge about processes that involve the movement of water in the soil has fundamental importance to soil management and soil conservation. In recent decades noninvasive techniques and image processing algorithms have been very helpful in modeling and visualization of the structure medium and have been applied to study of the distribution of fluid with different approaches. This work present a new method to analysis of the movement of water based on the description of the three-dimensional wetting front structure in vertical infiltration process in unsaturated soil, whereas the wetting front structure has relevant information in the earliest stages of infiltration in liquid-solid interface. The proposed method for the description of the three-dimensional wetting front structure is comprised of two main modules. The first module is responsible of the three-dimensional image segmentation for the wetting front detection and its result is a very crucial step to analysis of the surface obtained. The second module compute features of the surface obtained to analysis based on morphological variability and maximal adsorption zones identification through the curvature. The image used in the experimental test were obtained using a tomograph of field specific to soil study, allowing the processing without changing of the soil structure. Our preliminary results are encouraging and indicate that our approach can describe the movement of water using information from the wetting front in three-dimensional space and time.

**Keywords:** 3D image processing, porous media, infiltration, wetting front, computed tomography.

# 1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho consiste de uma dissertação de mestrado, requisito obrigatório para obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação no Programa de Pós-graduação em Computação (PPGC) da Universidade Federal da Universidade Federal do Rio grande do Sul (UFRGS). Ao longo do texto, algumas questões serão abordadas e discutidas, como por exemplo:

- Definição do objetivo, a contribuição, a justificativa e a caracterização do problema;
- Uma revisão bibliográfica relacionada aos trabalhos relevantes de outros pesquisadores que tem como escopo o mesmo tema ou que abordam, pelo menos em parte, o mesmo assunto;
- Proposta de solução para o problema descrito, considerando a fundamentação conceitual dos aspectos a serem empregados e finalmente os resultados experimentais.

## 1.1 Objetivo e Contribuição do Trabalho

### 1.1.1 Objetivo do Trabalho

O objetivo principal desse trabalho é desenvolver e validar algoritmos para a detecção e a descrição da estrutura tridimensional da frente de molhamento, baseado em técnicas de processamento de imagens, com a finalidade de melhorar o entendimento dos processos de transporte como o movimento da água através do estudo da frente de molhamento em imagens de tomografia computadorizada (TC) obtidas a partir de amostras da região não saturada do solo em processo de infiltração vertical.

### 1.1.2 Contribuição do Trabalho

Nesse trabalho pretendemos contribuir para a descrição e melhor entendimento dos processos de transporte em amostras de solos, descrevendo o movimento da água nos primeiros estágios da infiltração usando informação espacial e temporal.

Outra contribuição é ajudar na estimativa de variáveis hidrológicas do solo que são de bastante interesse para hidrologistas e físicos de solos.

## 1.2 Justificativa

Com o aumento da capacidade de processamento dos computadores e a redução de custos de equipamentos de aquisição de imagens, a aplicação das técnicas de processamento de imagens vem crescendo cada vez mais. Dentre as diversas áreas do



processamento de imagens, o estudo de objetos 3D reconstruídos a partir de imagens obtidas usando técnicas não-invasivas vem ganhando destaque tanto pela importância, quanto pela diversidade de aplicações como, por exemplo, a visualização 3D de órgãos a partir de imagens médicas, detecção de tumores, segmentação de meios porosos como as rochas de reservatório.

O problema do estudo do movimento da água no solo é complexo devido as diferentes variáveis que atuam no processo de infiltração, uma representação fiel da estrutura do solo e do processo de infiltração no tempo é necessária para seu estudo, mas com métodos convencionais não é possível uma vez que precisam alterar a estrutura do solo para colocar sensores ou tem a limitação de fazer o estudo em amostras 2D. Uma representação 3D é a melhor opção para esse problema, técnicas não-invasivas como a TC vem sendo utilizadas em estudos de campo e laboratório na Ciência do Solo para estudo das propriedades de transporte, mas precisam de métodos adequados para trabalhar com problemas próprios da captação da imagem como o baixo contraste, o ruído e a forma própria do objeto a ser estudado que não podem ser controlados ou conhecidos previamente.

Sem duvida, um dos maiores desafios enfrentados é a detecção da frente de molhamento, parte importante no movimento da água no solo na interface líquido-sólido, mas a dificuldade é que não existe uma faixa de densidades de umidade próprias que a definem e sua estrutura vai depender de variáveis no processo de infiltração como da estrutura do solo e as forças de gravidade. Para tratar esse e outros problemas próprios nas imagens de tomografia, tem-se desenvolvido métodos para eliminação de ruído e segmentação de imagens que com um passo de pós-processamento permite detectar a frente de molhamento com um valor de incerteza adequado para a sua caracterização sobre uma zona de tolerância.

### **1.3 Caracterização do Problema**

Este trabalho aborda o problema da descrição do movimento da água em amostras da região não saturada do solo, usando informação da estrutura tridimensional da frente de molhamento no processo de infiltração vertical.

Vamos definir a frente de molhamento como a zona que se gera no processo de infiltração e que se localiza no limite entre as zonas úmidas e as secas e tem informação crucial no avanço da água. A estrutura tridimensional da frente de molhamento deve ser detectada usando técnicas de processamento de imagens e é representada como uma superfície que vai mudar sua forma no avanço da infiltração nas imagens de tomografia computadorizadas obtidas a partir de amostras de colunas da região não saturada do solo.

Devido à importância do uso da técnica não-invasiva para preservar a estrutura da amostra, as imagens geradas a partir do tomógrafo tem problemas como o ruído, baixo contraste, e o processamento deve ser feito considerando informação entre as seções bidimensionais para preservar a informação da continuidade da amostra da coluna do solo.

A detecção acurada da frente de molhamento vai permitir descrever o movimento da água nos primeiros estágios na interface líquido-sólido no avanço da infiltração em uma coluna de solo analisando a sua variabilidade morfológica e identificando zonas de máxima adsorção através da obtenção da curvatura absoluta.

## **1.4 Organização da Dissertação**

No capítulo 2 será apresentada uma revisão bibliográfica considerando uma pequena introdução aos trabalhos com objetivos relacionados como a modelagem e visualização da estrutura dos solos, e os aspectos teóricos dos processos hidrológicos que ocorrem no solo, com ênfase à infiltração da água na região não saturada do solo e métodos para análise do processo de infiltração. No capítulo 3 será apresentado o método proposto para a detecção e descrição da estrutura tridimensional da frente de molhamento no processo de infiltração usando imagens captadas usando a técnica não-invasiva da TC. No capítulo 4 serão apresentados os resultados para cada fase do método proposto, incluindo a validação de resultados e a proposta de descritores do movimento da água usando informação da estrutura tridimensional da frente de molhamento. O capítulo 5 apresentará as discussões e as propostas para trabalhos futuros. O capítulo 6 apresentará os trabalhos resultantes e finalmente as referencias bibliográficas consideradas no texto da dissertação.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O entendimento dos processos de transporte como o movimento da água no solo é um dos assuntos intensamente estudados na física do solo, principalmente devido à importância relacionada à disponibilidade de água para as plantas e ao transporte de solutos no solo. A análise na região não saturada e a formação do fluxo preferencial tem ganhado especial interesse nos últimos anos, devido aos efeitos que pode ter nos processos de percolação. Considera-se fluxo preferencial um caminho na estrutura do solo onde a velocidade vertical da água se incrementa e gera um rápido movimento da água, compostos químicos, micro-organismos, etc. Esses caminhos do fluxo são resultado da instabilidade do fluido, devido à densidade do fluido ou por causa da capilaridade na estrutura do solo e o efeito da gravidade.

Nesse capítulo são apresentados os aspectos físicos dos processos de transporte na região não saturada do solo, os métodos de visualização e os métodos atuais para a análise do fluxo preferencial baseado na variabilidade da estrutura da frente de molhamento.

### 2.1 Meios Porosos e a Ciência dos Solos

A estrutura do meio poroso, como o solo, rochas de reservatórios, ossos, etc. tem sido objeto de interesse para muitas pesquisas nas últimas décadas, a qual depende de aspectos morfológicos, relacionados com a forma e distribuição de tamanhos dos poros no meio, e aspectos topológicos, isto é a conectividade entre os poros, exemplos da sua importância em diferentes áreas são: processos industriais (USHIZIMA et al., 2011), engenharia petrolífera (ZELJKOVIC, 2011), ciência de solos (FELIPUSSI, 2008) e medicina (ZEBAZE et al., 2013).

Na área da Ciência do Solo, tem-se desenvolvido trabalhos com o objetivo da modelagem do meio para a simulação de propriedades físicas, fazendo uso de técnicas de processamento de imagens como, por exemplo: a segmentação, análise e a reconstrução tridimensional, surgindo diferentes abordagens e tornando possível quantificar variáveis físicas da estrutura do solo.

No trabalho proposto por Anselmeti e Luthi (ANSELMETTI, 1998), a análise digital de imagens de secções de rochas é apresentada em escala de macroporos e microporos (escala de milímetros e microns). As imagens são obtidas por meio de um microscópio eletrônico para a visualização de microporos e um microscópio óptico para macroporos. Entretanto, a aquisição das amostras é invasiva, ou seja, faz-se necessário fatiar o meio poroso para obter as secções e em seguida introduzir material de contraste entre a parte sólida e os vazios. Estes procedimentos influenciam na estrutura interna da parte sólida do meio, o qual faz a reconstrução tridimensional pouco confiável.

No trabalho proposto por Gosine e Zhao (GOSINE, 2000), a distribuição do tamanho dos poros é calculada a partir de secções 2D de amostras de rochas de reservatório. A aquisição das imagens é feita usando um microscópio eletrônico e são segmentadas por limiar, mas a conectividade 3D dos poros ou grãos não é analisada.

A abordagem proposta por Gantzer e Anderson (GANTZER, 2002), destaca-se pelo emprego de imagens de amostras de solos obtidas por meio do tomógrafo computadorizado e da extração de alguns aspectos geométricos, como área e perímetro dos poros. Por outro lado, a segmentação é realizada interativamente e a conectividade tridimensional dos poros não é considerada no desenvolvimento do método, mas é sugerida para melhor entendimento da estrutura do meio poroso (Figura 2.1).

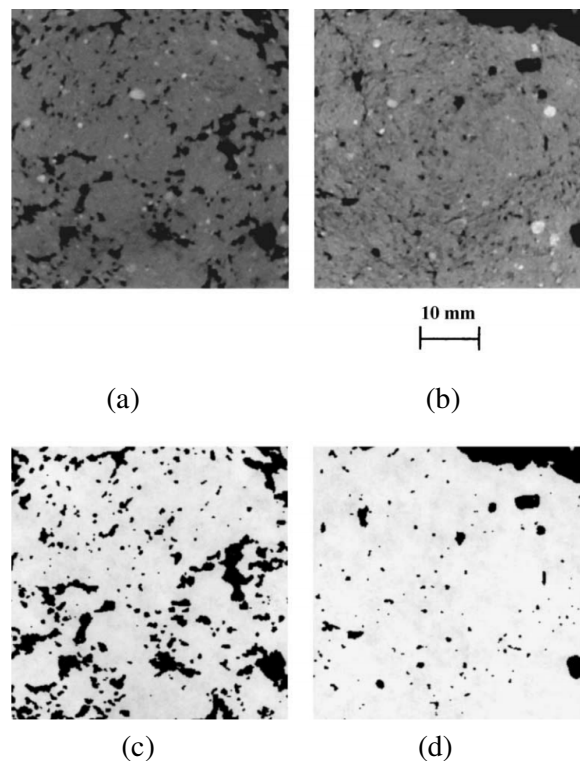


Figura 2.1: Imagens 2D em tons de cinza (a) e (b) e imagens binárias após segmentação (c) e (d) de amostras de solo (GANTZER, 2002).

Uma técnica que tem obtido uma boa repercussão, por ser não-invasiva no uso das amostras, é a tomografia computadorizada (NAIME, 2001). Esta técnica gera imagens de secções transversais de objetos através do princípio da atenuação da radiação ionizante nos meios materiais, resultado da construção de um Tomógrafo Computadorizado de raios X e  $\gamma$  de resolução milimétrica no Centro Nacional de Instrumentação da Embrapa em São Carlos-SP, o qual tem sido usado em amostras de solo seco para modelagem da sua estrutura no trabalho de Felipussi (FELIPUSSI et al., 2008), e compõe-se de quatro principais módulos. O primeiro é responsável pela segmentação das imagens tomográficas adquiridas usando um algoritmo adaptativo baseado em máximos e mínimos locais e no princípio Minimax, alguns resultados se apresentam na Figura 2.2 onde a primeira pilha de imagens mais a esquerda representa três fatias captadas a partir do tomógrafo, a segunda pilha de imagens apresenta o

resultado da segmentação em vermelho junto com a imagem original em tons de cinza, já a terceira pilha de imagens à direita são os resultados da segmentação mostrando a parte sólida e os vazios na amostra do solo. Com o segundo módulo conseguiu extrair propriedades morfológicas e geométricas a partir de imagens, tais como áreas e orientação dos poros e condutos, excentricidade, extração de informações e o cálculo da tortuosidade. Finalmente o quarto módulo aborda a análise estatística das informações geométricas e topológicas produzidas nas etapas anteriores. As correlações advindas destas informações permitiram entender o comportamento do meio poroso.

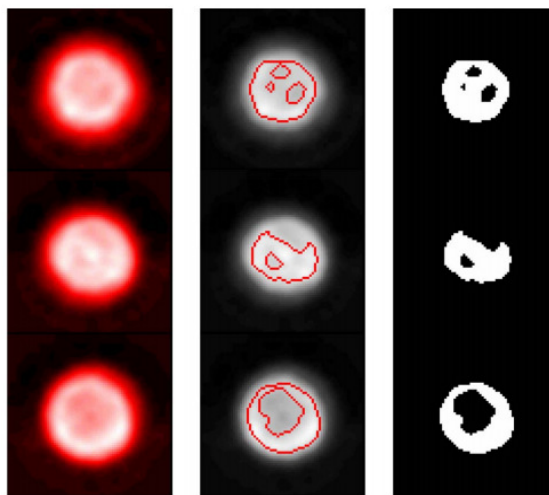


Figura 2.2: Segmentação de imagens de solo usando um algoritmo adaptativo proposto por Felipussi et al. (FELIPUSSI et al., 2008).

## 2.2 Importância do Estudo do Movimento da Água no Solo

Na sociedade atual existe em certa medida uma preocupação com a preservação e recuperação dos recursos hídricos porque a população mundial já é consciente que a água disponível para o consumo humano é um recurso limitado e há indicadores de escassez futura.

A contaminação da água através dos pesticidas pode ocorrer de duas maneiras: através do escoamento superficial para os rios e reservatórios hídricos, e através da percolação profunda no solo até atingir as águas subterrâneas. No caso da última, o conhecimento dos mecanismos de transporte de soluto na região não saturada do solo é de fundamental importância. Através deste conhecimento, pode-se melhorar a aplicação dos insumos agrícolas, dentre estes a água para irrigação, com a finalidade de minimizar os efeitos danosos aos reservatórios hídricos naturais.

O solo é uma mistura complexa de sólidos, líquidos e gases que provêm um sistema de suporte à vida de raízes das plantas e de micro-organismos. Quando um pesticida penetra no solo, uma parte estará ligada às partículas do solo, particularmente à matéria orgânica, através do processo denominado adsorção e outras partes irão dissolverem-se na água entre as partículas de solo. Enquanto a água penetra no solo, as moléculas de pesticidas absorvidas podem ser removidas das partículas de solo através do processo denominado dessorção. Isso devido à propriedade de maior influência no movimento de um pesticida com a água no solo: a solubilidade a qual é inversamente proporcional à sua capacidade de sorção ao solo (TRAUTMANN, 2000).

## 2.3 Movimento da Água Através do Solo

O fluxo de água através do solo pode acontecer em duas regiões, na região saturada e na região não saturada, como se pode ver na Figura 2.3.

Quando o solo é saturado, todos os poros são preenchidos com água e a parte úmida se torna contínua. O exemplo mais comum de região saturada é a área no solo correspondente a águas subterrâneas. Quando o solo é saturado, o fluxo de água nessa região pode ser descrita usando as equações da lei de Darcy, que para o caso do fluxo vertical 1D pode ser expressa como na Eq. 2.1.

$$j_{w,z} = -K_{s,z} \frac{\partial p}{\partial z}, \quad (2.1)$$

Onde  $j_w = (j_{w,x}, j_{w,y}, j_{w,z})$  é a representação volumétrica do passo do fluxo no solo [ $LT^{-1}$ ],  $K_{s,z}$  é a condutividade hidráulica [ $L^3T^{-1}$ ],  $p$  é a pressão aplicada [ $ML^{-1}T^{-2}$ ], e  $z$  é a distancia vertical [M]. Considerando que a condutividade hidráulica vai depender das propriedades do fluido e do solo.

A região não saturada, ou zona vadosa, é a parte da subsuperfície acima da região das águas subterrâneas. A diferença com a região saturada, os poros são parcialmente preenchidos com água (Figura 2.3). Nessa região do solo, acontecem importantes processos como a evaporação, interação do solo com as plantas, infiltração da água e o transporte de solutos, mas o transporte de compostos químicos e o fluxo da água na região não saturada do solo é um processo difícil de descrever quantitativamente, pois a condutividade hidráulica nessa região do solo depende da natureza heterogênea do solo e as mudanças que sofre quando acontece um fluxo de água.

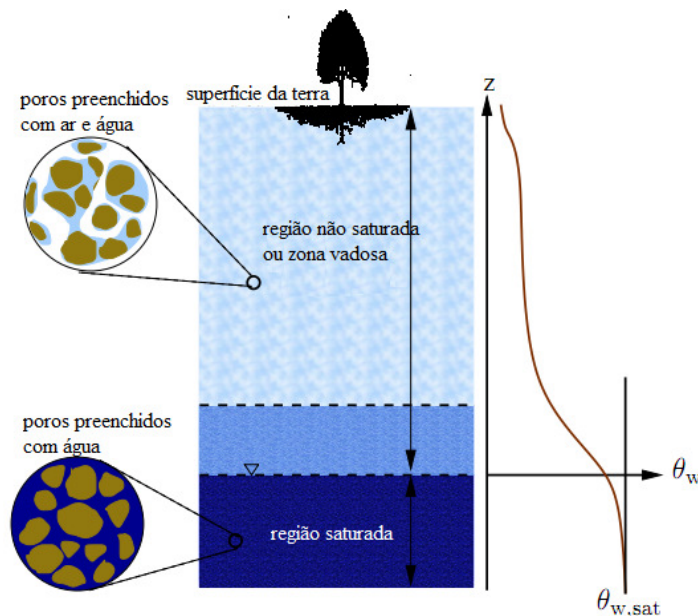


Figura 2.3: Regiões do solo, a região não saturada ou zona vadosa e a região saturada (PREFERENTIALFLOWWEBSITE).

Uma extensão da equação da lei de Darcy para generalizar e descrever o fluxo na região não saturada do solo, como expressado na Eq. 2.2, e é conhecida como a lei de Buckingham-Darcy.

$$j_w = -K(\theta_w) \nabla \psi_w, \quad (2.2)$$

Onde  $K(\theta_w)$  é a condutividade hidráulica na região não saturada do solo [ $M^{-1}L^3T$ ], a qual apresenta uma dependência não linear com o conteúdo da água  $\theta_w$ , diferente com a  $K_{s,z}$  na Eq. 2.1 que é constante.  $\nabla \psi_w$  é o potencial hidráulico [ $ML^{-1}T^{-2}$ ], definido como a soma do potencial mátrico e gravitacional.

Em escala macroscópica, a dinâmica do fluxo da água na região não saturada de um meio poroso é descrito pela equação de Richard (Eq. 2.3), que representa quantitativamente a combinação da lei de Darcy e a lei da conservação da massa.

$$\frac{\partial}{\partial t} \theta_w + \nabla \cdot j_w = 0, \quad (2.3)$$

## 2.4 Frente de Molhamento no Processo de Infiltração

O processo de infiltração é definido como a entrada de água num solo inicialmente não saturado, geralmente influenciado pelos gradientes de capilaridade e gravidade, gerando uma interface solo-água a qual é chamada de frente de molhamento, fazendo com que o conhecimento da estrutura da frente de molhamento seja muito importante para a predição da propagação da água através do solo.

Num perfil de solo uniforme, a distribuição da água com a profundidade, quando se mantém uma pequena carga hidráulica na superfície do solo, é como a mostrada, de maneira esquemática, na Figura 2.4. A zona de saturação, como o próprio nome diz, é uma zona em que se presume estar o solo saturado e o conteúdo de água ( $\theta$ ) é constante. A seguir, vem a zona de transição, que é uma região de rápido decréscimo do conteúdo de água. A zona de transmissão, que vem em seguida, é uma porção do perfil através da qual a água é transmitida com variações muito pequenas no conteúdo de água. Abaixo da zona de transmissão vem a zona de umedecimento, que é uma região de variação relativamente rápida de conteúdo de água.

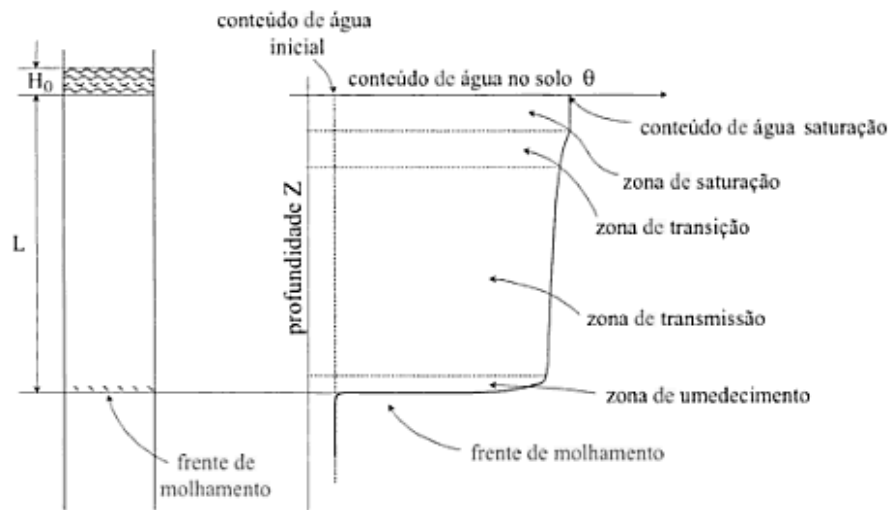


Figura 2.4: Perfil do conteúdo de água típico durante o processo de infiltração em um perfil de solo uniforme de acordo (LIBARDI, 2005).

Finalmente, a frente de molhamento compreende uma pequena região na qual o gradiente de conteúdo de água sofre uma variação bastante abrupta que representa o limite visível da penetração da água (LIBARDI, 2005).

## 2.5 Importância do Fluxo Preferencial

No processo de infiltração acontecem duas formas de transporte de fluidos através do meio (Figura 2.5):

- Fluxo preferencial refere-se ao movimento irregular e frequentemente rápido da água e os solutos através de meios porosos, tipicamente o solo, caracterizado por regiões que realçam o fluxo, tal como pequenas frações do meio (buracos feitos por vermes, raízes de plantas, etc.).
- Fluxo de matriz, o qual é um movimento relativamente lento passando pela maioria dos poros, obedecendo à teoria da convecção-dispersão que assume que a água segue um caminho de fluxo médio através do solo.

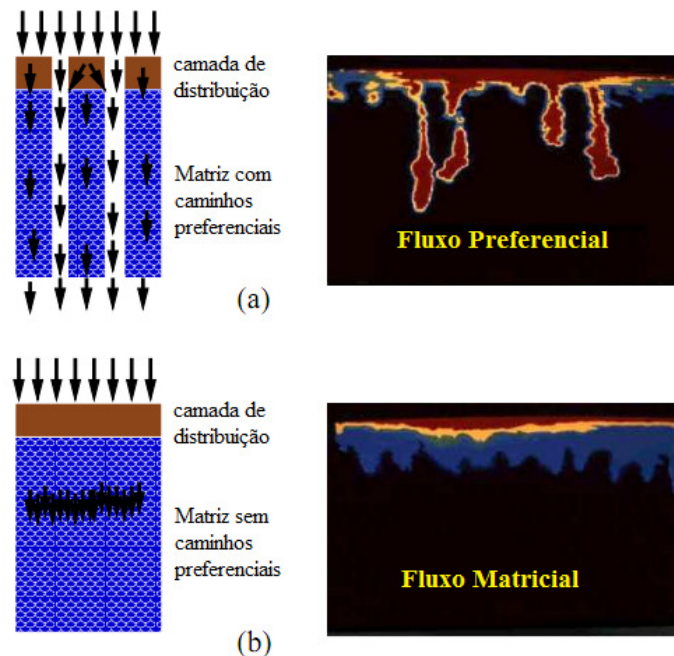


Figura 2.5: Formas de transporte de água e solutos no processo de infiltração: (a) A frente de molhamento avança na matriz através de caminhos do fluxo preferencial, (b) avanço sem caminhos do fluxo preferencial (PREFERENTIALFLOWWEBSITE).

Devido ao seu rápido movimento, o fluxo preferencial permite o passo muito mais rápido de contaminantes e cria consequências significativas para a qualidade da água subterrânea e tem impactos diretos sobre a água potável e a saúde humana, animal, gestão de resíduos, gestão de nutrientes e pesticidas, e gestão de bacias hidrográficas. No setor de mineração, o fenômeno do fluxo preferencial tem sido usado no tratamento de rejeitos deixados por operações de mineração, com a inclusão de material para



limpeza em lugares estratégicos onde o fluxo preferencial é dirigido para que a toxicidade possa ser bastante reduzida (PREFERENTIALFLOWWEBSITE).

O fluxo preferencial ocorre por três mecanismos possíveis (Figure 2.6):

- *Macropore Flow*, através de grandes espaços vazios e contínuos resultado de uma variedade de fatores que formam o solo tais como rachaduras ou canais no interior do solo.
- *Funnel Flow*, através da subsuperfície em interfaces de camadas de textura mais grossa de forma inclinada, gerando uma acumulação lateral do fluxo.
- *Fingering Flow*, devido a instabilidades na frente de molhamento levando a água através de um número de canais, também denominados dedos ou fingers.

Todos esses termos referem-se ao fato de que a água tende a fluir por uma parte reduzida do volume do solo, como demonstrado por (BOWMAN et al., 1994) que 80% da percolação de água passa através do 20% da área da seção transversal do perfil do solo.

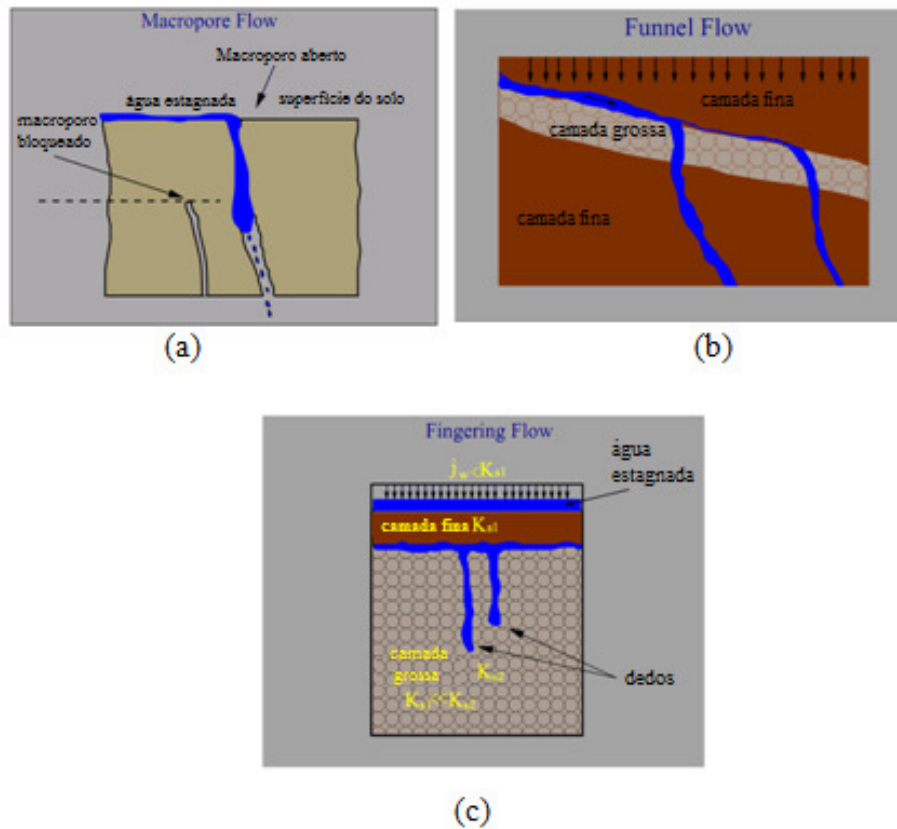


Figura 2.6: Tipos de fluxo preferencial: (a) Macropore Flow, (b) Funnel Flow, (c) Finger Flow (PREFERENTIALFLOWWEBSITE).

## 2.6 Métodos para Análise do Processo de Infiltração

Atualmente existem muitos avanços tecnológicos baseados em processamento de informação 3D, em áreas tal como medicina, engenharia e entretenimento. Recentemente tem incrementado o interesse no desenvolvimento de métodos de instrumentação para o estudo e análise de meios porosos e os processos de transporte que neles ocorrem.

Em áreas como a Ciência do Solo, Agricultura e Ecologia, o benefício é direto, pois métodos não-invasivos permitem entender os processos relacionados e portanto melhorar a utilização do solo e a água, como também a utilização e preservação do meio ambiente de impactos negativos nas práticas no manejo do solo. Por esses motivos, estudos no processo de infiltração tem recebido especial interesse, em especial a necessidade de estimar parâmetros físicos e hídricos que oferece informação para o controle da irrigação e dispersão de poluentes.

A análise da frente de molhamento foi pouco abordada e desafortunadamente existem poucos métodos não-invasivos que realmente utilizam informação 3D no processamento para a análise e modelagem dos processos de transporte em meios porosos. Esses métodos são importantes porque permitem medir o conteúdo do fluido e visualização do fluxo em meios porosos, e no melhor dos casos a dinâmica do fenômeno em tempo real.

A seguir descrevem-se os métodos convencionais utilizados na ciência do solo e os métodos não-invasivos aplicados na análise da frente de molhamento.

### 2.6.1 Métodos Convencionais

Pesquisas em hidrologia e física do solo tem prestado importante atenção na distribuição da água no solo devido a processos de infiltração, porque esse processo determina a quantidade de água que ficará a disponibilidade para o uso das plantas quando percorre ate águas subterrâneas, etc.

Os métodos convencionais incluem a utilização de sensores no solo (GUTIÉRREZ-GNECHI et al., 2011; SKINNER et al., 2011), o qual produz a destruição da estrutura natural do meio, outras aproximações fazem experimentos de campo, com medições apenas na superfície do solo para medir o avanço da frente de molhamento. Como no trabalho de Souza (SOUZA, 2011), detalha-se o avanço da frente de molhamento em função do tempo em intervalos de 5 minutos até ocorrer equilíbrio dinâmico para a estimação de parâmetros físicos e hídricos relacionados com o avanço da frente de molhamento. Com os pares de valores do avanço da frente de molhamento e de tempo determinou-se a declividade da respectiva reta de regressão para as três vazões testadas no trabalho, usando os valores dos parâmetros do solo, a curva característica de retenção de água no solo e a função da condutividade hidráulica em função do conteúdo de água do solo foram estimadas e representadas graficamente.

Na Figura 2.7, mostra parte do procedimento utilizado, onde o uso de um sistema multi-gotejador permitiu aplicar água na superfície do solo, com vazão constante conhecida, de forma simultânea nos diferentes pontos de aplicação. A área saturada, de formato circular e em equilíbrio dinâmico, formada sobre o solo, pode ser determinado através do seu diâmetro médio. Para isso, junto a cada gotejador foram utilizadas duas régua graduadas dispostas em forma de cruz, usando-se os valores dos quatro raios da área saturada para obter o diâmetro médio. Com auxílio de um cronômetro, iniciou-se a

irrigação e, em intervalos de 5 minutos, mediu-se a distância do ponto de fornecimento de água até a borda da área saturada para todas as vazões simultaneamente até ocorrer o equilíbrio dinâmico, sendo este caracterizado quando os aumentos dos valores do raio da frente de molhamento no intervalo de 5 minutos se tornarem quase nulos. Sendo essa análise na superfície do solo e não conta com informação da profundidade no avanço da frente de molhamento.



Figura 2.7: Detalhe do avanço da frente de molhamento em função do tempo (SOUZA, 2011).

### 2.6.2 Métodos Não-Invasivos

A variabilidade espacial e temporal do fluxo de água no solo causa uma grande dificuldade na hora de quantificar variáveis relacionadas ao movimento da água sem ter que destruir parte da estrutura da amostra como descrito na seção anterior com os métodos convencionais.

Nas últimas décadas as pesquisas relacionadas à ciência do solo tem estudado o ambiente hidrológico com amostras do solo usando técnicas não-invasivas para realizar as estimativas de variáveis físicas e hídricas. A seguir apresenta-se os métodos utilizados na captação e visualização de imagens para análise quantitativa dos processos de transporte em meios porosos e frequentemente em solos.

A seguir se descreve as principais técnicas não-invasivas e os trabalhos que tem objetivos relacionados com o problema em análise:

- *Ressonância Magnética (RM):*

Usada no estado da arte no estudo de fluidos em meios porosos. Oferecendo informação da distribuição da água, o valor de cada *voxel* na reconstrução da imagem é diretamente proporcional às propriedades magnéticas dos prótons da água em cada localização dos *voxels*. Essa técnica pode gerar imagens 2D e 3D para obter informação do fluxo em resolução espacial. Usando esse método nem sempre é possível quantificar medidas do processo de infiltração, devido aos baixos níveis de saturação (VOTRUBOVÁ et al., 2000).

- *Tomografia Computadorizada de Raios X (TCX):*

Permite uma acurada e rápida medição do conteúdo do fluido, embora seja limitado a medir pequenas áreas na escala de milímetros quadrados do campo do fluxo no tempo. (BAYER et al., 2004). A técnica está baseada na atenuação de íons de raios X. Os padrões de atenuação do feixe registram uma imagem bidimensional (2D) tal como se faz na área médica, mas também serve para gerar uma imagem 3D ou um conjunto de imagens de uma amostra. Pesquisas apontam que para amostras de colunas de solo com diâmetros maiores de 20 cm, o ruído próprio da instrumentação na captação da imagem é muito maior e não é possível realizar a análise correspondente nessas condições (DICARLO, 1997).

Um método alternativo é proposto no trabalho de Naime (NAIME, 2001), onde utiliza a TCX para obtenção de imagens em tempos diferentes no avanço do processo de infiltração, conseguindo medir a umidade ( $\theta$ ) durante o fluxo não-saturado e, através da solução numérica da equação de Richards e do modelo de Rossi-Nimmo, obtiveram-se a curva de retenção, a sortividade,  $k(\theta)$  e a difusividade  $D(\theta)$ . Seus resultados demonstraram uma boa correlação do método proposto com o método tradicional de medida da curva de retenção. Mas não aborda o tema da análise da frente de molhamento.

- *Tomografia Computadorizada de Nêutrons (TCN)*

É uma técnica não destrutiva que gera imagens em tempo real e é usada para quantificar o fenômeno hidrológico em frames de vídeo, tem grande sensibilidade às variações de conteúdo de água. As medidas do conteúdo de água podem ser feitas calculando a mudança de intensidade de um feixe de nêutrons que passa através da câmara de experimentos (JASTI, 1992; DEINERT et al., 2004; MENON et al., 2006). Essa técnica trabalha bem quando a substância em estudo contém hidrogênio ou outro elemento com boas propriedades de atenuação de nêutrons. No trabalho de Deinert é feita em parte a análise da frente de molhamento, mas numa aproximação 2D dos quadros do vídeo (Figura 2.8).

- *Transmissão de Luz (TL):*

Essa técnica é a única que não utiliza radiação e é a melhor para medir rápida e acuradamente o fluxo de água na escala do tempo. Algumas vantagens da TL são que a não utiliza radiação e permite visualizar as mudanças de conteúdo do fluido no fluxo com uma resolução temporal de dez segundos (DARNAULT, 2001; MORTENSEN et al., 2001).

As desvantagens dos métodos RM, TCX, é que não podem medir o fenômeno de transporte de fluido em uma alta resolução temporal, além disso, envolve o risco da radiação. Esse problema é superado pelos métodos TCN e TL, mas que não tem a capacidade para visualização e processamento da estrutura 3D.

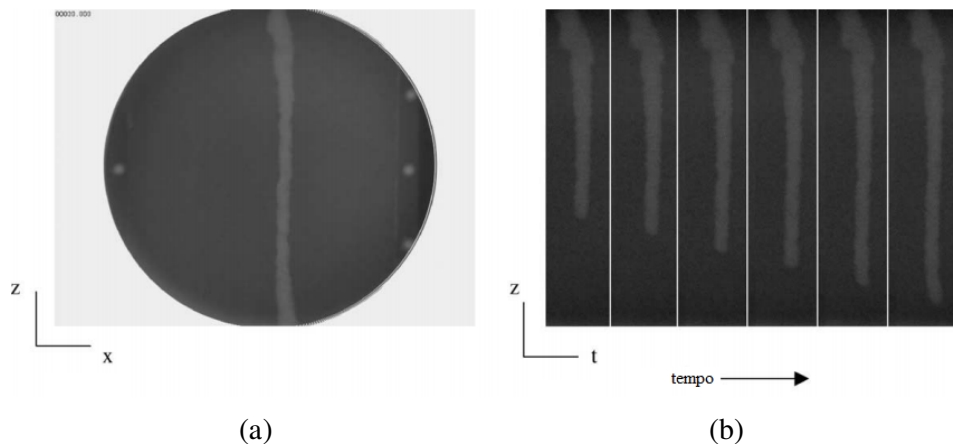


Figura 2.8: Perfis de fluxo captados usando o método TCN (a) Imagens do processo de infiltração com 20.0 ml/min. (b) Imagens captadas no tempo no processo de infiltração com 10.0 ml/min, o tempo incrementa em intervalo de 1s da esquerda para a direita. (DEINERT et al., 2004).

Nesse trabalho utiliza-se o método proposto por Naime (Naime, 2001) para a obtenção das imagens, uma vez que o tomógrafo apresentado é um dispositivo portátil para estudos de campo e laboratório, de baixo custo, específico para estudos de solos e tem boa correlação na medição do conteúdo de água em comparação com métodos convencionais. Logo o presente trabalho representa uma extensão da proposta de Naime, pois não foca-se na estimação de parâmetros físicos, e sim na proposta de algoritmos para a detecção da frente de molhamento e a sua aplicabilidade na descrição do movimento da água na região não saturada do solo, usando informação no espaço 3D para entender o comportamento da água no solo com um tipo de tratamento em particular, tema que tem apresentado escasso desenvolvimento no estado da arte.

### 3 METODOLOGIA DO TRABALHO

Nesse trabalho, é proposta uma nova abordagem para a descrição do movimento da água no solo, usando informação da estrutura tridimensional da frente de molhamento. Esse método tem duas partes, a primeira é a detecção da frente de molhamento e a segunda é a descrição da estrutura usando informação 3D.

Nas seguintes secções serão apresentados os conceitos do processamento de imagens envolvidos no desenvolvimento do método proposto mostrado a maneira geral na Figura 3.1.

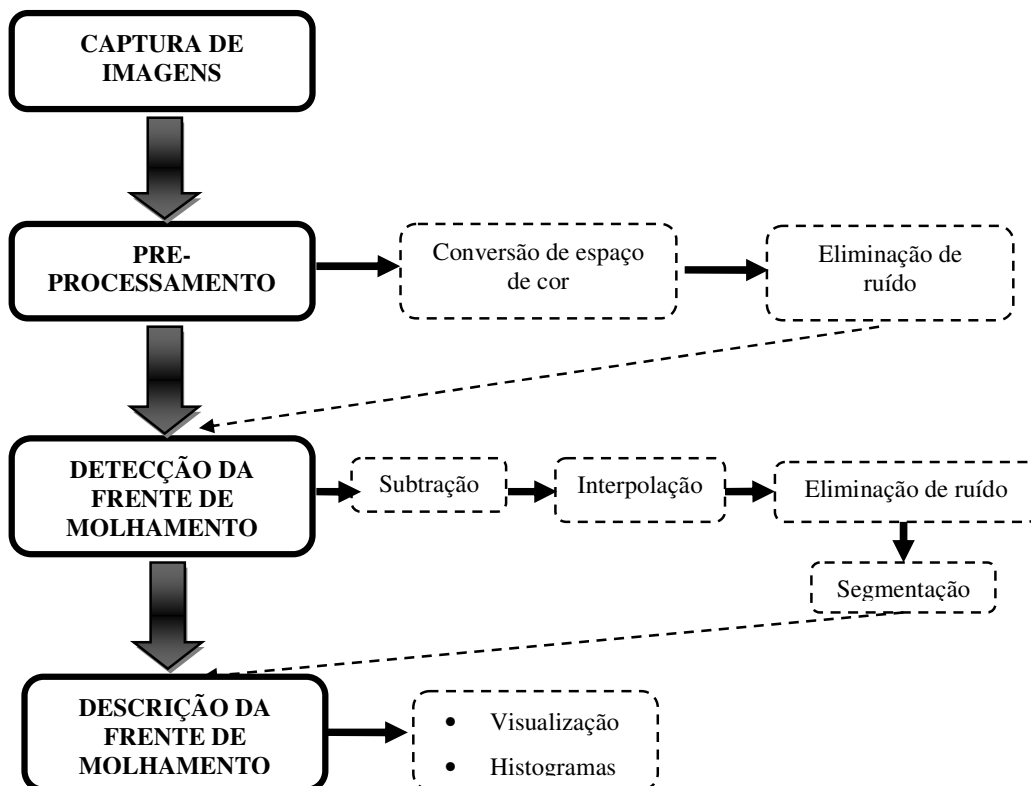


Figura 3.1: Esquema geral do método proposto para descrição da frente de molhamento.

### 3.1 Captura de Imagens

As imagens utilizadas nos experimentos foram obtidas usando a técnica não-invasiva da TCX, desenvolvida no trabalho de Naime (NAIME, 2001). O tomógrafo desenvolvido é portátil, com sistema de varredura de terceira geração, de campo e de laboratório, tem a configuração apresentada no diagrama da Figura 3.2.

O tomógrafo é composto de um computador pessoal (PC) portátil, mecanismo de posicionamento, detector constituído de 2 arranjos de fotodiodos (PDA *photodiode array*) com especificações apresentadas na Tabela 3.1 recobertos com cintilador e sistema eletrônico para controle da varredura, aquisição e tratamento dos dados. Um microcomputador padrão PC/104 gerencia o sistema eletrônico constituído de sistema de seleção de PDAs, conversor A/D, circuitos de comando dos motores de passo e circuito multiplex dos sinais da interface paralela do PC/104.

O comprimento da área ativa do PDA é igual à largura da placa de circuito impresso onde ele está montado. Dispondo uma placa ao lado da outra, elas compõem um arranjo de 256 detectores com 102,4mm de comprimento.

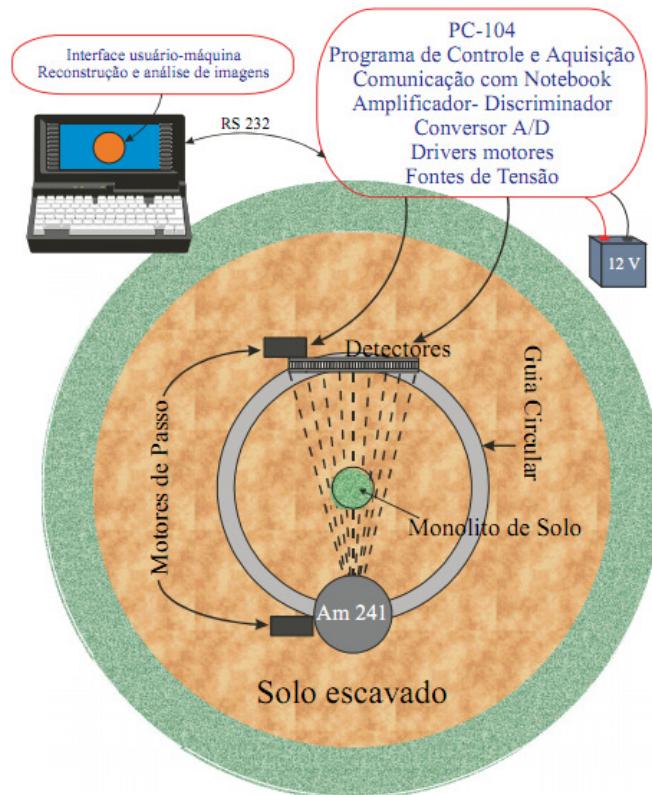


Figura 3.2: Esquema do tomógrafo portátil, com sistema de varredura de 3ra geração, instalado em torno de um monólito de solo. (NAIME, 2001).

Tabela 3.1: Especificações mecânicas dos PDAs.

Parâmetros	S6493-128G
Número de fotodiodos	128
Passo entre fotodiodos (P)	0.4mm
Largura de difusão dos fotodiodos (W)	0.25mm
Altura do fotodiodo (H)	0.4mm
Comprimento da área ativa	51.2mm

Fonte: Naime, 2001. p. 59.

A Figura 3.3 mostra a reta de calibração do tomógrafo que relaciona o coeficiente de atenuação linear  $\mu$  [ $cm^{-1}$ ] com as unidades tomográficas (UT) calculadas pelo programa de reconstrução de imagem. Foram realizadas tomografias com amostras homogêneas de água, solo, teflon, PVC (*Polyvinyl chloride*) e alumínio. As unidades tomográficas foram obtidas calculando-se a média dos valores de cada célula que compõe a área da imagem da amostra.

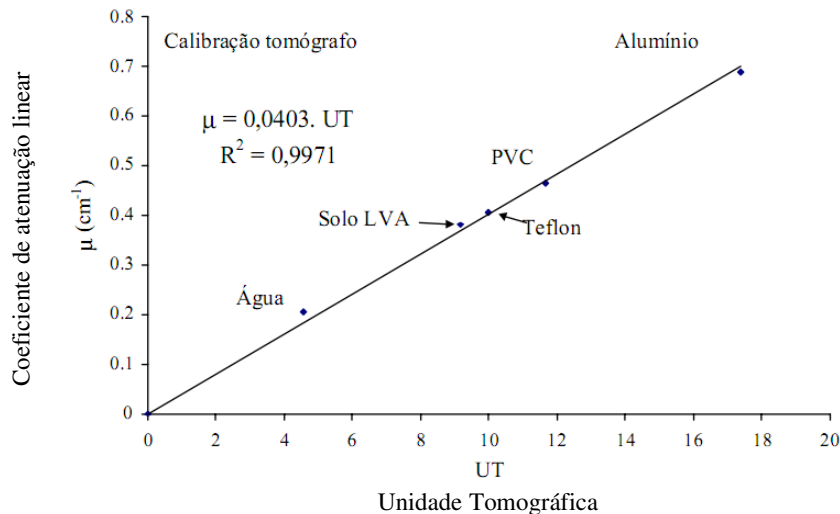


Figura 3.3: Reta de calibração do tomógrafo, equação da reta e coeficiente de determinação ( $R^2$ ). (NAIME, 2001).

A boa correlação ( $R=0,98$ ) da curva de calibração e o erro médio quadrático RMSE (*Root Mean Square Error*) igual a  $0,019 m^3 \cdot m^{-3}$  demonstram que o método é plenamente viável para medidas de umidade a comparação com outras modernas técnicas, como TDR (*Time Domain Reflectometry*) e GPR (*Ground Penetrating Radar*).

A importante utilidade do tomógrafo é obter amostras de uma coluna de solo representadas como imagens 3D (conjunto de imagens bidimensionais ou secções de imagem) ao longo do tempo, assim para cada amostra do solo, tem-se o conjunto de



secções do solo seco, e 4 conjuntos de secções do solo em processo de infiltração nos tempos  $t_i$  com  $i=1:4$ .

Para cada amostra num processo de varredura é gerado um conjunto de 31 secções obtendo como saída após a reconstrução da imagem, arquivos com uma resolução de 71x71 pixels, no formato de imagens *bitmap* e no espaço de cor RGB (*Red, Blue and Green*).

### 3.2 Pré-processamento

Os dados obtidos a partir do tomógrafo descrito na secção anterior é um conjunto de imagens bidimensionais ou secções espaçadas na amostra, esse conjunto é considerado como uma imagem 3D que representa uma coluna do solo num tempo  $t_i$  no processo de infiltração.

No início, os conjuntos de secções bidimensionais (imagens) são convertidos do espaço de cor RGB para o espaço HSI (*Hue, Saturation and Intensity*), pois o espaço HSI tem a vantagem de representar a cor da mesma maneira que o humano a percebe e interpreta. A relação entre esses dois espaços é mostrada nas Equações 3.1, 3,2 e 3.3 (GONZALEZ and WOODS, 2002):

$$H = \cos^{-1} \left\{ \frac{\frac{1}{2}[(R-G) + (R-B)]}{\left[ \frac{1}{2}[(R-G)^2 + (R-B)(G-B)] \right]^{\frac{1}{2}}} \right\}, \quad (3.1)$$

$$S = 1 - \frac{3}{(R+G+B)} [\min(R, G, B)], \quad (3.2)$$

$$I = \frac{1}{3}(R+G+B), \quad (3.3)$$

Onde  $H$  é o matiz (*Hue*),  $S$  é a saturação (*Saturation*) e  $I$  é a intensidade (*Intensity*); e  $R$ ,  $B$  e  $G$  são os canais vermelho (*red*), azul (*blue*) e verde (*green*) respectivamente.

Como a intensidade da imagem representa a densidade do conteúdo de água, apenas trabalha-se com o canal  $I$  do espaço HSI, ou seja, a matriz que representa a imagem para análise vai ser formada pela média dos valores dos canais da imagem original. Assim a imagem  $I$  vai ter a intensidade em cada *voxel* e uma alta intensidade representa um alto nível de saturação de água.

Um método para minimizar o ruído e artefatos proveniente da captura e reconstrução da imagem (Apêndice B) é aplicado. Esse método é chamado de *Quadric-Regressed Bilateral Space-Scale* (WONG et al., 2009), o qual faz uma decomposição da imagem, mas nesse estágio do pré-processamento utiliza-se apenas a imagem da primeira escala da decomposição, pois ainda preserva os detalhes e não é muito suavizada como em escalas posteriores.

### 3.2.1 Minimização de Ruído em Imagens 3D (3DQRBSS)

A presença de ruído e artefatos em imagens de TC, devido à instrumentação utilizada (Apêndice B), podem reduzir grandemente a acurácia no processo de segmentação das regiões de umidade. Portanto para minimizar o efeito do ruído, uma estratégia baseada no *Quadric-Regressed Bilateral Scale-Space* (WONG et al., 2009) é proposta para fazer a decomposição das imagens de solo e minimizar os problemas com o ruído gerado na captação e reconstrução das imagens tomográficas.

Dado uma imagem 3D representada por  $I$ , a representação bilateral espaço-escala (quer dizer que utiliza informação do domínio espacial e da faixa de valores de intensidade)  $I_{denoised}^j$  pode ser definido como nas Eqs. 3.4, 3.5 e 3.6 considerando ( $\underline{x} = (x, y, z)$ ):

$$I_{denoised\_1}^i(\underline{x}) = \frac{\sum_W \omega_p(\underline{x}, W) \omega_s(\underline{x}, W) I_{denoised\_1}^{j-1}(\underline{x})}{\sum_W \omega_p(\underline{x}, W) \omega_s(\underline{x}, W)}, \quad (3.4)$$

$$\omega_p(\underline{x}, W) = \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\|I_{denoised\_1}^{j-1}(\underline{x}) - I_{denoised\_1}^{j-1}(W)\|}{\sigma_p} \right)^2 \right], \quad (3.5)$$

$$\omega_s(\underline{x}, W) = \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\|\underline{x} - W\|}{\sigma_s} \right)^2 \right], \quad (3.6)$$

Onde  $\sigma_p$  e  $\sigma_s$  são os desvio padrão (escala) para a definição dos filtros gaussianos da distancia fotométrica (diferencia entre as intensidades) e euclidiana (diferencia entre as localizações) respectivamente.

Depois da decomposição bilateral espaço-escala, cada *voxel* em  $I_{denoised\_1}^j$  é reestimado via regressão baseada em modelos, com uma janela local  $W$  usando num modelo quádrico  $I_{denoised}^j(x, y) = p_1 x^2 + p_2 y^2 + p_3 xy + p_4 x + p_5 y + p_6$ , onde os parâmetros quádricos  $p_k = 1, \dots, 6$  são obtidos por aproximação de mínimos quadrados com os dados na janela  $W$  com tamanho no intervalo [3 5].

Na Figura 3.4 mostra-se um exemplo da decomposição da imagem usando o método 3DQRBSS. Onde (a) é a imagem original e (b) a imagem com ruído gaussiano de média 0 e desvio 0.01. Após a decomposição bilateral se obtém em (c) a primeira escala menos suavizada e preserva detalhes porem com ruído, em (d) a terceira escala e finalmente em (e) a quinta escala mais suavizada com minimimo ruído aparente e menor quantidade de detalhes.

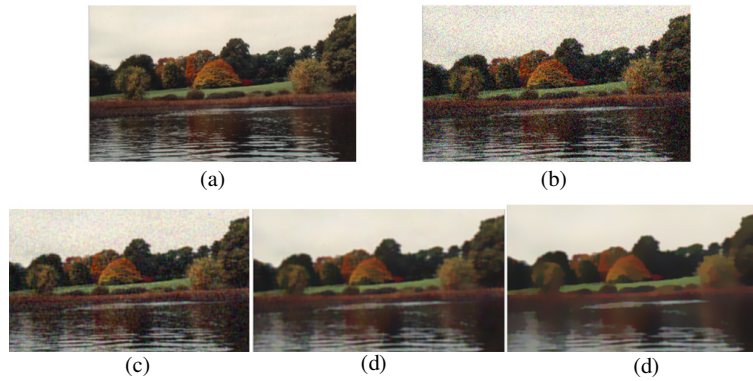


Figura 3.4: Exemplo da decomposição da imagem usando o método 3DQRBSS. (a) imagem original. (b) Imagem com ruído gaussiano. (c) Primeira escala. (d) Terceira escala. (e) Quinta escala.

### 3.3 Algoritmo para a Detecção da Frente de Molhamento

De forma geral, o algoritmo usado para a detecção da frente de molhamento encontra-se representado na Figura 3.5, após a subtração e interpolação das imagens, realiza-se uma decomposição multi-escala das imagens de solo usando o algoritmo 3D Quadric-Regressed Bilateral Scale-Space (3DQRBSS) o qual tem a finalidade de eliminar ruído próprio das imagens tomográficas no processo de captação. A seguir utiliza-se um algoritmo de segmentação de imagens 3D (3DSRM) baseado em uma versão modificada do algoritmo Stochastic Region Merging (WONG et al., 2011). Finalmente é realizado um passo de refinamento sobre o resultado da segmentação com o método de limiarização Multi-Otsu Thresholding (PING-SUNG, 2001) e adicionamos o pós-processamento do resultado da segmentação para obter a estrutura 3D da frente de molhamento.

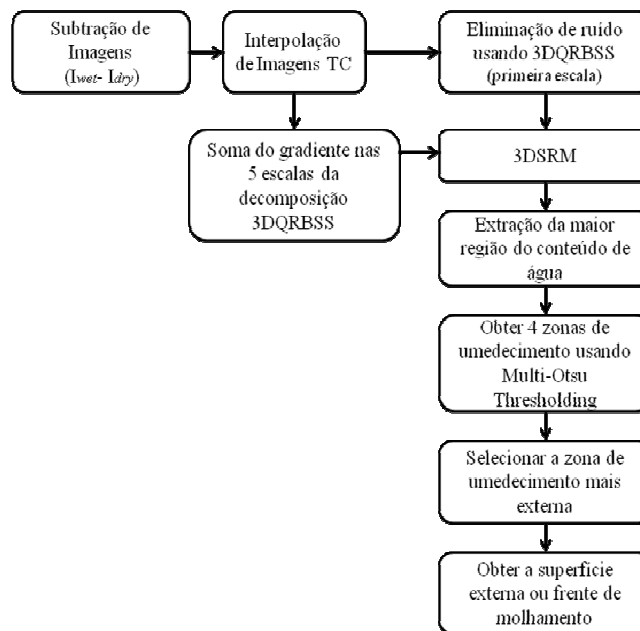


Figura 3.5: Diagrama do método proposto para detecção da frente de molhamento (VÁSQUEZ et al., 2013).

### 3.3.1 Segmentação de Imagens 3D

O método usado para segmentar as regiões de umidade nas imagens de TC é uma extensão do *Stochastic Region Merging* proposto em (WONG et al., 2011), o método proposto preserva informação dos secções bidimensionais ao longo do eixo  $z$  mantendo a continuidade na topologia da amostra após a segmentação.

No método consideram-se regiões os conjuntos de *voxels* com propriedades homogêneas, e de crescimento iterativo por meio da união de pequenas regiões ou *voxels* usando uma condição estocástica para decidir se as regiões devem ou não ser fusionadas.

Assume-se para os *voxels* uma 6-conectividade, e utiliza-se um grafo onde inicialmente cada *voxel*  $v(x, y, z)$  é um nodo e seus 6 vizinhos adjacentes são unidos a  $v(x, y, z)$  por uma aresta. Os pesos das arestas são as diferenças das intensidades nos *voxels*. Inicialmente assume-se que cada *voxel* é uma região, e a condição para verificar se duas regiões podem-se unir está baseado no predicado  $\alpha$  como expressado na Eq. 3.7:

$$\alpha(R_a, R_b) = \exp\left[-\frac{(E[R_a] - E[R_b])^2}{\Lambda(R_a, R_b)}\right], \quad (3.7)$$

Onde  $E[\cdot]$  é o valor esperado dos elementos (*voxels*) na região ( $a$  ou  $b$ ) definido como a média das suas intensidades, e  $\Lambda$  é uma função de penalidade estatística de união de regiões definido como na Eq. 3.8:

$$\Lambda(R_a, R_b) = \frac{D_I^2}{2Q} \left[ \frac{\ln(\Phi(I)^2)}{\Phi(R_a)} + \frac{\ln(\Phi(I)^2)}{\Phi(R_b)} \right], \quad (3.8)$$

Onde  $\Phi(\cdot)$  representa o número de *voxels* do objeto em questão que pode ser a imagem  $I$  ou as regiões  $R_a$  ou  $R_b$ ,  $D_I$  é a faixa dinâmica de valores dos tons de cinza da imagem  $I$ , por exemplo  $[0 \ 255]$  ou  $[0 \ 512]$  e  $Q$  é um termo de regularização para controle do resultado da segmentação. A versão original do algoritmo sugere a utilização do valor para o parâmetro  $Q$ , na faixa de valores de  $[20 \ 200]$ , se  $Q$  tem um valor baixo, o processo apresenta maior probabilidade de união de regiões, caso contrario se o valor de  $Q$  aumenta então a probabilidade de união entre as regiões é menor gerando sobresegmentação.

Esse método usa uma estratégia multi-passo que iterativamente refina o resultado da segmentação, classificando cada *voxel* para uma única região. As regiões segmentadas são subsequentemente fusionadas com outras regiões de uma maneira estocástica, para produzir o resultado final da segmentação. A diferença local entre regiões adjacentes, ou seja, os valores dos pesos das arestas no grafo, é calculado usando o operador da Derivada de Gaussiana DoG (*Derivated of Gaussian*) com escala  $\sigma_{sm} = 2$ , nas direções  $x, y$  e  $z$ . Nos experimentos usa-se o parâmetro de regularização  $Q = 100$ , a faixa de tons de cinza  $D = 256$  e o número de iterações igual a 3.

Na Figura 3.6 mostra-se um exemplo da segmentação por união de regiões. Onde (a) representa a inicialização dos voxels com uma marca para cada região, (b) é uma iteração intermediária e finalmente (c) é uma iteração mais avançada com regiões maiores representando estruturas de interesse.

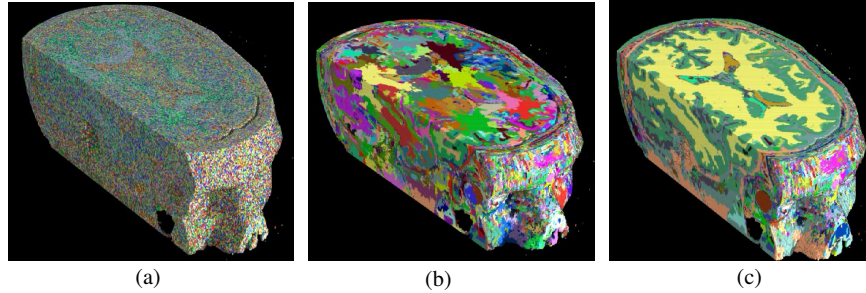


Figura 3.6: Exemplo da segmentação por união de regiões. (a) Inicialização das regiões. (b) Iteração intermediária. (c) Iteração mais avançada.

### 3.3.2 Detecção da Frente de Molhamento

Mais detalhadamente, logo após os passos prévios na etapa de pré-processamento, uma operação de subtração de imagens (GONZALEZ and WOODS, 2002) *voxel a voxel* nas suas correspondentes localizações é realizada entre o conjunto de secções do solo úmido no tempo  $t_i (I_{wet}^i)$  e o solo seco  $I_{dry}$  e logo se aplica uma normalização dos tons de cinza para obter uma imagem com tons de cinza na faixa de valores  $[0, 255]$ , com isso conseguiu-se obter o conteúdo de umidade na amostra do solo no tempo  $t_i$ . Dessa forma obtêm-se as imagens de umidade da sequencia completa de varreduras  $I_{moisture}^i$  nos tempos  $t_i, i=[1,4]$ .

Para ter as imagens regularmente espaçadas (1mmx1mmx1mm), utiliza-se o algoritmo de interpolação Trilinear das secções adjacentes, com a finalidade de obter imagens 3D interpoladas  $I_{interp}^i$  com resolução de  $71x71x375$ , devido às especificações dos fotodiodos e a distância entre eles, de modo que os valores dos *voxels* intermediários  $(x, y, z)$  são linearmente estimados usando a interpolação trilinear.

A seguir, as imagens interpoladas 3D ( $I_{interp}^i$ ) são processadas usando o algoritmo Quadric-Regressed Bilateral Space-Scale o qual é apresentado na seção 3.2.1, para eliminação de ruído  $I_{denoised}^{ij}$  e obter a representação da imagem em 5 escalas  $\sigma_j, j=[1,5]$ .

A segmentação inicial das zonas úmidas esta baseada na versão modificada do método Stochastic Region Merging (WONG et al., 2011), que trabalha com imagens 3D (*voxels* contem um tom de cinza). Nos experimentos somente trabalha-se com a imagem resultado do processo de eliminação de ruído na primeira escala  $\sigma_1$  como entrada do método de segmentação. Nesse passo da segmentação,  $I_{denoised}^{ij}$  com  $j=1:5$  serve como entrada para calcular as diferenças locais nas direções  $x, y$  e  $z$  como apresentado na seção 3.3.1; para adicionar informação das bordas presentes em todas as escalas que tem diferentes níveis de suavizamento.

Então a frente de molhamento é detectada baseada no resultado da segmentação 3D ( $I_{srm}^i$ ) e aplicando o método de limiarização Multi-Otsu Thresholding (PING-SUNG, 2001) com um passo de refinamento baseado em morfologia matemática.

A maior região de umidade da imagem segmentada  $I_{srm}^i$  é extraída e eliminamos pequenas regiões desconectadas. Depois a maior região é dividida em 4 regiões usando Multi-Otsu thresholding que representam as 4 zonas que ocorrem num processo de infiltração, de acordo com Bodman e Coleman como mencionado na revisão bibliográfica seção 2.4 e mostrado na Figura 3.7 para os dados do solo utilizados nesse trabalho.

A frente de molhamento é o limite da região mais externa das 4 zonas resultado do Multi-Otsu thresholding  $I_{m-otsu}^i$ . A frente de molhamento  $I_{WettingFront}^i$  é detectada na zona de umedecimento que apresenta o menor tom de cinza no  $I_{m-otsu}^i$ , então por subtração da região de umedecimento e a sua dilatação como detalhado nas Eq. 3.9 e 3.10:

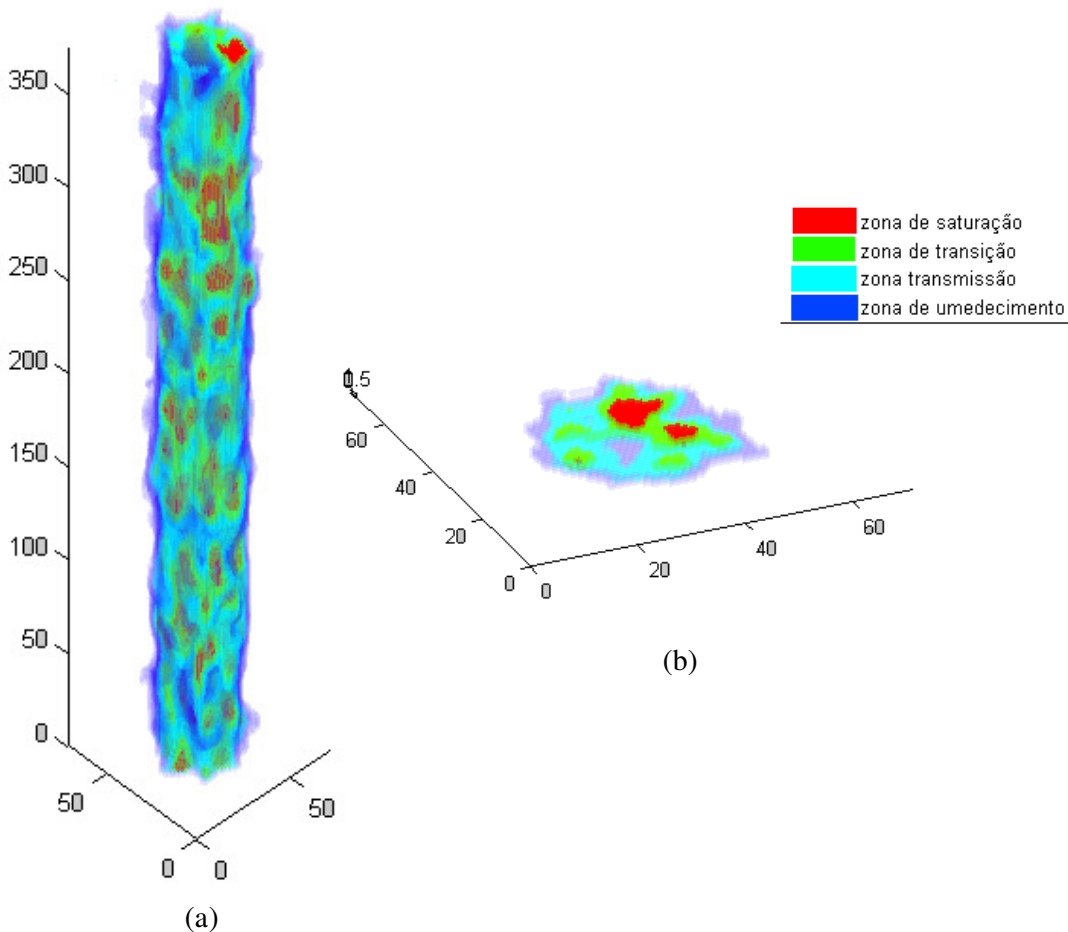


Figura 3.7: Zonas de umidade geradas usando o método Multi-Otsu Thresholding. (a) Visualização 3D da amostra completa. (b) Visualização de um slice da amostra.

$$I_{wetzzone}^i = \begin{cases} 1, & I_{m-otsu}^i(x, y, z) = \min(I_{m-otsu}^i) \\ 0, & otherwise \end{cases}, \quad (3.9)$$

$$I_{WettingFront}^i = \{v(x, y, z) \in (I_{WettingSuf}^i - I_{m-otsu-B}^i) / v(x, y, z) > 0\}, \quad (3.10)$$

Onde  $\min(I_{m-otsu}^i)$  é o mínimo tom de cinza das zonas de umedecimento,  $I_{Wetzzone}^i$  é uma imagem binária com 2 regiões, a zona de umedecimento e o fundo,  $I_{WettingSuf}^i$  é uma imagem binária obtida realizando operações de subtração e dilatação com elemento estruturante de  $3 \times 3 \times 3$  *voxels* de resolução  $((I_{wetzzone}^i \oplus SE) - I_{wetzzone}^i)$ ;  $I_{m-otsu-B}^i$  é uma imagem binária  $\{1,0\}$  onde as regiões de umidade com tom de cinza  $>0$  são mapeados para 1;  $I_{WettingFront}^i$  é uma imagem binária com a frente de molhamento representada com *voxels* de valor 1. Finalmente, a reconstrução volumétrica da frente de molhamento ( $I_{WettingFront}^i$ ) é feita usando *isosurface* com isovalor igual a 1 e um exemplo é mostrado na Figura 3.8.

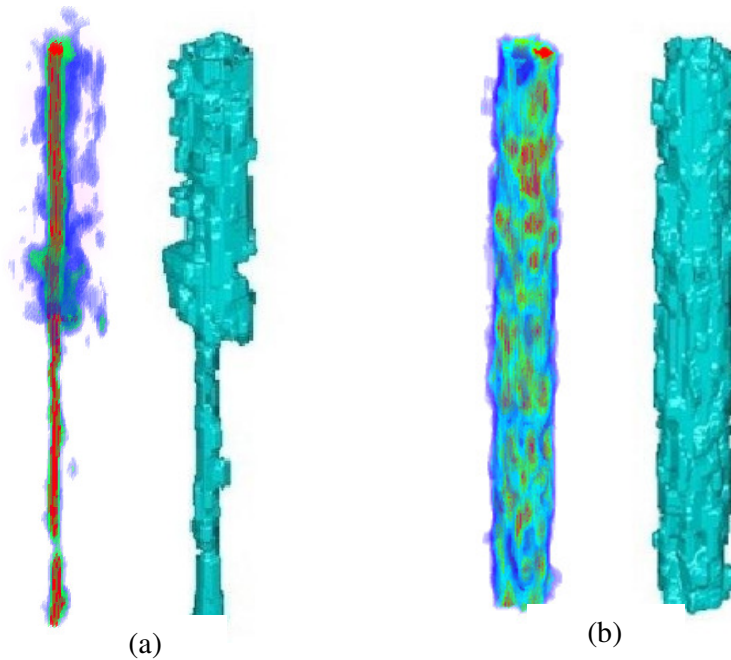


Figura 3.8: Exemplo de detecção da frente de molhamento em imagens de TC de perfis de solo. (a) Zonas de umidade (esquerda) e a frente de molhamento (direita) da amostra no tempo inicial. (b) Zonas de umidade (esquerda) e a frente de molhamento (direita) da amostra no tempo final.

### 3.4 Descrição da Estrutura 3D da Frente de Molhamento

Com a superfície da frente de molhamento detectada na seção anterior, logo é calculada uma série de descritores que permitem extrair informações relevantes da variabilidade do movimento da água a partir da estrutura tridimensional da frente de molhamento, esses descritores mostram as mudanças da estrutura no tempo e determinam zonas de relevância onde acontece máxima adsorção representada pela curvatura absoluta na estrutura.

#### 3.4.1 Características Morfológicas

Descreve-se a estrutura com um histograma que representa a forma da frente de molhamento para todas as seções bidimensionais ao longo da profundidade e no tempo, onde o eixo horizontal representa característica morfológica a ser medida e no eixo vertical tem o valor da profundidade, assim tem-se 4 funções representando cada tempo  $t_i$ ,  $i=[1,4]$  com uma cor diferente.

As seções de imagens binárias que representam a frente de molhamento obtidas na etapa da segmentação são utilizadas para estabelecer as suas características geométricas, fazendo a análise ao longo da profundidade e no tempo usando a sequência de imagens no processo de infiltração.

As características morfológicas extraídas são:

- *Área*: Escalar representando o número de pixels dentro da região da frente de molhamento.
- *Diâmetro Equivalente*: Escalar que especifica uma circunferência de área igual ao da região.
- *Maior Eixo*: Escalar que especifica a longitude (em pixels) do eixo maior da elipse que tem o mesmo segundo momento central normalizado que a região dentro da frente de molhamento.
- *Menor Eixo*: Escalar que especifica a longitude (em pixels) do eixo menor da elipse que tem o mesmo segundo momento central normalizado que a região dentro da frente de molhamento.

#### 3.4.2 Análise da Curvatura para descrever a Superfície da Frente de Molhamento

Malhas triangulares são muito frequentemente usadas em aplicações que trabalham com superfícies, e as propriedades de curvatura têm sido empregadas satisfatoriamente para a solução de problemas práticos como suavizamento ou simplificação de malhas na modelagem, classificação e reconhecimento de objetos 3D.

No trabalho de Cohen-Steiner (Cohen-Steiner, 2003) é definido um tensor curvatura para cada ponto ao longo de uma aresta. Esse tensor pode ser a média de uma região com uma quantidade arbitraria de elementos  $B$ , definida como na Eq. 3.11.

$$\Gamma(v) = \frac{1}{|B|} \sum_{arestas} \beta(e) |e \cap B| \bar{e} \bar{e}^t \quad , \quad (3.11)$$



Onde  $v$  é um vértice arbitrário sobre a malha,  $|B|$  é a área da superfície ao redor de  $v$  sobre o qual o tensor é estimado,  $\beta(e)$  é o ângulo entre as normais de dois triângulos orientados incidentes na aresta  $e$ ,  $|e \cap B|$  é o tamanho da interseção  $e \cap B$  e  $\bar{e}$  é o vetor unitário na mesma direção de  $e$ . Dois eigenvalues  $K_{min}$  e  $K_{max}$  são estimados da curvatura principal em  $v$ , e as curvaturas de interesse são calculadas. A curvatura Gaussiana é definida como o produto das principais curvaturas:  $K_{Gaussian} = K_{min} \cdot K_{max}$ . A curvatura média é a metade da soma das curvaturas principais  $K_{mean} = (K_{min} + K_{max})/2$ . A curvatura absoluta é definida como a soma dos valores absolutos das principais curvaturas  $K_{abs} = abs(K_{min}) + abs(K_{max})$ .

Com essa medida se pode visualizar e analisar como acontece o movimento da água nos diferentes tempos e qual é o efeito da estrutura interna do solo, para efeitos de análise é calculada a curvatura mínima, máxima, média, Gaussiana e absoluta para gerar gráficos de visualização e histogramas com 100 *bins* igualmente espaçados para identificar informações relevantes.

Um exemplo de cálculo da curvatura é mostrado na Figura 3.9, para um exemplo de estrutura 3D.

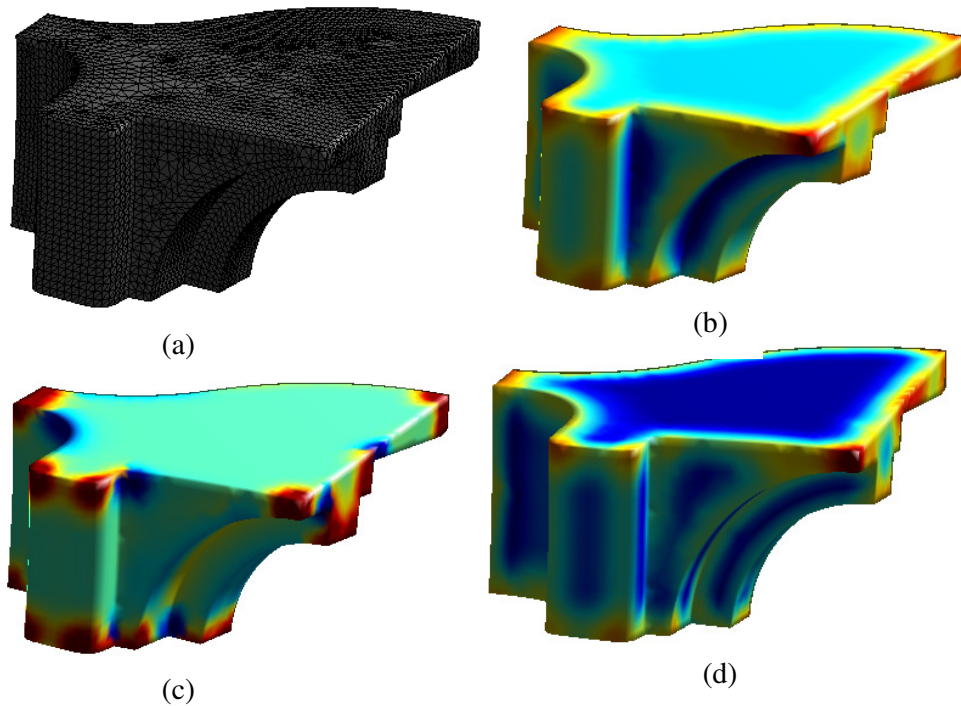


Figura 3.9: Exemplo das curvaturas em uma estrutura 3D. (a) Estrutura 3D original. (b) Curvatura média. (c) Curvatura Gaussiana. (d) Curvatura absoluta.

## 4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 4.1 Dados Experimentais

Para testar o método proposto, utiliza-se 5 conjuntos de dados de solo que correspondem a uma sequência de imagens 3D do processo de infiltração, onde para cada sequência nós temos 5 imagens de TC que foram captadas no processo de infiltração em diferentes tempos, sendo que a primeira imagem na sequência corresponde ao estado seco da coluna de solo.

Essas amostras pertencem ao tipo de solo Latossolo Roxo distrófico (LRd), extraído do horizonte A de um campo submetido a condições de manejo de plantio convencional (solo estruturado) cultivado com aveia, da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos-SP. A textura do solo é de 45% de argila, 15% de silte e 42% de areia. Cabe destacar que a argila deste solo é constituída de caulinita, mineral 1:1, portanto tem péssimas propriedades de retenção de água (REICHARDT, 1996).

De 5 blocos com seção quadrada de 30cm e 20cm de altura, a partir da superfície foram retirados de modo a evitar perturbações em sua estrutura original. Transportados para o laboratório, de cada bloco de solo foi retirada 1 amostra cilíndrica medindo 4cm de diâmetro e 18cm de altura (Figura 4.1).



Figura 4.1: Corte e raspagem do bloco de solo para retirada de amostra cilíndrica (NAIME, 2001).

Inicialmente, uma sequência de varreduras tomográficas foram feitas com o solo seco (para obterem-se referências para subtração de imagens) e em seguida, durante a infiltração de água, foram feitas 4 sequências de varreduras. Cada sequência compreende 31 varreduras espaçadas de 5mm em um perfil total de 150mm. A duração de uma sequência é de 124 minutos.

Assim as imagens obtidas usando o tomógrafo com sistema de varredura de terceira geração (Apêndice A) do laboratório da CNPDIA-Embrapa, São Carlos, Brasil foram em um total de 31 secções bidimensionais para representar a coluna de solo num tempo  $t$  no processo de infiltração, com 5mm de distancias entre as secções bidimensionais e uma resolução de 71x71 pixels com tons de cinza na faixa de valores de 0 a 255 (NAIME, 2001).

## 4.2 Detecção da Frente de Molhamento

Cada sequencia de 5 imagens de TC tem 4 imagens 3D para o processo de infiltração, como na Figura 4.2 mostram-se as zonas de umidade em tons de cor azul, onde a cor azul escuro representa uma zona mais úmida (saturada) e a cor azul mais clara representa uma zona menos úmida, da esquerda para a direita, a sequencia mostra a progressão da umidade desde o inicio da infiltração até o fim do processo ou estado de saturação (a)-(d). Onde (a) é o estado inicial da infiltração e (b) até (d) são os estados intermediários e final nos quais acontecem mudanças muito pequenas devido à saturação rápida da amostra de solo.

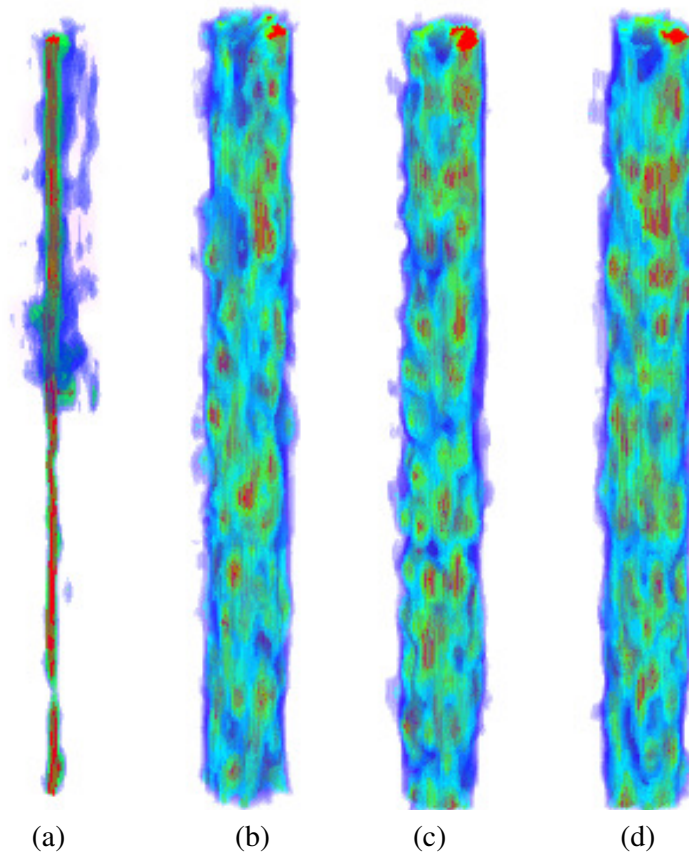


Figura 4.2: Exemplo do conteúdo da água antes de detectar a frente de molhamento para os tempos (a)  $t_1$ , (b)  $t_2$ , (c)  $t_3$  e (d)  $t_4$ . (VÁSQUEZ et al., 2013).

Os resultados experimentais sugerem que a frente de molhamento pode ser detectada para cada imagem na sequência como mostra a Figura 4.3, com a *isosurface* obtida com o método proposto na seção 3.

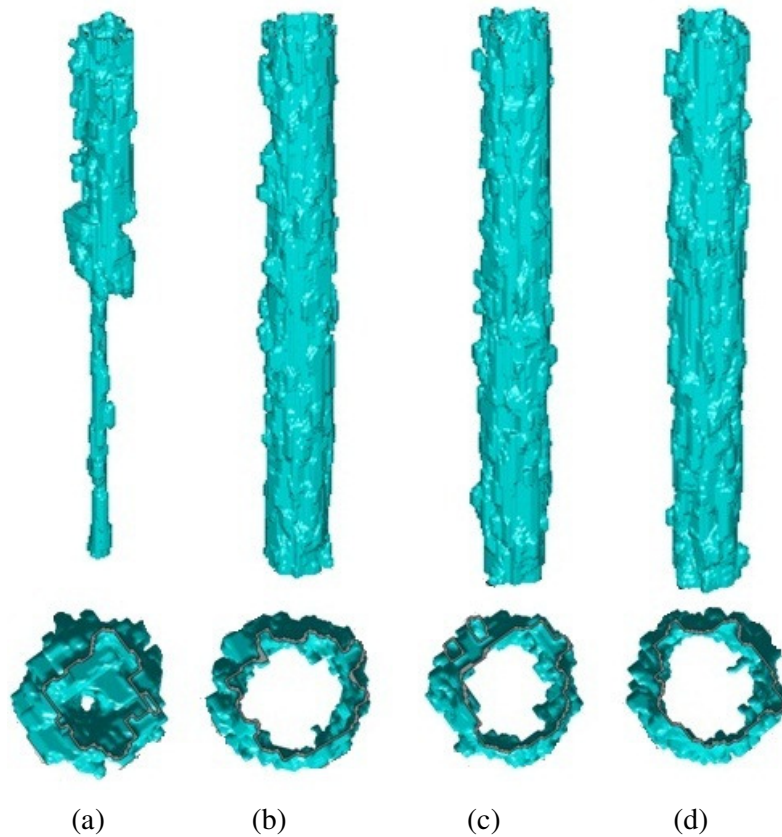


Figura 4.3: Exemplo da representação da frente de molhamento detectada nas amostras de perfis de solo. Vista frontal (fila superior) e vista superior (fila inferior) para os tempos (a)  $t_1$ , (b)  $t_2$ , (c)  $t_3$  e (d)  $t_4$  (VÁSQUEZ et al., 2013).

Para validar a representação 3D obtida como resultado do método proposto para a detecção da frente de molhamento para cada amostra de solo na sequência no processo de infiltração, uma medida da proporção de erro é proposta, baseado em uma aproximação do *groundtruth* feito para o conjunto de teste devido a que não existe banco de imagens público para o problema abordado. Então uma zona de tolerância foi determinada como uma região de alta probabilidade de conter a frente de molhamento, pois não é uma região bem definida, e não se sabe quais densidades de umidade a representam devido à variabilidade entre as zonas secas e úmidas nessa região, assim o *groundtruth* da frente de molhamento é definido como a zona que está no limite da região de menor tom de cinza das zonas úmidas obtidas depois da subtração de imagens, e na faixa de valores  $[\text{mínimo\_tom\_cinza}, \text{mínimo\_tom\_cinza} + 10]$ . Para refinar esse *groundtruth* realiza-se 3 operações de dilatação usando um elemento estruturante de tamanho  $3 \times 3 \times 3$  sobre a imagem binária  $I_{\text{moisture\_B}}^i$  obtida com a Eq. 4.1. Dessa maneira é detectada a frente de molhamento aproximada até obter uma região conectada chamada de zona de tolerância (Figura 4.4).

$$I_{moisture\_B}^i = \begin{cases} 1, & H(I_{moisture}^i) \leq I_{moisture}^i(i) < H(I_{moisture}^i) + 10 \\ 0, & otherwise \end{cases}, \quad (4.1)$$

Onde  $H(\cdot)$  é o mínimo tom de cinza no histograma das regiões de umidade após a subtração de imagens.



Figura 4.4: Zona de tolerância definida como uma aproximação do *groundtruth* para medir a proporção de erro na detecção da frente de molhamento com o método proposto (VÁSQUEZ et al., 2013).

A estimação da proporção de erro é baseada na zona de tolerância definida antes é feita calculando a proporção entre *voxels* que estão fora da zona de tolerância e o número total de *voxels* que pertencem à frente de molhamento detectada.

Tabela 4.1: Medida da estimacão da proporção de erro na detecção da frente de molhamento em média para o método proposto.

Amostra	Tempo				Estimacão da proporção de erro na detecção da frente de molhamento em média para cada amostra (%)
	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	
APC1	1.1658	1.5108	1.6805	2.7226	1.7699
APC2	0.6667	0.3498	0.3774	2.0795	0.8683
APC3	4.6086	3.9056	3.9366	6.4201	4.7176
APC4	0.4275	2.82	6.3307	8.1547	4.4332
APC5	1.2089	0.5408	1.1717	0.9249	0.9616
<b>Estimacão da proporção de erro na detecção da frente de molhamento em média para todas as amostras</b>					<b>2.5502</b>

Fonte: VÁSQUEZ et al., 2013. p. 3.

Valores quantitativos das medidas da proporção de erro na detecção são apresentados na Tabela 4.1 que é resultado de 10 execuções do algoritmo para a detecção da frente de molhamento e mostra o valor médio das execuções nos tempos  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$ ,  $t_4$  e em média para todas as amostras tende a ser menor com o método proposto na faixa de 2.55% de *voxels* errados na detecção em relação ao total de *voxels* detectados. (APC#: Amostra de solo com tratamento de plantio convencional).

#### 4.2.1 Perfil do Processo de Infiltração

Uma forma indireta de validar a detecção da frente de molhamento é a análise do conteúdo da água no processo de infiltração na sequência de imagens dentro do volume contido pela frente de molhamento, como mostrado na Figura 4.5 (a), onde mostra percentagem de pixels úmido para cada secção bidimensional com relação ao nível de profundidade da amostra APC4, nessa Figura têm-se as curvas das 4 sequências nos tempos  $t_1$  (verde),  $t_2$  (rosa),  $t_3$  (azul),  $t_4$  (preto). A primeira sequência tem uma percentagem maior no topo da amostra e baixa umidade no fundo, pois no início da infiltração a água não alcançou chegar ate um nível de profundidade considerável, as outras sequencias, especificamente a terceira e quarta apresentam menor percentagem de umidade no topo da amostra e maior umidade no fundo devido ao deslocamento da água.

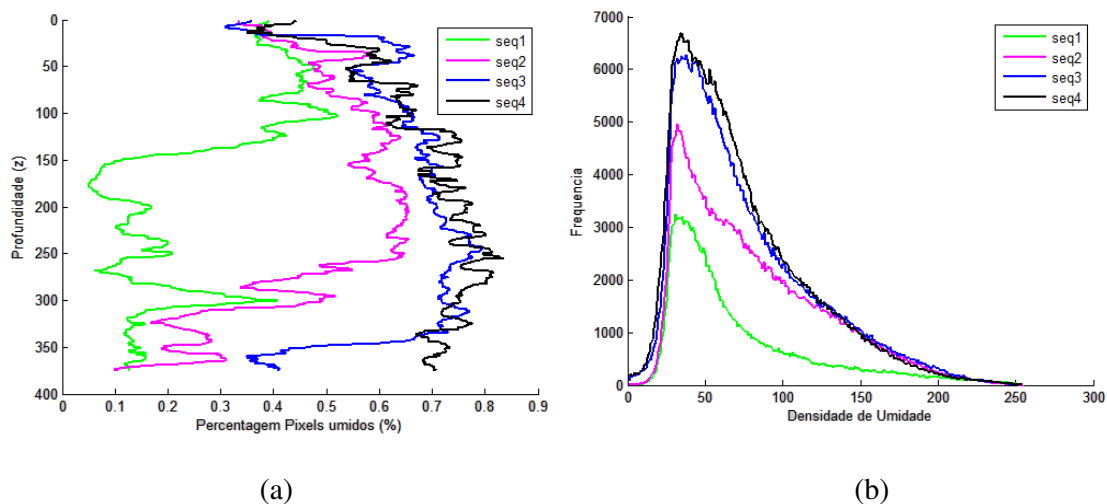


Figura 4.5: Percentagem de umidade com relação ao nível de profundidade (a) e a distribuição das densidades de umidade (tons de cinza) (b) para cada tempo na sequencia de infiltração da amostra APC4.

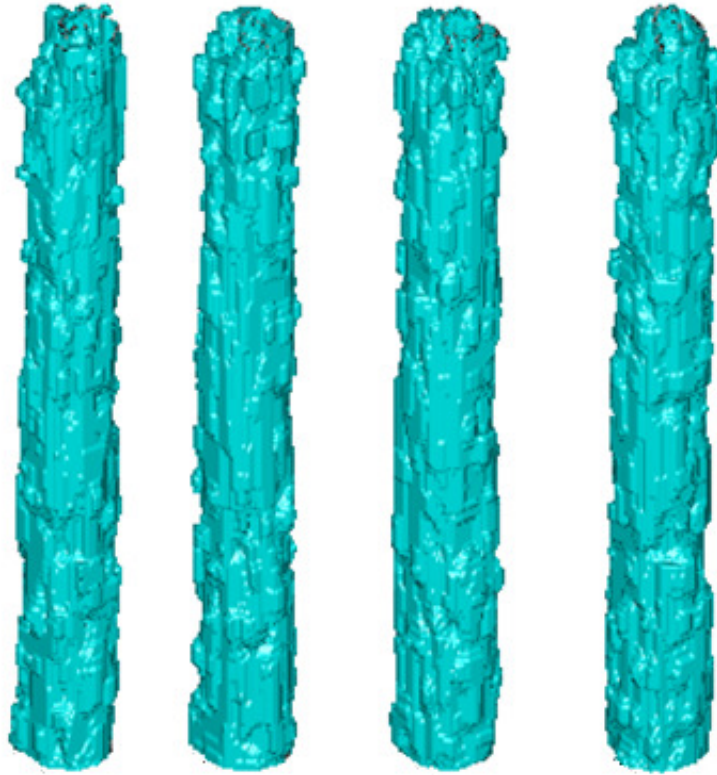
Mais um indicador do conteúdo da água dentro da frente de molhamento é a distribuição das densidades de umidade na amostra no processo de infiltração nos tempos  $t_1$  (verde),  $t_2$  (rosa),  $t_3$  (azul),  $t_4$  (preto), como mostrado na Figura 4.5 (b) para a amostra de solo APC4, pode-se verificar que a distribuição das densidades de umidade, que no caso das imagens de TC estão representadas pelo tom de cinza em cada *voxel*, segue uma distribuição gamma. E de acordo com Askoy (AKSOY, 2000) a distribuição

*gamma* e as distribuições: *normal*, *log-normal*, *Gumbel*, e *Weibull* são comumente usadas em hidrologia para determinar padrões das variáveis hidrológicas.

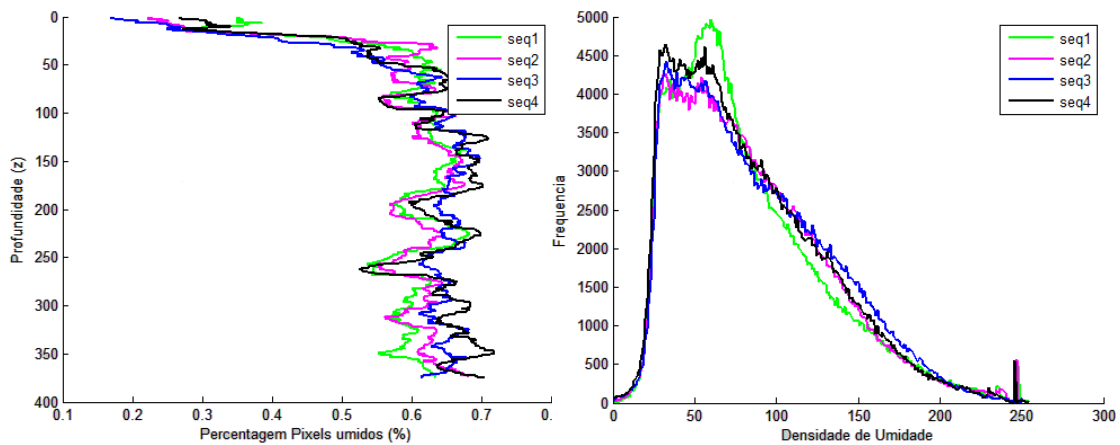
Selecionaram-se as amostras APC1, APC2 e APC5 do conjunto de dados porque de acordo com os resultados apresentados na visualização e nos histogramas, apresentam um comportamento particular, já as duas amostras APC3 e APC4 tem um comportamento parecido com as amostras APC2 e APC5 respectivamente.

A amostra APC1 de acordo com os resultados apresentados na Figura 4.6 (a) da detecção a frente de molhamento tem um avanço rápido e a amostra se apresenta saturada desde o início da captação das imagens, a amostra APC2 e a APC5 tem um início de infiltração mais lento como se pode ver nos resultados da detecção na Figura 4.7 (a) e na Figura 4.8 (a), mas os últimos 3 tempos para essas amostra apresentam-se mais saturado. Nesses resultados da visualização da estrutura tridimensional da frente de molhamento, comprova-se que o efeito da propriedade da baixa retenção de água própria do tipo de solo utilizado é a causa do avanço rápido da frente e molhamento e isso é verificável nos resultados mostrados nos histogramas da percentagem dos pixels úmidos e da distribuição do conteúdo de água nas Figuras 4.6 (b-c), Figuras 4.7 (b-c) e Figuras 4.8 (b-c), para as amostras APC1, APC2 e APC5 respectivamente, onde a saturação para a amostra APC1 tem uma função do comportamento da infiltração muito próxima para todos os tempos na sequência de infiltração. A saturação mostrada através dos histogramas da percentagem de pixels úmidos das amostras APC2 e APC5 mostram um início de infiltração com uma maior concentração de água na metade superior da coluna para logo passar a um nível de saturação similar na coluna nas três últimas imagens da coluna na sequência de infiltração.

- *Amostra de Solo com manejo de Plantio Convencional n° 1 (APC1)*



(a)



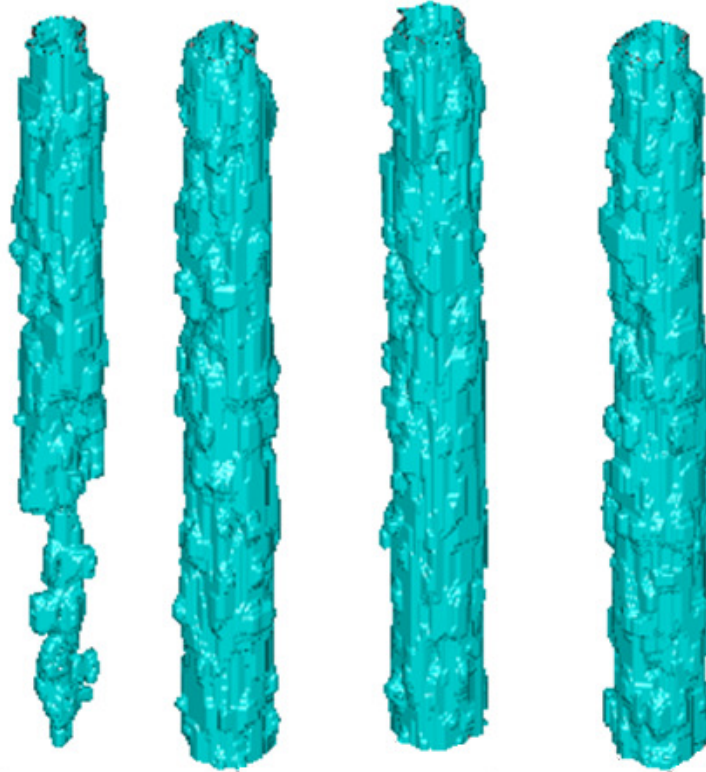
(b)

(c)

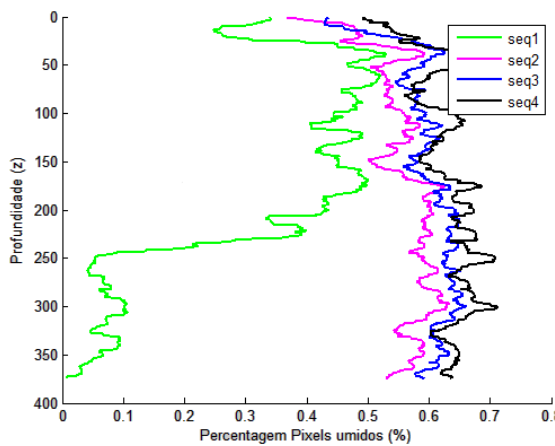
Figura 4.6: Superfície da Frente de Molhamento para os tempos  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  e  $t_4$  de esquerda à direita (a), histograma com a percentagem de umidade com relação ao nível de profundidade (b) e a distribuição das densidades de umidade (tons de cinza) (c) para cada tempo na sequencia de infiltração da amostra APC1.



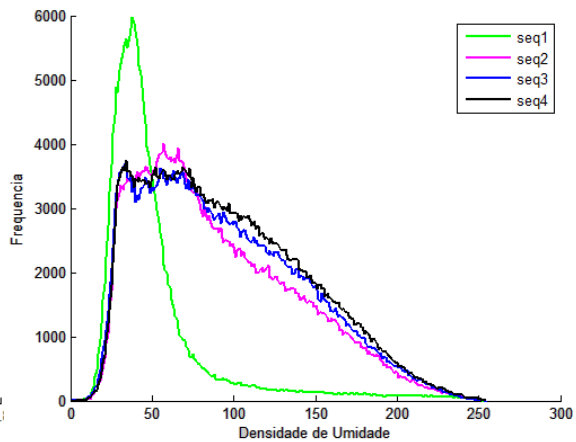
- Amostra de Solo com manejo de Plantio Convencional n° 2 (APC2)



(a)



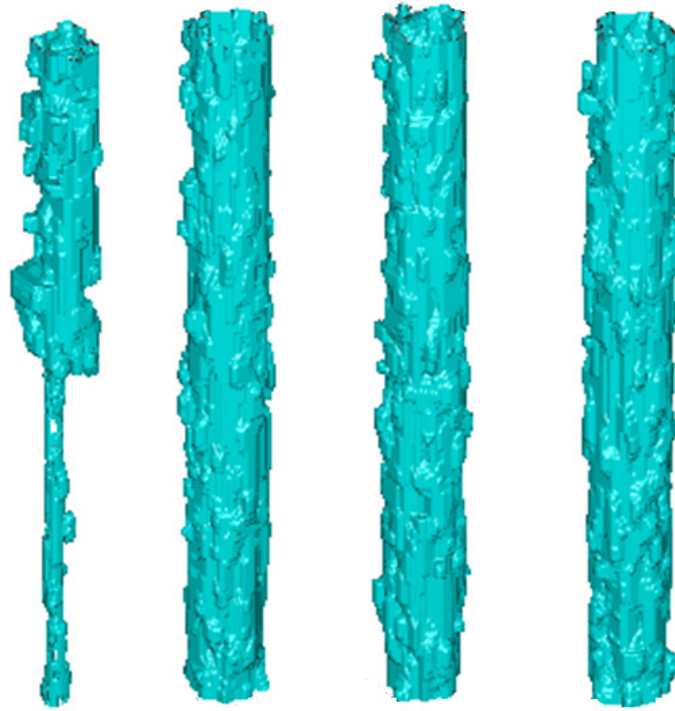
(b)



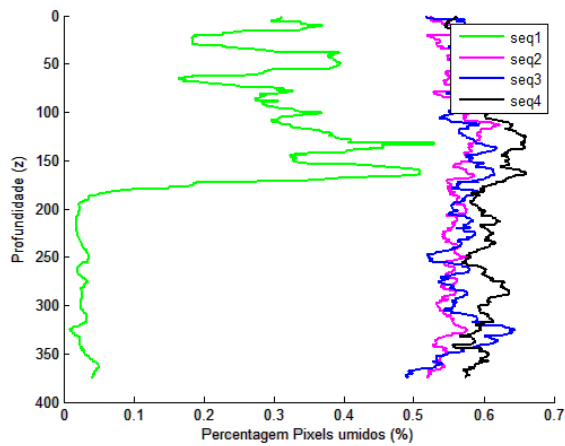
(c)

Figura 4.7: Superfície da Frente de Molhamento para os tempos  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  e  $t_4$  de esquerda à direita (a), histograma com a percentagem de umidade com relação ao nível de profundidade (b) e a distribuição das densidades de umidade (tons de cinza) (c) para cada tempo na sequencia de infiltração da amostra APC2.

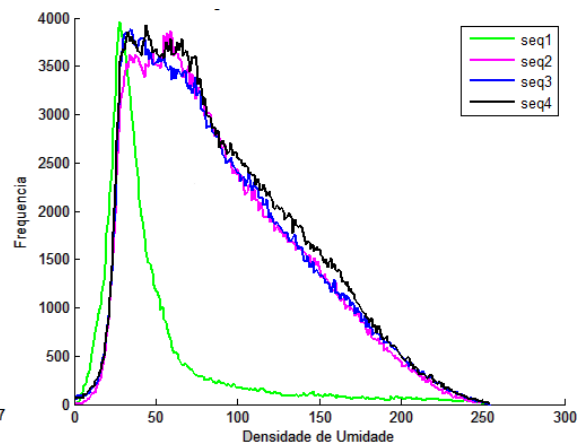
- *Amostra de Solo com manejo de Plantio Convencional n° 5 (APC5)*



(a)



(b)



(c)

Figura 4.8: Superfície da Frente de Molhamento para os tempos  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  e  $t_4$  de esquerda à direita (a), histograma com a percentagem de umidade com relação ao nível de profundidade (b) e a distribuição das densidades de umidade (tons de cinza) (c) para cada tempo na sequência de infiltração da amostra APC5.

### 4.3 Descrição da Estrutura 3D da Frente de Molhamento

Na descrição da estrutura tridimensional da frente de molhamento, determinou-se que as características de área, diâmetro equivalente, eixo maior e eixo menor, definidas na secção 3.4.1 para as amostras APC1, APC2 e APC5 nas Figuras 4.9 (a-d), 4.10 (a-d) e 4.11 (a-d), conseguem representar bem o comportamento da infiltração no tempo, pois tem uma evolução similar com a da percentagem de pixels da secção anterior.

Nas Figuras 4.12, 4.13, 4.14 e 4.15 apresenta-se resultados da visualização da curvatura média, a curvatura gaussiana, a curvatura absoluta e os vetores normais nos pontos de máxima curvatura absoluta respectivamente para a amostra APC5 por ser mais adequada para explicar o processo de infiltração devido a que a frente de molhamento inicia mais lento no início do que nas outras amostras, só para efeitos de visualização. A importância da curvatura na descrição da estrutura tridimensional da frente de molhamento, representada por uma estrutura de malha é que com os valores em cada vértice é possível identificar zonas de máxima adsorção da água na estrutura do solo, e extrair informações de como acontece o movimento da água na interface líquido-sólido para diferentes tipos de tratamentos e de solos. A visualização dos vetores normais nos pontos de máxima curvatura absoluta permitiu identificar as zonas de máxima adsorção, que são as zonas onde existe adesão de moléculas de um fluido a uma superfície sólida, o qual vai gerar acumulo de água e vai iniciar os caminhos da água através do solo.

Nas visualizações da curvatura média, gaussiana e absoluta para a amostra APC5 é possível ver onde acontecem os deslocamentos de água nas zonas com a cor azul (zonas de menor curvatura) ate zonas vermelhas (zonas de maior curvatura), cada tipo de curvatura oferece diferentes níveis de detalhe de acordo com as suas definições. Os padrões apresentados pela curvatura absoluta mostrados nos histogramas nas Figuras 4.16, 4.17 e 4.18 que tem a forma de uma função gamma muito comum em estudos de processos hidrológicos (AKSOY, 2000) e mostram a evolução da morfologia da estrutura da frente de molhamento no tempo, na curva inicial de cor verde se destaca pelo início da infiltração e nas ultimas sequencias (curvas de cor rosa, azul e preto) observam-se apenas pequenas mudanças o qual caracteriza a amostra de solo como de rápida saturação.

As Tabelas 4.2, 4.3 e 4.4 servem para descrever o comportamento da frente de molhamento na região não saturada para o tipo do solo e tratamento especificados nessa dissertação de acordo com seus valores de curvatura.

O custo computacional de todo o processo para uma sequencia completa do processo de infiltração desde o pré-processamento ate o calculo da curvatura, tem aproximadamente o tempo de 1 hora usando um computador convencional com processador Intel Core i3 e capacidade de memória 3Gb, sobre o ambiente de programação MATLAB 7.6 (R2008a).

- *Histogramas para a amostra APC1*

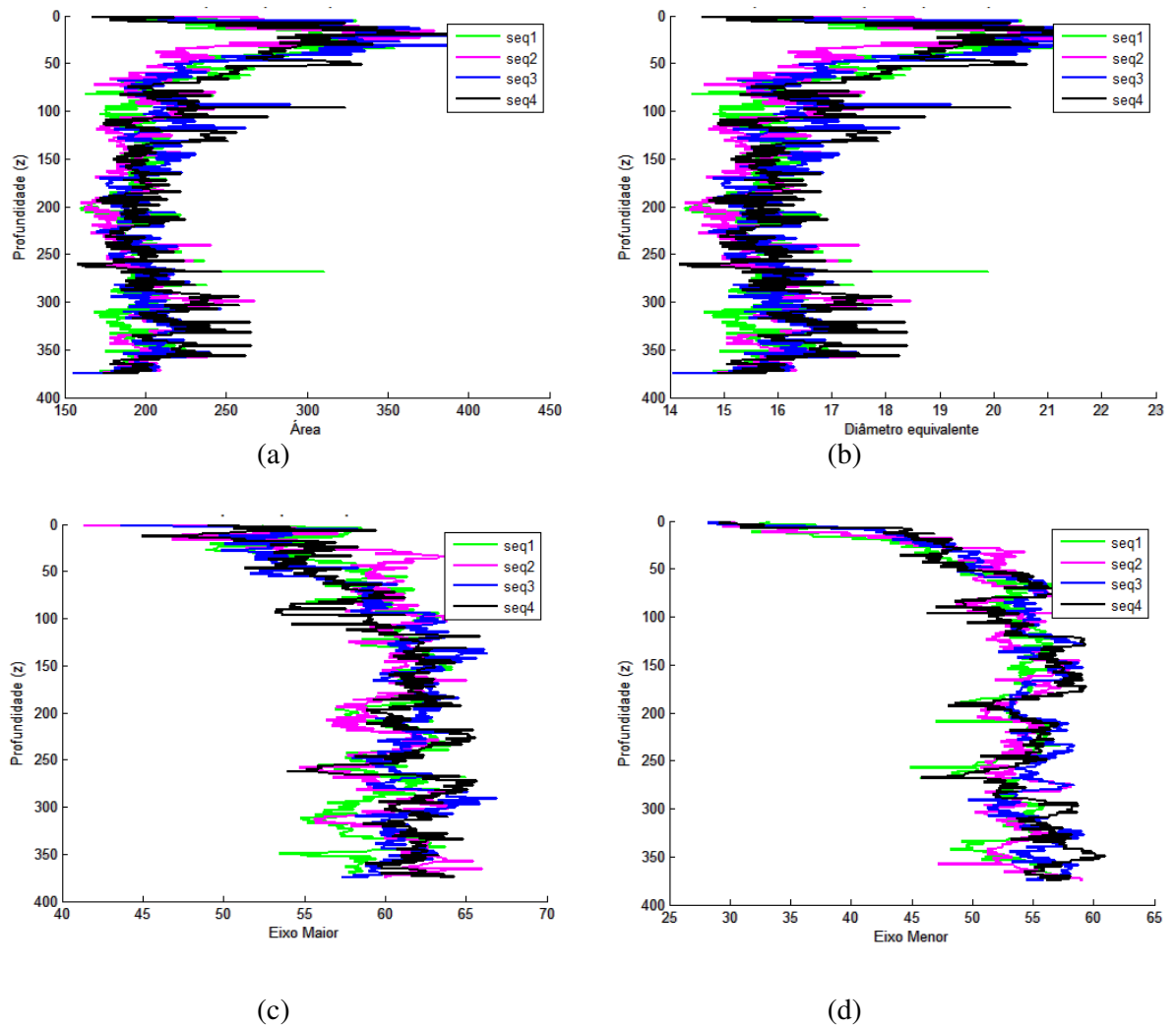


Figura 4.9: Histograma da área (a), diâmetro equivalente (b), eixo maior (c) e o eixo menor (d) para cada tempo na sequencia de infiltração da amostra APC1.

- *Histogramas para a amostra APC2*

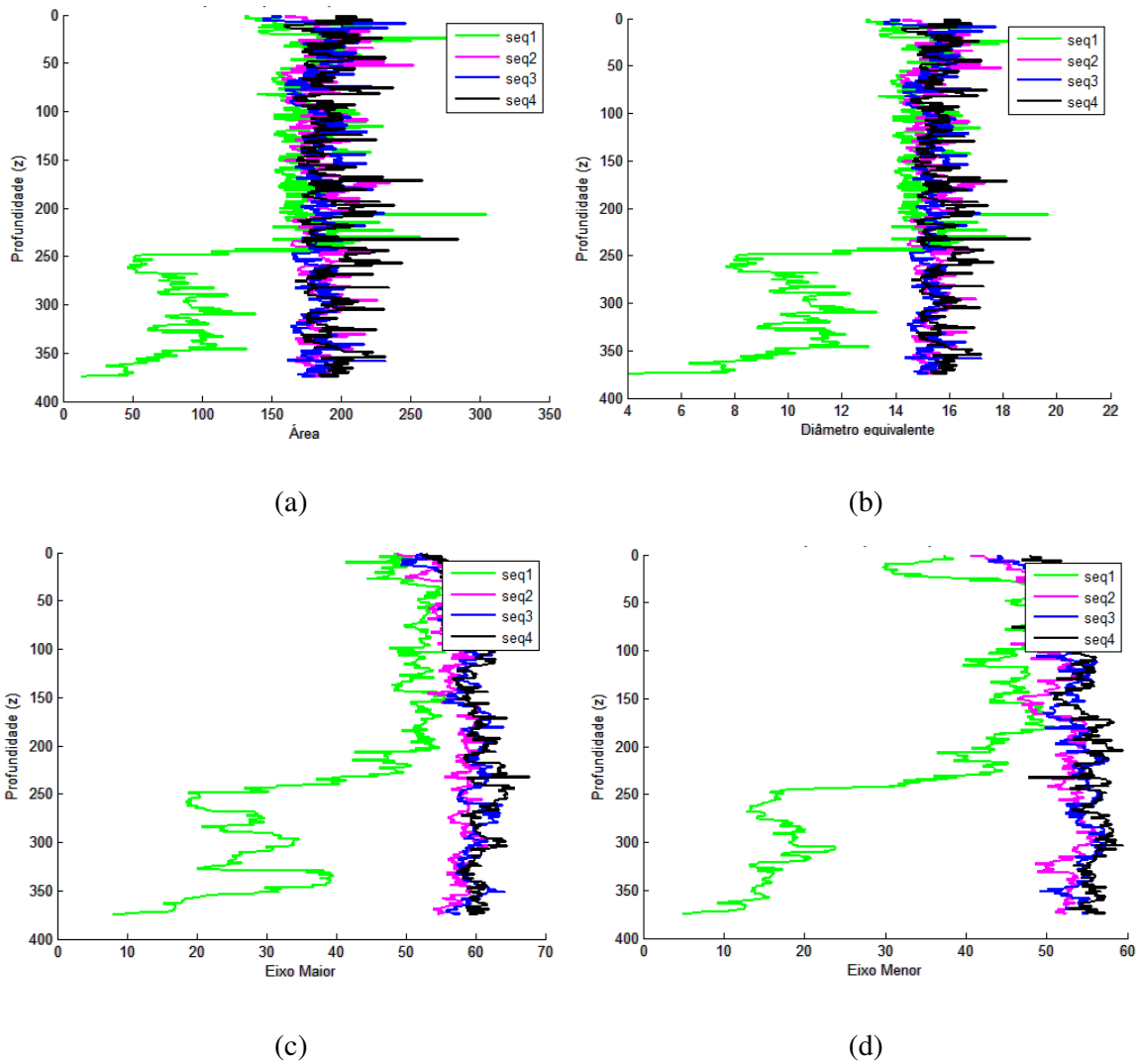


Figura 4.10: Histograma da área (a), diâmetro equivalente (b), eixo maior (c) e o eixo menor (d) para cada tempo na sequência de infiltração da amostra APC2.

- *Histogramas para a amostra APC5*

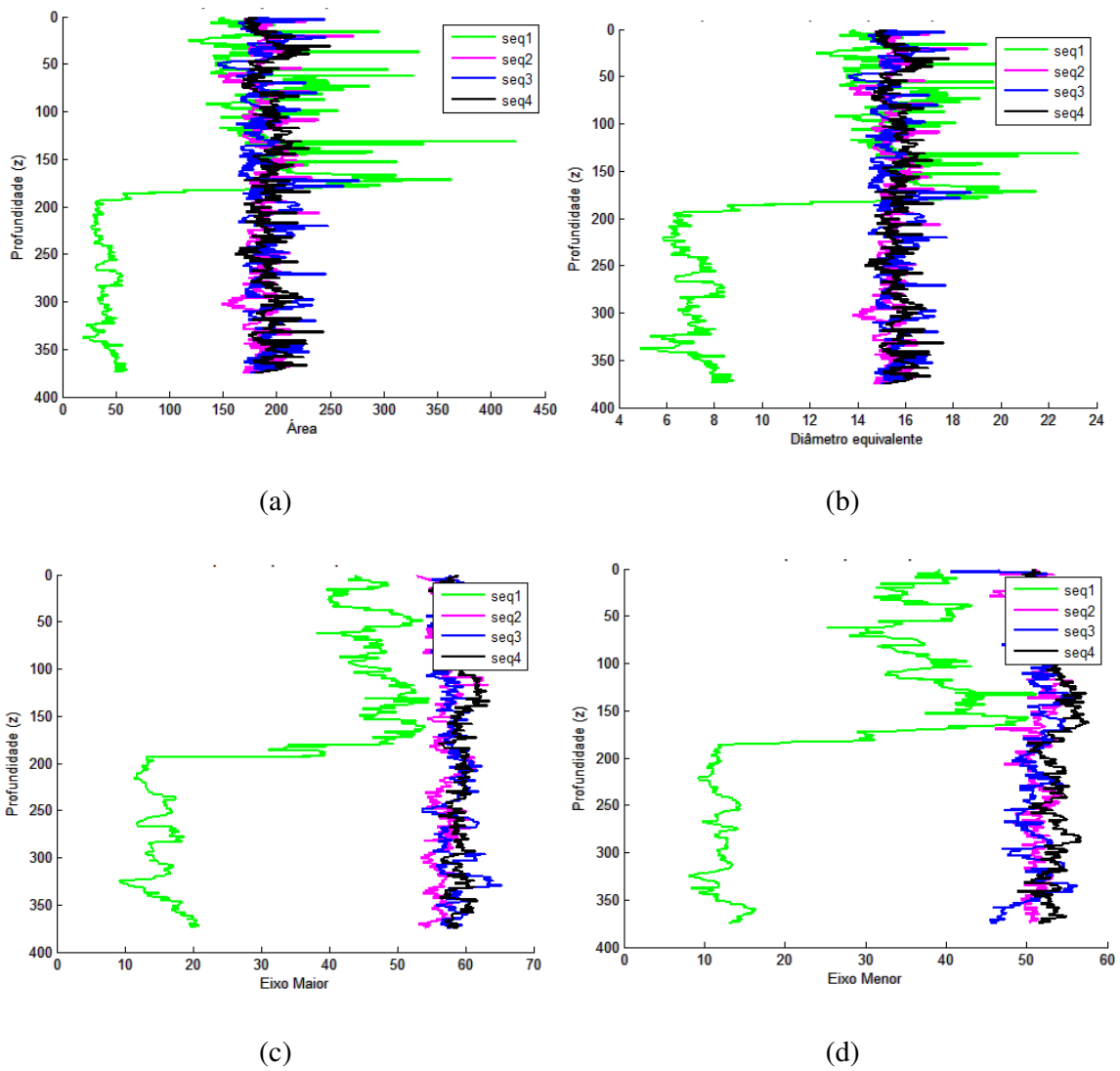


Figura 4.11: Histograma da área (a), diâmetro equivalente (b), eixo maior (c) e o eixo menor (d) para cada tempo na sequência de infiltração da amostra APC5.

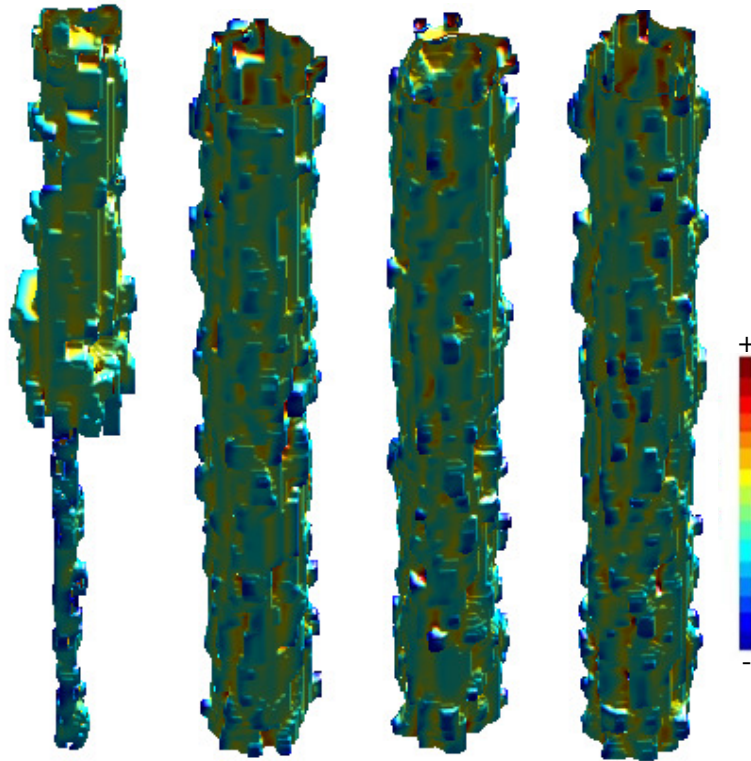


Figura 4.12: Visualização da curvatura média para cada tempo na sequencia de infiltração da amostra APC5 nos tempos  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  e  $t_4$  de esquerda à direita.

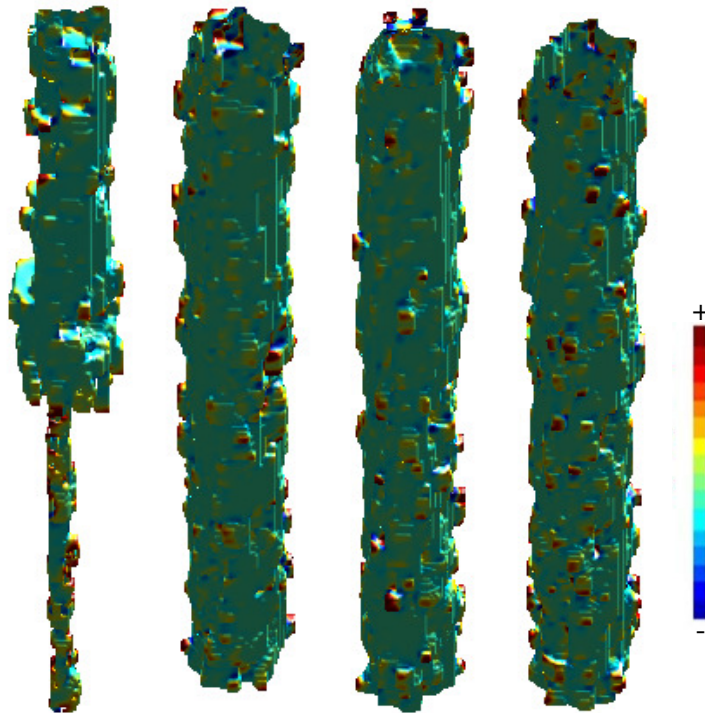


Figura 4.13: Visualização da curvatura gaussiana para cada tempo na sequencia de infiltração da amostra APC5 nos tempos  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  e  $t_4$  de esquerda à direita.

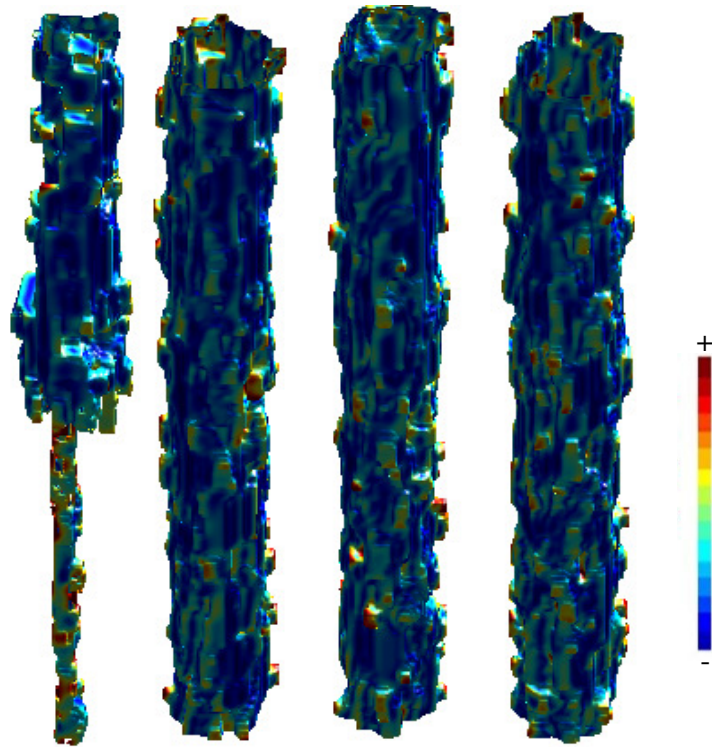


Figura 4.14: Visualização da curvatura absoluta para cada tempo na sequencia de infiltração da amostra APC5 nos tempos  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  e  $t_4$  de esquerda à direita.

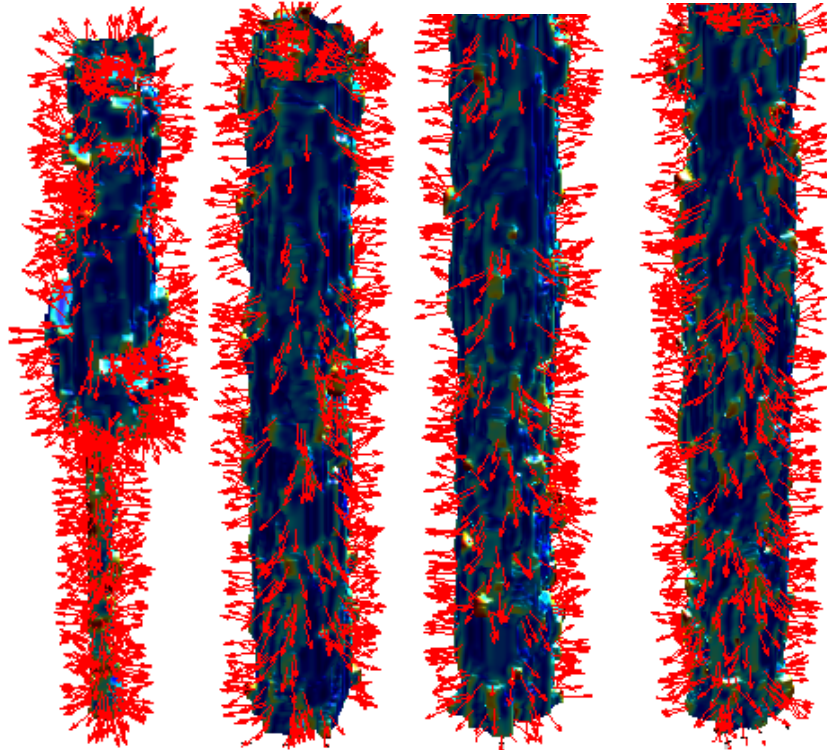


Figura 4.15: Visualização das normais à curvatura para cada tempo na sequencia de infiltração da amostra APC5 nos tempos  $t_1$ ,  $t_2$ ,  $t_3$  e  $t_4$  de esquerda à direita.



- *Análise da curvatura para a amostra APC1:*

Tabela 4.2: Valores mínimos e máximos da curvatura para a amostra APC1

Amostra APC1	Curvatura	Valor Mínimo	Valor Maximo	Amostra APC1	Curvatura	Valor Mínimo	Valor Maximo
$t_1$	$K_{min}$	-0,5063	0,1636	$t_3$	$K_{min}$	-0,3217	0,1524
	$K_{max}$	-0,1119	0,4755		$K_{max}$	-0,0844	0,4318
	$K_{mean}$	-0,2592	0,2603		$K_{mean}$	-0,1948	0,2640
	$K_{gauss}$	-0,0031	0,0396		$K_{gauss}$	-0,0033	0,0415
	$K_{abs}$	0,0001	0,5206		$K_{abs}$	0,000027621	0,5280
$t_2$	$K_{min}$	-0,4465	0,1067	$t_4$	$K_{min}$	-0,4918	0,1950
	$K_{max}$	-0,1702	0,3168		$K_{max}$	-0,1168	0,4529
	$K_{mean}$	-0,2507	0,1980		$K_{mean}$	-0,2593	0,2543
	$K_{gauss}$	-0,0058	0,0327		$K_{gauss}$	-0,0062	0,0514
	$K_{abs}$	0,00001	0,5013		$K_{abs}$	0,0001	0,5186

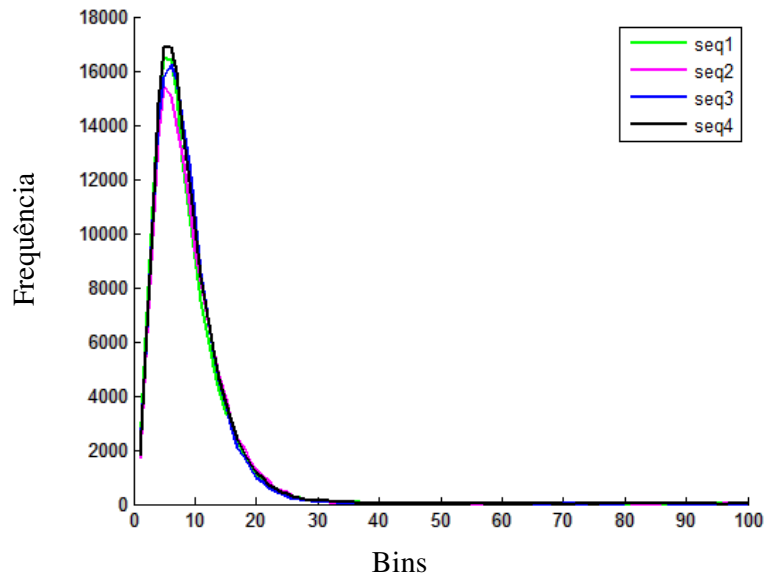


Figura 4.16: Histograma da curvatura absoluta para cada tempo na sequência de infiltração da amostra APC1 nos tempos  $t_1$  (verde),  $t_2$  (rosa),  $t_3$  (azul) e  $t_4$  (preto).

- *Análise da curvatura para a amostra APC2:*

Tabela 4.3: Valores mínimos e máximos da curvatura para a amostra APC2.

Amostra APC2	Curvatura	Valor Mínimo	Valor Máximo	Amostra APC2	Curvatura	Valor Mínimo	Valor Máximo
$t_1$	$K_{min}$	-0,3637	0,1128	$t_3$	$K_{min}$	-0,4567	0,1319
	$K_{max}$	-0,0970	0,2904		$K_{max}$	-0,0954	0,3867
	$K_{mean}$	-0,2214	0,1836		$K_{mean}$	-0,2560	0,2225
	$K_{gauss}$	-0,0094	0,0288		$K_{gauss}$	-0,0046	0,0270
	$K_{abs}$	0,00001	0,4428		$K_{abs}$	0,00005	0,5119
$t_2$	$K_{min}$	-0,3940	0,1005	$t_4$	$K_{min}$	-0,5075	0,1260
	$K_{max}$	-0,0969	0,2172		$K_{max}$	-0,1302	0,3584
	$K_{mean}$	-0,2318	0,1491		$K_{mean}$	-0,2596	0,2134
	$K_{gauss}$	-0,0086	0,0275		$K_{gauss}$	-0,0097	0,0286
	$K_{abs}$	0,0002	0,4637		$K_{abs}$	0,00001	0,5192

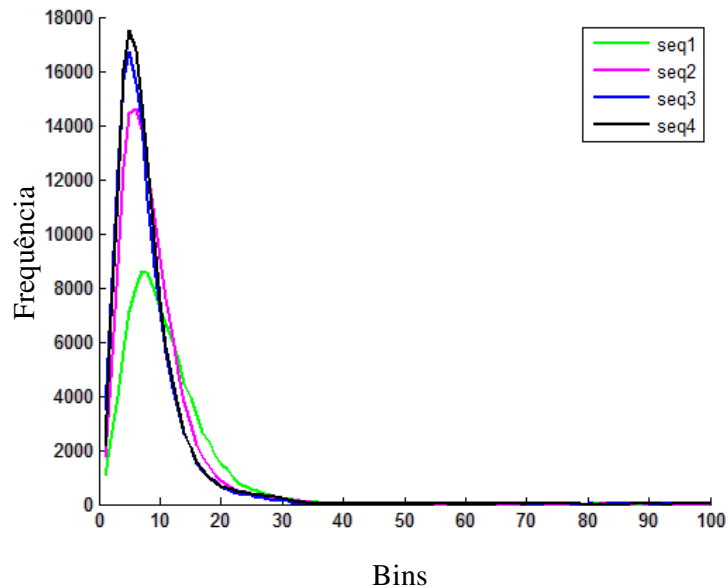


Figura 4.17: Histograma da curvatura absoluta para cada tempo na sequência de infiltração da amostra APC2 nos tempos  $t_1$  (verde),  $t_2$  (rosa),  $t_3$  (azul) e  $t_4$  (preto).

- *Análise da curvatura para a amostra APC5:*

Tabela 4.4: Valores mínimos e máximos da curvatura para a amostra APC5.

Amostra APC5	Curvatura	Valor Mínimo	Valor Máximo	Amostra APC5	Curvatura	Valor Mínimo	Valor Máximo
$t_1$	$K_{min}$	-0,4159	0,1380	$t_3$	$K_{min}$	-0,4627	0,1141
	$K_{max}$	-0,1438	0,4450		$K_{max}$	-0,1019	0,2823
	$K_{mean}$	-0,2340	0,2517		$K_{mean}$	-0,2582	0,1750
	$K_{gauss}$	-0,0046	0,0285		$K_{gauss}$	-0,0046	0,0291
	$K_{abs}$	0,0001	0,5034		$K_{abs}$	0,00003	0,5163
$t_2$	$K_{min}$	-0,3318	0,1279	$t_4$	$K_{min}$	-0,4899	0,1573
	$K_{max}$	-0,1181	0,4490		$K_{max}$	-0,0980	0,4982
	$K_{mean}$	-0,1899	0,2633		$K_{mean}$	-0,2591	0,2602
	$K_{gauss}$	-0,0039	0,0413		$K_{gauss}$	-0,0076	0,0503
	$K_{abs}$	0,00004	0,5265		$K_{abs}$	0,00002	0,5204

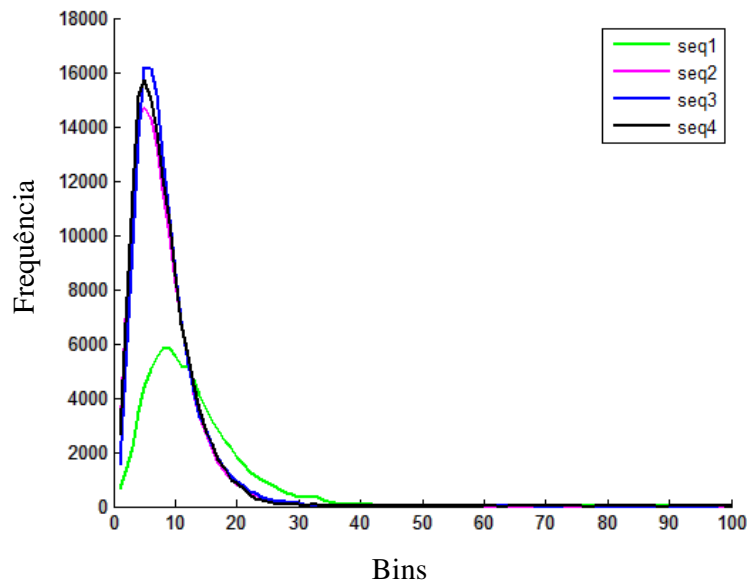


Figura 4.18: Histograma da curvatura absoluta para cada tempo na sequência de infiltração da amostra APC5 nos tempos  $t_1$  (verde),  $t_2$  (rosa),  $t_3$  (azul) e  $t_4$  (preto).

## 5 CONCLUSÕES

Nesse trabalho apresentou-se uma nova abordagem para descrição do movimento da água em amostras da região não saturada do solo, baseado em informação da estrutura tridimensional da frente de molhamento. Nossos resultados experimentais indicam que, potencialmente, o algoritmo proposto para a detecção da frente de molhamento pode ser efetivo para amostras de solos em processo de infiltração e os descritores baseados na análise da morfologia e a curvatura conseguem representar a variabilidade da estrutura da frente de molhamento no processo de infiltração.

Os resultados preliminares do método proposto na detecção automática da frente de molhamento são satisfatórios para a análise de imagens tomográficas de amostras de solos, obtendo uma incerteza em média de 2.55% para todo o conjunto de amostras sob a definição de uma zona de tolerância.

A definição de descritores é ótima para entender como acontece o processo de infiltração, a parte da visualização ajuda muito e os histogramas conseguem representar o estado da infiltração num tempo determinado fazendo uso do processamento geométrico da superfície da frente de molhamento representada por uma estrutura de malha tridimensional.

A principal contribuição desse trabalho é mostrar que a utilização de informação no espaço tridimensional é importante para o estudo do movimento da água, isto é possível fazendo uso de técnicas não-invasivas para captar imagens no momento da infiltração e dos métodos de processamento de imagens que permitam preservar a continuidade dos detalhes na amostra do solo, além do processamento geométrico que permite extrair informação relevante da estrutura obtida. As visualizações e informações relacionadas com a distribuição da água na região não saturada do solo permitirão aos físicos do solo, especialistas em hidrologia, especialistas na ciência do solo, etc. compreender melhor e reconhecer padrões do movimento da água nos primeiros estágios na interface líquido-sólido da região não saturada do solo, tema importante para diversas aplicações como o uso adequado dos recursos da água e solo, assim como também a sua influência no cultivo das plantas e na tentativa de minimizar danos produzidos pela percolação de agentes contaminantes no solo, isso também para diferenciar as características em diferentes tipos de solo.

### 5.1 Perspectivas e Trabalhos Futuros

O método apresentado trabalha com dados para casos reais, uma extensão do trabalho é a aplicação do estudo em diferentes tipos de tratamento de solo, estudar a relação solo-água-planta, etc.

O acompanhamento da frente de molhamento em tempo real seria ideal o qual só se pode realizar usando nova tecnologia de sistemas de detecção, mas que tem o grande limitante do preço.

Sobre a definição dos descritores, ainda tem-se a opção da utilização de descritores locais na superfície da frente de molhamento, identificar e quantificar as regiões que sejam importantes ou que tenham grande relevância no movimento da água através da segmentação da malha baseada nas suas características de curvatura, distância geodésica ou a sua decomposição em autovetores usando o grafo de conectividade (laplaciano), que oferece informação sobre a estrutura.

Finalmente sugere-se a criação de frameworks para estudo de amostras de solos e os processos de transporte usando software livre para melhorar as pesquisas na área.

## 6 TRABALHOS RESULTANTES

- VÁSQUEZ, D. ; Scharcanski, Jacob ; Wong, Alexander ; CRESTANA, S.. **A Novel 3D Approach for the Extraction of the Wetting Front in CT Images of Soil Profiles.** In: IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC 2013), 2013, Minneapolis. 2013. (Publicado).

- VÁSQUEZ, D. ; Scharcanski, Jacob ; Wong, Alexander. **A Novel Approach for Describing the 3D Wetting Front Structure in Tomographic Images of Soils.** In: IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement. (Submetido).

## REFERÊNCIAS

- AKSOY, H. Use of Gamma Distribution in Hydrological Analysis. **Turkish Journal of Engineering & Environmental Science**. v. 24, [S.l.] p. 419-428. 2000.
- ANSELMETTI, F. S.; LUTHI, S.; EBERLI, G. P. Quantitative Characterization of Carbonate pore System by digital Image Analysis. **AAPG Bulletin**, [S.l.], v. 82, n. 10, p. 1815-1836, oct. 1998.
- BAYER, A.; VOGEL, H. J. and ROTH, K. Direct measurement of the soil water retention curve using x-ray absorption, **Hydrology and Earth System Sciences**. [S.l.], v. 8, p. 2-7, 2004.
- BOWMAN, B. T. et al. Rainfall simulator-grid lysimeter system for solute transport studies using large intact soil blocks, **Journal of Environmental Quality**. [S.l.], v. 23, p. 815-822. 1994.
- COHEN-STEINER D. and MORVAN J. Restricted Delaunay triangulation and normal cycle, In: 19<sup>th</sup> ANNUAL ACM SYMPOSIUM COMPUTATIONAL GEOMETRY. Jun. 8-10. **Proceedings...**, San Diego, CA, USA, ACM 2003 ISBN 1-58113-663-3.
- DARNAULT, C. J. G. Measurement of fluid contents by light transmission in transient three-phase oil-water-air systems in sand, **Water Resources Research**, [S.l.], v. 37, p. 1859-1868. 2001.
- DEINER, M. R.; et al. "Measurement of fluid contents and wetting front profiles by real-time neutron radiography", **Journal of Hidrology**. [S.l.], v. 290, p. 192-201, 2004.
- DICARLO, D. A. et al. "High-speed measurements of calibration of three-phase flow using synchrotron X-rays", **Water Resources Research**, [S.l.], v. 33, p. 569-576, 1997.
- LIBARDI, P. L. **Dinâmica da Água no Solo**, São Paulo:University of São Paulo, Brasil, 210 p., 2005, ISBN 85-314-0756-7.
- FELIPUSSI, S.; SCHARCANSKI J.; COMBA, J. L. D. "Measuring Statistical geometric properties of Tomographic images of Soil", **IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement**, [S.l.], v. 57, n. 11, Novembro, 2008.
- GANTZER, C. J.; ANDERSON, S. H. Computed Tomographic Measurement of macroporosity in chisel-disk and no-tillage Seedbeds. **Soil & Tillage Research**, [S.l.], v. 64, p. 101-111, 2002.

GONZALEZ, R. C.; WOODS R. E. **Digital Image Processing**. 2.ed. Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, New Jersey 07458, USA, ISBN 0-201-18075-8, 2002.

GOSINE, R.; ZHAO, X.; DAVIS, S. Automated Image Analysis for Applications in Reservoir Characterization. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON KNOWLEDGE-BASED INTELLIGENT ENGINEERING SYSTEMS & ALLIED TECHNOLOGIES, 4, 2000. **Proceedings...** Brighton, UK., IEEE 2000.

GUTIÉRREZ-GNECHI, J. A. et al. Automated Wetting Front Detector. In: ELECTRONICS, ROBOTICS AND AUTOMOTIVE MECHANICS CONFERENCE, 2011. **Proceedings...** [S.l.:s.n], 2011.

HUBBEL, J. H. **Photon cross sections, attenuation coefficients, and energy absorption coefficients from 10keV to 100GeV**. National Bureau of Standards. U. S. Department of Commerce. NSRDS-NBS 29, Washington, 85 p., 1969.

HUISMAN, J.A. et al. Soil water content measurements at different scales: accuracy of time domain reflectometry and ground-penetrating radar. **Journal of Hydrology**, [S.l.] v.245, p. 48-58, 2001.

JASTI, J. K.; FOLGER, H. S. Applications of nêutron radiography to image flow phenomena in porous media, **AICHE Journal**, [S.l.], v. 38, p. 175-182, 1992.

MENON, M. et al. Visualization of root growth in heterogeneously contaminated soil using neutron radiography, **European Journal of Soil Science**. [S.l.], 2006.

MORTENSEN, A. P. et al. Visualization of microscale phase displacement process in retention and outflow experiments: nonuniqueness of unsaturated flow properties, **Water Resources Research**, v. 37, n. 6, p. 1627-1640, [S.l.], 2001.

NAIME, J. M. **Um novo método para estudos dinâmicos, in situ, da infiltração da água na região não-saturada do solo**. 2001. 166 f. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos.

NAIME, J. M.; VAZ, C.M.P.; MACEDO, A. Automated soil particle size analyzer based on gamma-ray attenuation, **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v.31, n.3, p. 295-304, , 2001.

PING-SUNG, L.; TSE-SHENG, CH.; PAU-CHOO, CH. "A Fast Algorithm for Multilevel Thresholding", **Journal of Information Science and Engineering**. [S.l.], v. 17, p. 713–727, 2001.

PREFERENTIALFLOWWEBSITE Preferential Flow WebSite, **Department of Biological and Environment Engineering, Cornell University**, 2003. Disponível em: <<http://www.soilandwater.bee.cornell.edu/Research/pfweb/index.htm>>. Acesso em: jan. 2013.

REICHARDT, K. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas**. 2ed. Piracicaba, USP/ESALQ Depto. de Física e Meteorologia, 513 p., 1996.

SKINNER, A. J. and LAMBERT, M. F. An Automatic Soil Pore-Water Salinity Sensor Based on a Wetting-Front Detector. **IEEE Sensors Journal**, v. 11, n. 1, [S.l.], janeiro 2011.



SOUZA FILHO P. da S., **Parâmetros Físicos e Hídricos relacionados com o avanço da Frente de Molhamento**. 2011. 87 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Centro de Ciências Rurais, UFSM, Santa Maria.

STARR, G.C.; LOWERY, B.; COOLEY, E.T. Soil water content determination using a network analyzer and coaxial probe. **Soil Science Society of America Journal**, [S.l.], v. 64, n. 3, p. 867-72, 2000.

TRAUTMANN, N. M.M; PORTER, K. S.; WAGENET, R. J. **Pesticides and groundwater: A guide for the pesticide user**. [S.l.:s.n], 2000.

USHIZIMA, D.M. et al. Statistical segmentation and porosity quantification of 3D x-ray microtomography, In: SPIE OPTICS AND PHOTONICS: XXXIV APPLICATIONS OF DIGITAL IMAGE PROCESSING, 2011, **Proceedings...** [s.n], v. 8135, n.1, p. 1-14, Aug 2011, San Diego, CA, USA.

VÁSQUEZ, D. et al. A Novel 3D Approach for the Extraction of the Wetting Front in CT Images of Soil Profiles. In: IEEE INTERNATIONAL INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT TECHNOLOGY CONFERENCE, 2013, **Proceedings...** [s:n], Minneapolis. 2013.

VAZ, C.M.P.; NAIME, J.M.; MACEDO, A. Soil particle size fractions determined by gamma-ray attenuation, **Soil Science**, v.164, n.6, p. 403-410, Baltimore, Junho 1999.

VOTRUBOVÁ, J. et al. The relationship between MR parameters and the content of water in packed samples of two soils, **Geoderma**, [S.l.], v. 95, p. 267-281, 2000.

WONG, A. et al. Intervertebral Disc Segmentation and Volumetric Reconstruction from Peripheral Quantitative Computed Tomography Imaging, **IEEE Transactions on Biomedical Engineering**, v. 56, part 2, n. 11, p. 2748-2751, [S.l.], 2009.

WONG, A.; SCHARCANSKI, J.; FIEGUTH, P. Automatic skin lesion segmentation via iterative stochastic region merging, **IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine**, v. 15, n. 16, p. 929-936, [S.l.], 2011.

ZEBAZE, R. et al. A new method of segmentation of compact-appearing, transitional and trabecular compartments and quantification of cortical porosity from high resolution peripheral quantitative computed tomographic images, **Bone**, v. 54, n. 1, p. 8-20, Janeiro, [S.l.], 2013.

ZELJKOVIC, V.; MOUSA, W. An algorithm for petro-graphic colour image segmentation used for oil exploration. In: HIGH PERFORMANCE COMPUTING AND SIMULATION (HPCS), 2011 INTERNATIONAL CONFERENCE ON. **Proceedings...** [s:n], Estambul, Turquia, p. 498-503, July 2011.

## APÊNDICE A GERAÇÕES DE TOMÓGRAFOS

Desde a construção dos primeiros protótipos, os tomógrafos seguiram uma linha evolutiva, passando por diversas concepções e progressivos aperfeiçoamentos. Os primeiros tomógrafos eram extremamente lentos, levando varias horas ou até mesmo dias para adquirir um número suficiente de projeções. Os tomógrafos atuais aquisicionam dados e reconstroem imagens e estruturas tridimensionais em segundos.

### A.1. Primeira Geração

A primeira geração de tomógrafos, ilustrada na Figura A.1, utilizava um detector. O detector era trasladado em conjunto com a fonte de raios X de forma a adquirir uma projeção. Em seguida, o sistema era girado de um pequeno incremento angular. O processo de translação era então repetido para obter a projeção seguinte. O feixe de raios X da primeira geração é chamado de *pencil beam* (feixe em forma de lápis).

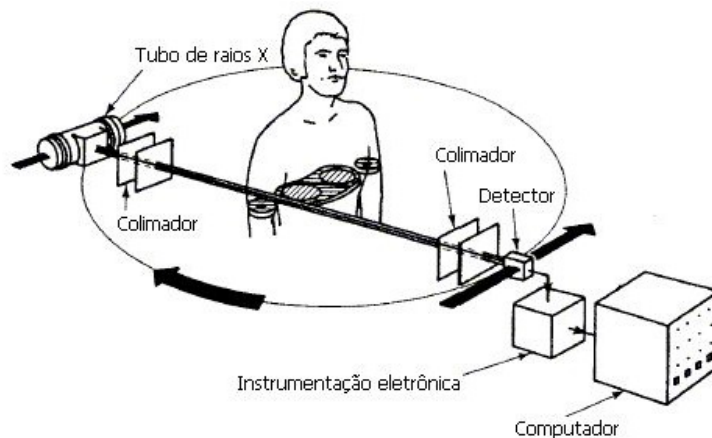


Figura A.1: Primeira geração de tomógrafo.

A Figura A.2 mostra o processo de aquisição de um tomógrafo de primeira geração. Este processo é conhecido como translação+rotação.

Devido ao uso de apenas um detector, os tomógrafos de primeira geração possuem as seguintes vantagens:

- Baixo custo.
- Processos de varredura e aquisição simples.
- Algoritmo de reconstrução de imagens simples.

- Maior qualidade devido ao uso de um único detector, não existindo pequenas variações entre um detector e outro.

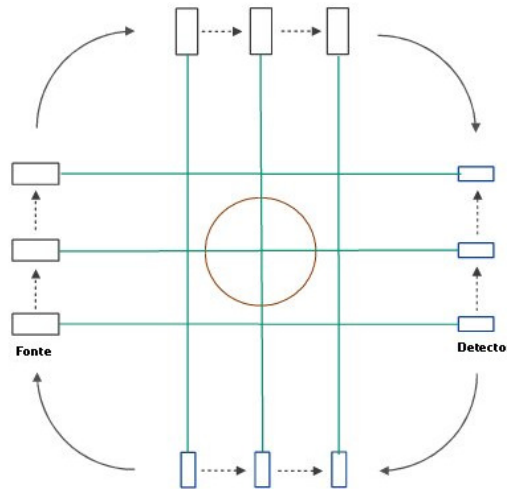


Figura A.2: Processo de aquisição de um tomógrafo de primeira geração.

Entretanto, esta geração apresenta as seguintes desvantagens:

- Processo de varredura muito demorado.
- Apenas uma fatia é coletada a cada varredura.

## A.2. Segunda Geração

A segunda geração de tomógrafos de raios X caracteriza-se por utilizar vários detectores dispostos em forma linear. Esta geometria, apresentada na Figura A.3, é chamada de feixe em leque estreito (*narrow fan beam*). O feixe de raios X em leque geralmente forma um pequeno ângulo (em torno de  $10^\circ$ ).

Nesta configuração, o conjunto de detectores realiza varias medidas simultaneamente. Ainda são necessários movimentos de translação e rotação para varrer toda a extensão do objeto. No entanto, devido ao uso de vários detectores, o incremento angular a cada rotação é maior, resultando em um número menor de rotações por varredura. Assim, a principal vantagem desta geometria em relação à primeira geração de tomógrafo é o seu tempo de coleta de dados.

Os tomógrafos de segunda geração apresentam duas desvantagens:

- Geralmente existem pequenas variações entre as respostas dos detectores. Este fator, se não corrigido por *software*, causa artefatos nas imagens finais.
- Como o raio interno do feixe de raios X deve tocar a superfície do objeto no início e no final de cada translação, dados inúteis são sempre coletados no processo de varredura.

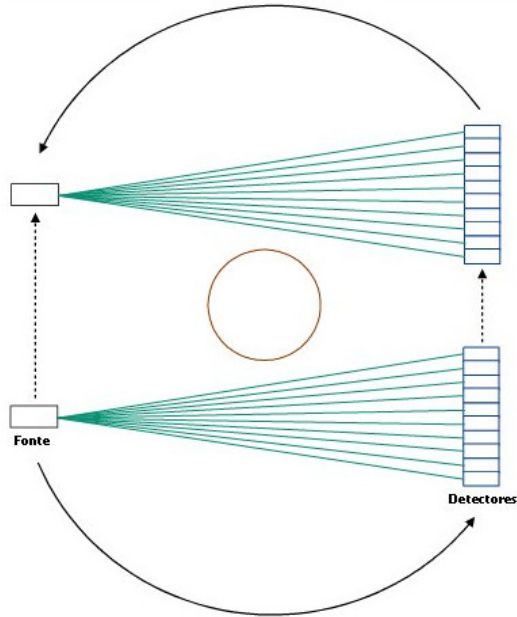


Figura A.3: Segunda geração de tomógrafo.

### A.3. Terceira Geração

A terceira geração de tomógrafos, assim como a segunda, emprega vários detectores. Entretanto, esta configuração utiliza um numero maior de detectores, de maneira a cobrir toda a seção transversal do objeto em análise. Como mostra a Figura A.4, os detectores são dispostos ao longo de um arco de circunferência com centro na fonte de raios X.

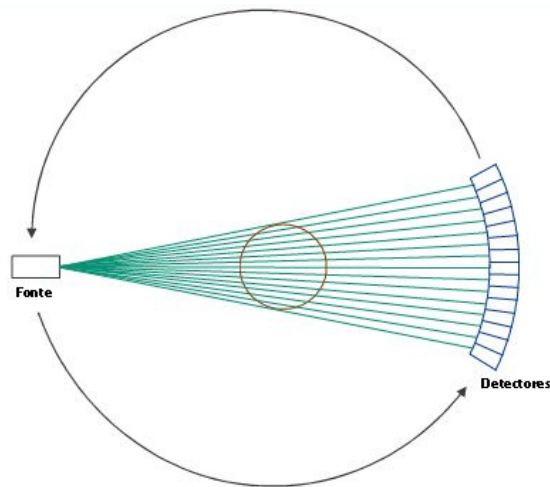


Figura A.4: Terceira geração de tomógrafo.

A terceira geração requer apenas um movimento de rotação para a coleta de dados. Portanto, em relação à primeira e à segunda gerações, a terceira geração apresenta como principais vantagens um sistema mecânico mais simples e um menor tempo de varredura.

O número fixo e maior de detectores de um sistema tomográfico de terceira geração traz algumas desvantagens:

- O diâmetro máximo do objeto a ser escaneado é limitado pelo número de detectores. Isto não acontecia na primeira e na segunda gerações, graças ao movimento de translação empregado por estas configurações.
- Quando objetos menores são escaneados, é coletada uma certa quantidade de dados inúteis, já que o feixe em leque cobre uma área maior.
- O espaçamento entre cada raio de uma projeção é fixado e limitado pelo número de detectores.
- Diferenças de resposta entre um detector e outro causam artefatos em forma de circunferência.
- Em relação às gerações anteriores, este sistema é mais caro devido ao maior número de detectores empregados.

#### A.4. Quarta Geração

A quarta geração, ilustrada na Figura A.5, é composta por uma circunferência de detectores, com a fonte de raios X colocada no seu interior. Assim, basta rotacionar a fonte ao redor do objeto (ou, quando possível, deixar a fonte fixa e rotacionar apenas o objeto) para coletar os dados. Esta configuração utiliza um número muito grande de detectores.

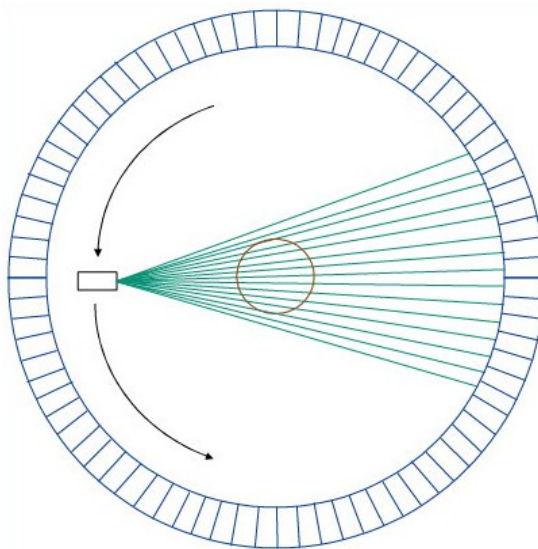


Figura A.4: Quarta geração de tomógrafo.

As vantagens da quarta geração são as seguintes:

- Todos os pontos de cada projeção são adquiridos simultaneamente.
- Por requerer apenas um movimento de rotação, o sistema mecânico para movimentar a fonte de raios X (ou o objeto) é simples.

- Reduzindo tempo de varredura graças ao simples movimento de rotação ao feixe em leque cobrindo todo o objeto.

Por outro lado, a quarta geração possui as seguintes limitações:

- O tamanho do corpo em estudo é limitado pelo feixe em leque produzindo pela fonte de raios X.
- Varreduras de objetos menores que o tamanho máximo resultam em coleta de dados desnecessários.
- Custo muito elevado devido ao grande número de detectores.
- Número de raios por projeção, limitado pelo número de detectores coberto pelo feixe em leque limitado a resolução espacial do sistema.

Existem algumas variações de tomógrafos de terceira e quarta geração. A tomografia helicoidal, também conhecida como tomografia espiral, é bastante utilizada em medicina. Nesta modalidade, a fonte de raios X gira em torno do paciente ao mesmo tempo em que este é continuamente movimentado para dentro da abertura do tomógrafo. Deste modo, a fonte realiza um percurso helicoidal em relação ao corpo do paciente. Um algoritmo apropriado permite reconstruir uma imagem tridimensional do corpo ou objeto em estudo.

A tomografia helicoidal subdivide-se em tomografia helicoidal de faixa única (*single slice*) e tomografia helicoidal multi-fatias (*multi-slices*). Como o próprio nome sugere, enquanto a tomografia helicoidal de fatia única apenas utiliza uma linha de detectores, a tomografia helicoidal multi-fatias emprega várias linhas de detectores. Desta forma, a tomografia multi-fatias permite coletar a cada aquisição um conjunto de dados correspondente a um volume inteiro, resultando na reconstrução de um número maior de imagens que na tomografia de fatia única.

### A.5. Quinta Geração

Esta configuração é pouco comum e difere bastante das gerações anteriores. Neste tomógrafo, não existe nenhuma parte móvel. Como apresenta a Figura A.6, um feixe de elétrons é gerado, atingindo um alvo em forma de arco e produzindo um feixe de raios X. A direção do feixe de elétrons é controlada por uma bobina. Assim, os elétrons varrem o alvo de um extremo a outro, produzindo raios X em diferentes direções.

Uma vez que o feixe de elétrons pode ser defletido muito rapidamente, a quinta geração apresenta tempos de varredura extremamente baixos (na ordem de milissegundos). Estes sistemas também são conhecidos como *ultrafast* CT (tomografia computadorizada ultra-rápida), *milisecond* CT (tomografia computadorizada de milissegundo) ou *elétron beam* CT (tomografia computadorizada de feixe de elétrons).

## APÊNDICE B PARÂMETROS DE QUALIDADE DE IMAGENS

### B.1. Ruído

Em radiografia e tomografia, o ruído pode degradar significativamente a qualidade de uma imagem. A influência do ruído em uma imagem pode ser medida pela relação sinal-ruído (SNR *signal-to-noise ratio*). O ruído é geralmente causado pelos seguintes fatores:

- Variação da intensidade da fonte de raios X.
- Variação de brilho da imagem de saída do intensificador de imagens.
- Variação dos tons de cinza da imagem registrada pela câmera CCD.

A relação sinal-ruído representa o quanto o ruído prejudica a informação contida em uma imagem. Quanto maior o seu valor, menor a influência prejudicial causada pelo ruído. A Figura B.1 mostra uma imagem com diferentes relações sinal-ruído.

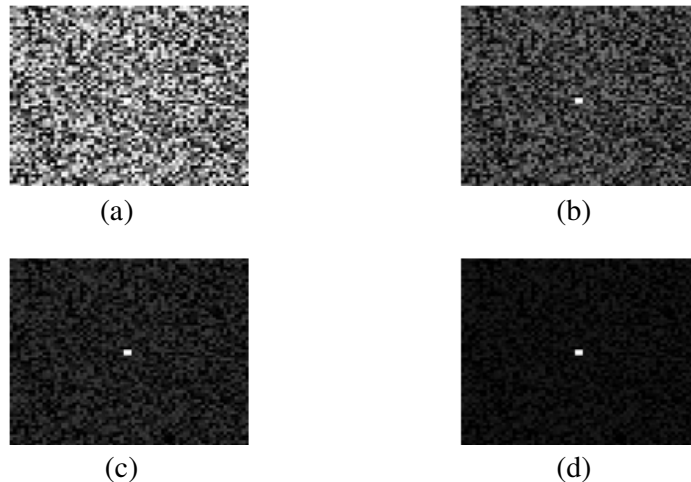


Figura B.1: Exemplos de diferentes relações sinal-ruído e suas influências em uma imagem. Observe-se que, em (a), a região clara central é quase indistinguível.

Uma maneira de reduzir o ruído em uma imagem consiste em tomar a média de um certo número de quadros. Como o ruído é aleatório e com média nula, ao somar os valores dos pixels de uma imagem, o ruído tende a se cancelar. Este método é também

conhecido como *overlay*. A Figura B.2 apresenta um exemplo de radiografia de um isolador polimérico sem e com redução de ruído. O quadro a esquerda mostra uma imagem capturada por uma câmera CCD. O quadro da direita mostra uma imagem resultante da média de 10 quadros. Observe-se que o quadro da direita apresenta uma menor variação de tons de cinza, ou uma maior relação sinal-ruído. Também são muito utilizados os chamados filtros, como por exemplo, o filtro da mediana, gaussiano, etc. os quais são aplicados sobre um mesmo quadro usando uma janela de tamanho 3x3, 5x5, etc. dependendo do resultado que se quer obter. Para o caso 3D são aplicados variações dos filtros 2D ampliando a resolução da janela do filtro, como por exemplo, 3x3x3, 5x5x5, etc.

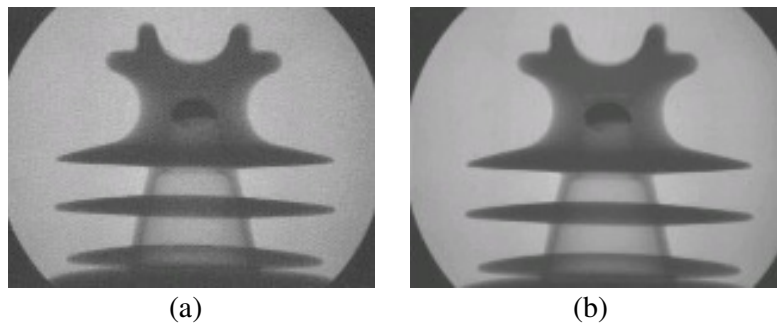


Figura B.2: Exemplos de redução de ruído por média em uma radiografia de isolador polimérico - (a) Radiografia sem média; (b) Radiografia com média de 10 quadros.

## B.2. Contraste

Contraste é a diferença de tom entre duas regiões vizinhas de uma imagem, e pode ser calculado pela Eq. B.1.

$$C(\%) = \frac{I_1 - I_2}{I_{\max} - I_{\min}} \times 100, \quad (\text{B.1})$$

Onde  $C$  é o contraste,  $I_1$  é a luminosidade da região mais clara,  $I_2$  é a luminosidade da região mais escura,  $I_{\max}$  é a maior luminosidade possível (branco total),  $I_{\min}$  é a menor luminosidade possível (preto total).

Em imagens de 8 bits,  $I_{\min}$  vale 0 e  $I_{\max}$  vale 255. A Figura B.3 apresenta um exemplo de contraste de 100% entre uma região branca e uma região preta. Neste caso,  $I_1 = 255$  e  $I_2 = 0$ .

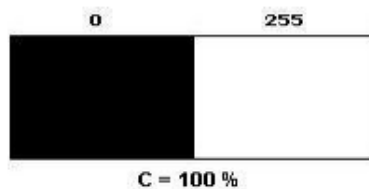


Figura B.3: Exemplo de contraste 100%.



À medida em que a diferença de tom entre as duas regiões é reduzida, o valor do contraste também diminui. Quanto menor o contraste, mais difícil torna-se diferenciar as regiões vizinhas (Figura B.4).

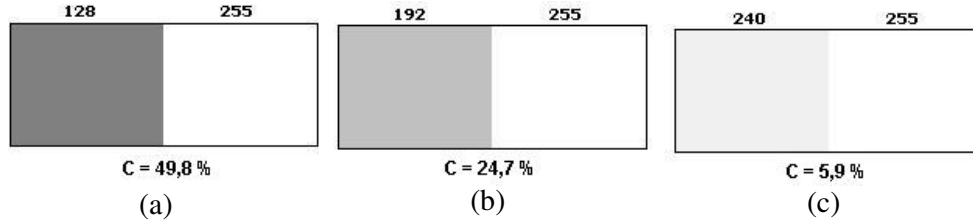


Figura B.4: Exemplo de contraste (a) 49,8%, (b) 24,7% e (c) 5,9%.

## B.2. Resolução

A resolução de um dispositivo ou sistema representa sua capacidade de apresentar fielmente pequenos detalhes ou variações de uma imagem. A resolução pode ser expressa em diversas unidades: pixels/mm, pixels/polegada, pares de linha/mm, etc. Existem dois tipos de resolução: resolução de alto contraste e resolução de baixo contraste.

- **Resolução de Alto Contraste**

A resolução de alto contraste representa a capacidade de um sistema de apresentar fielmente imagens com grandes variações de intensidades. Um método comumente empregado para determinar a resolução de alto contraste de um dispositivo consiste em observar a imagem de uma seqüência de linhas escuras e claras alternadas (de forma a produzir altos valores de contraste), como mostra a Figura B.5.



Figura B.5: Padrão para medição de resolução.

Os primeiros pares de linhas são facilmente distinguíveis. À medida que se caminha para a direita, os pares de linha tornam-se cada vez mais próximos. Em outras palavras, a frequência espacial da imagem (o número de pares de linha por unidade de comprimento) aumenta. Como consequência, torna-se mais difícil distinguir uma linha escura de uma linha escura vizinha. Neste método, a resolução é geralmente expressa em pares de linha/mm.

Em tomografia, a resolução de alto contraste de um sistema pode ser encontrada utilizando um corpo de prova com vários furos de diversos diâmetros. Realizam-se assim tomografias do corpo de prova, e observa-se o menor furo distinguível na tomografia. A Figura B.6 mostra uma fotografia de um corpo de prova de acrílico (a) e uma tomografia do corpo de prova (b).

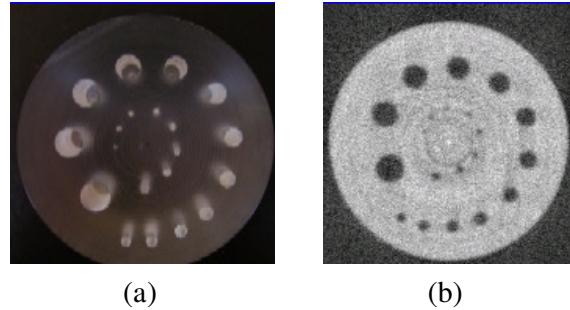


Figura B.6: Fotografia (a) e tomografia (b) de um corpo de prova de acrílico.

- **Resolução de Baixo Contraste**

A resolução de baixo contraste representa a capacidade de um sistema de apresentar detalhes com pequenas variações de intensidades. Em radiografia e tomografia, este parâmetro é a capacidade de mostrar pequenas variações de coeficientes de atenuação. A resolução de baixo contraste deve ser expressa em termos do tamanho do menor detalhe e do contraste em relação ao meio (por exemplo, 1 mm a 1%).

Um método comum para determinar a resolução de baixo contraste de um tomógrafo consiste em utilizar um *phantom* cilíndrico com diversos furos de diferentes diâmetros. Os furos devem ser preenchidos com líquidos de coeficientes de atenuação próximos ao coeficiente do acrílico, como glicerina. O menor furo distinguível fornece a resolução de baixo contraste (Figura B.7).

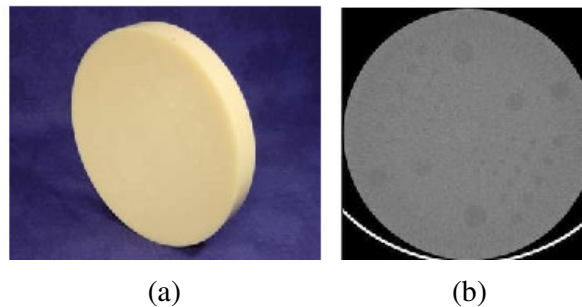


Figura B.7: (a) *Phantom* para determinação de resolução de baixo contraste, (b) Seção interna do padrão.