

UM NOVO MÉTODO PARA ESTUDOS DINÂMICOS, *IN SITU*, DA INFILTRAÇÃO DA ÁGUA NA REGIÃO NÃO-SATURADA DO SOLO

João de Mendonça Naime

Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências da Engenharia Ambiental.

ORIENTADOR: Dr. Silvio Crestana

São Carlos

2001

Dedico este trabalho

Aos meus pais, Francisco José e Anna Cecilia,
à minha esposa Nídia e aos meus filhos
Mariana e Pedro com muito amor e gratidão.

AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Silvio Crestana, pela orientação deste trabalho, pela confiança depositada, pelos exemplos positivos de ser humano, de pesquisador, de conduta ética e de dedicação à Embrapa e ao Brasil.

Ao Dr. Álvaro Macedo da Silva que, como colaborador, conselheiro acadêmico e amigo, me ajudou a lutar contra minhas limitações técnicas e pessoais. Contribuiu muito para o desenvolvimento do programa de reconstrução de imagens, na coleta de amostras no campo e nas discussões sobre todos os assuntos pertinentes a este trabalho.

À Embrapa, na pessoa do Chefe Geral da Embrapa Instrumentação Agropecuária, pelo grande apoio institucional e financeiro.

Ao CRHEA, pelo apoio institucional e pela formação multidisciplinar direcionada à proteção do meio ambiente.

Ao Dr. Paulo Estevão Cruvinel, pelas discussões, pelas sugestões e por disponibilizar sua vasta experiência em tomografia computadorizada e processamento de imagens.

Ao Dr. Carlos Manoel Pedro Vaz, pelas discussões sobre Física do Solo no preparo das amostras e na interpretação dos resultados.

Ao Dr. Luiz Alberto Colnago, pelas discussões e pelo apoio ao desenvolvimento do trabalho.

Ao Dr. Yakov A. Pachepsky, pelo desenvolvimento do modelo matemático necessário à interpretação dos resultados dos experimentos de infiltração de água no solo.

À Dra. Rosane Minghim e ao Dr. Luis Gustavo Nonato, pela permissão do uso do programa de reconstrução 3D desenvolvido pelo grupo de computação de alto desempenho do ICMC-SC USP.

Ao MSc. Lucio André de Castro Jorge, pelas contribuições ao desenvolvimento do programa de reconstrução de imagens tomográficas.

Ao Dr. Ricardo Tadeu Lopes, pelas discussões e sugestões sobre sistemas de detecção de radiação.

Ao José Ferrazini Junior e ao Gilmar Victorino, pela presteza e qualidade na confecção dos circuitos eletrônicos.

Ao Valentim Monzane, pelo excelente projeto do sistema mecânico de varredura.

Ao Luis Aparecido de Godoy e ao Jorge Novi que, além da precisa construção do sistema mecânico, participaram ativamente com importantes sugestões.

Ao Dr. José Roberto Ruggiero, pelo auxílio na revisão do texto e sugestões.

Ao Dr. Washington Luiz de Barros Melo, pelas discussões sobre óptica aplicada à detecção de radiação.

Ao Dr. Roberto Cesareo, pelas discussões sobre tomografia e detectores de radiação.

Ao Dr. Donald R. Nielsen, pelas discussões sobre as medidas de infiltração.

Ao Dr. Marcelo Damy de Souza Santos e à Dra. Carmem Cecilia Bueno Tobias, pelas discussões sobre detectores de radiação.

A todos os colegas da Embrapa Instrumentação Agropecuária, pelo apoio, amizade, incentivo e ótimo ambiente de trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	vii
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	x
LISTA DE SÍMBOLOS	xi
RESUMO	xiii
ABSTRACT	xiv
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 A IMPORTÂNCIA DE ESTUDAR O MOVIMENTO DA ÁGUA E DE SOLUTOS NO SOLO	2
1.2 POLUIÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA	7
1.2.1 Fertilizantes	8
1.2.2 Pesticidas	9
1.2.3 Movimento de água e solutos no solo	10
1.3 OBJETIVO	13
1.4 DESCRIÇÃO SUCINTA DO CONTEÚDO DE CADA CAPÍTULO	13
2 O SOLO E OS PROCESSOS HIDROLÓGICOS QUE NELE OCORREM	15
2.1 MACROPOROS	19
2.2 INFILTRAÇÃO EM SOLO HOMOGÊNEO	21
2.2.1 Infiltração horizontal	26
2.2.2 Infiltração vertical	30
2.3 MEDIDA DAS FUNÇÕES HIDRÁULICAS DO SOLO	31
2.3.1 Métodos experimentais	32
3 A TOMOGRAFIA COMO METODOLOGIA DE ESTUDO DA INFILTRAÇÃO DA ÁGUA NO SOLO	37
3.1 APLICAÇÃO DA TOMOGRAFIA EM FÍSICA DOS SOLOS	37
3.2 TOMÓGRAFOS DEDICADOS A ESTUDOS DE SOLOS	38
3.3 PRINCÍPIOS DA TOMOGRAFIA	39
3.4 MÉTODO DA RETROPROJEÇÃO FILTRADA PARA FEIXE EM LEQUE E ARRANJO LINEAR DE DETECTORES	42
4 MATERIAIS E MÉTODOS	51
4.1 METODOLOGIA DE ESTUDO DO AVANÇO DA FRENTE DE MOLHAMENTO EM SOLOS	51

4.1.1 Solução numérica da equação de Richards	52
4.1.2 Modelo “Retenção de água-condutividade hidráulica”	53
4.2 CONSTRUÇÃO DO TOMÓGRAFO	55
4.2.1 Fonte radioativa	57
4.2.2 Detector de radiação	57
4.2.3 Sistema eletrônico	60
4.2.4 Sistema mecânico de posicionamento	63
4.2.5 Programas de computador desenvolvidos para o tomógrafo	64
4.3 MATERIAIS E MÉTODOS REFERENTES À VALIDAÇÃO DO TOMÓGRAFO E AOS EXPERIMENTOS DE INFILTRAÇÃO EM AMOSTRAS DE SOLOS DESESTRUTURADOS	67
4.4 EXPERIMENTOS EM LABORATÓRIO COM AMOSTRAS DE SOLO ESTRUTURADO	69
4.5 EXPERIMENTO EM CAMPO	71
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	74
5.1 VALIDAÇÃO DO TOMÓGRAFO	74
5.1.1 Calibração	74
5.1.2 Repetibilidade das medidas	75
5.1.3 Verificação da resposta do tomógrafo em função da variação da umidade do solo	76
5.1.4 Infiltração: tomografias em posição fixa	79
5.1.5 Infiltração: tomografias em diversas posições de uma amostra desestruturada	81
5.2 RESULTADOS DOS EXPERIMENTOS COM AMOSTRAS DE SOLO ESTRUTURADO EM LABORATÓRIO E EM CAMPO	84
5.3 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES	126
5.4 TRABALHOS FUTUROS	128
ANEXO A	130
ANEXO B	132
ANEXO C	134
ANEXO D	135
ANEXO E	137
ANEXO F	138
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	140

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Diagrama mostrando a importância da escala e alguns métodos de medida utilizados em solos. Adaptado por Crestana (1997), de Sposito & Reginato (1992). _____	5
Figura 2 -	Esquema geral, mostrando a complexidade da avaliação de compostos orgânicos distribuídos no ambiente. Adaptado por Crestana (1997), de Schwarzenbach et al. (1993). _____	7
Figura 3 -	Tortuosidade de um macroporo do solo. _____	20
Figura 4 -	Perfil de umidade do solo, num tempo t genérico após o início da infiltração. (Prevedello, 1996) _____	23
Figura 5 -	Curvas de infiltração acumulada e instantânea (Kutflék & Nielsen, 1994). _____	24
Figura 6 -	Elemento de volume definido para determinar a taxa de variação da umidade com o tempo através da equação da continuidade. _____	25
Figura 7 -	Coluna horizontal infinita de seção transversal constante preenchida com solo homogêneo. _____	26
Figura 8 -	Curva de $\theta(x)$ para um dado instante t durante a infiltração horizontal em um solo homogêneo com umidade inicial θ_i . _____	28
Figura 9 -	Transformação de Boltzmann reduz os perfis de umidade do solo $\theta(x)$ para diferentes tempos t a um único perfil $\theta(\eta)$ com $\eta=xt^{-1/2}$ para infiltração horizontal (absorção). As linhas tracejadas representam um “solo linear”, D constante, enquanto as linhas contínuas são para um solo com $D(\theta)$. (Kutflék & Nielsen, 1994). _____	29
Figura 10 -	Influências dos potenciais gravitacional e matricial durante a infiltração (Kunze & Nielsen, 1982). _____	31
Figura 11 -	Movimentos de varredura na tomografia computadorizada (Hendee, 1984). _____	39
Figura 12 -	Plano de uma varredura axial da tomografia computadorizada. _____	40
Figura 13 -	Caminhos L percorridos pelos fótons de um feixe em leque. _____	41
Figura 14 -	Representação das projeções de um feixe em leque. _____	43
Figura 15 -	Representação de uma projeção $R_\beta(s)$ na posição angular β . _____	44
Figura 16 -	Ilustração de parâmetros utilizados na dedução do algoritmo de reconstrução de imagem para detectores igualmente espaçados. _____	45
Figura 17 -	Para uma célula localizada nas coordenadas polares (r,ϕ) , a variável U é a razão entre a distância FP , projeção de FE sobre o raio central, e a distância entre fonte e centro (D). _____	46

Figura 18 -	Função de transferência do filtro $H(w) = w $, frequência de corte $1/(2a)$.	48
Figura 19 -	Esquema do TC portátil, com sistema de varredura de 3ª geração, instalado em torno de um monolito de solo.	56
Figura 20 -	Detalhe dos fotodiodos apresentados na Tabela 2.	59
Figura 21 -	Placa CPU do PC/104.	61
Figura 22 -	Foto da montagem do sistema eletrônico do tomógrafo. Acima, à direita, está a placa de comando dos motores e do detector; abaixo à direita está a montagem do PC/104 com a placa de alimentação conectada sobre a CPU. À esquerda, na tampa, vêem-se as fontes reguladas.	62
Figura 23 -	Sistema mecânico de varredura do tomógrafo.	63
Figura 24 -	Ruído de fundo dos fotodiodos (sem radiação), sinal obtido com o detector exposto ao feixe livre e a diferença entre as duas situações. O tempo de integração é de 1s.	65
Figura 25 -	Tela principal do programa de reconstrução e visualização de imagem.	66
Figura 26 -	Escavação para retirada de bloco de solo.	69
Figura 27 -	Corte e raspagem do bloco de solo para retirada de amostra cilíndrica.	70
Figura 28 -	Amostra de solo estruturado parafinada dentro de tubo de PVC, vista durante a varredura tomográfica.	71
Figura 29 -	Trincheira escavada no solo e monolito antes de ser desbastado.	72
Figura 30 -	Dimensões do monolito de solo desbastado.	72
Figura 31 -	Tomógrafo portátil realizando varredura tomográfica durante o processo de infiltração de água.	73
Figura 32 -	Reta de calibração do tomógrafo, equação da reta e coeficiente de correlação (R^2).	74
Figura 33 -	Imagens tomográficas de amostras homogêneas de água, solo, teflon, tubo de PVC e alumínio, utilizadas para calibração do tomógrafo.	75
Figura 34 -	Gráfico da variação do μ em função da umidade para um solo LVA.	77
Figura 35 -	Erro percentual na determinação de μ em função da umidade.	77
Figura 36 -	Tomografia de uma coluna de solo de seção quadrada com uma placa de separação na direção diagonal. A região superior à diagonal está seca e a inferior úmida. No lado direito é apresentada a imagem segmentada.	78
Figura 37 -	Perfis de densidades da amostra obtidos com o tomógrafo e com o analisador granulométrico.	79
Figura 38 -	Variação da umidade a 93,5mm abaixo da superfície durante a infiltração da água.	80
Figura 39 -	Evolução do umedecimento da seção do solo situada a 93,5mm abaixo da superfície.	80
Figura 40 -	(a) perfil de densidades e (b) perfil de umidades nas seqüências de medidas durante infiltração.	81
Figura 41 -	Curvas de infiltração, medida e estimada, do LRd deformado.	82
Figura 42 -	Perfil de umidade durante infiltração (a) e curva de retenção da água no solo (b).	83
Figura 43 -	Condutividade hidráulica e difusividade em função da umidade do solo.	83

Figura 44 - Gráficos do perfil de densidades do solo seco (a), da umidade durante a infiltração (b, c e d) e do volume infiltrado (e), para a medida em campo na área do plantio convencional. _____	86
Figura 45 - Reconstrução 3-D de 3 seqüências de varreduras obtidas durante a infiltração da água, no experimento em campo na área de plantio convencional. _____	87
Figura 46 - Curvas de infiltração, medida e estimada, da amostra PC em campo. _____	87
Figura 47 - Amostra PC em campo. Perfil de umidade durante infiltração (a) e curva de retenção da água no solo (b). _____	88
Figura 48 - Condutividade hidráulica e difusividade em função da umidade do solo. Amostra PC em campo. _____	88
Figura 49 - Gráficos do perfil de densidades do solo seco, da umidade durante a infiltração e do volume infiltrado para a medida em laboratório da amostra PC1. _____	89
Figura 50 - Reconstrução 3-D de 3 seqüências de varreduras obtidas durante a infiltração da água na amostra PC1. _____	89
Figura 51 - Curvas de infiltração, medida e estimada, da amostra PC1. _____	90
Figura 52 - Amostra PC1. Perfil de umidade durante infiltração (a) e curva de retenção da água no solo (b). _____	90
Figura 53 - Condutividade hidráulica e difusividade em função da umidade do solo. Amostra PC1. _____	90
Figura 54 - Gráficos do perfil de densidades do solo seco, da umidade durante a infiltração e do volume infiltrado para a medida em laboratório da amostra PC2. _____	91
Figura 55 - Reconstrução 3-D de 3 seqüências de varreduras obtidas durante a infiltração da água na amostra PC2. _____	92
Figura 56 - Curvas de infiltração, medida e estimada, da amostra PC2. _____	92
Figura 57 - Amostra PC2. Perfil de umidade durante infiltração (a) e curva de retenção da água no solo (b). _____	93
Figura 58 - Condutividade hidráulica e difusividade em função da umidade do solo. Amostra PC2. _____	93
Figura 59 - Gráficos do perfil de densidades do solo seco, da umidade durante a infiltração e do volume infiltrado para a medida em laboratório da amostra PC3. _____	94
Figura 60 - Reconstrução 3-D de 3 seqüências de varreduras obtidas durante a infiltração da água na amostra PC3. _____	94
Figura 61 - Curvas de infiltração, medida e estimada, da amostra PC3. _____	95
Figura 62 - Amostra PC3. Perfil de umidade durante infiltração (a) e curva de retenção da água no solo (b). _____	95
Figura 63 - Condutividade hidráulica e difusividade em função da umidade do solo. Amostra PC3. _____	96
Figura 64 - Gráficos do perfil de densidades do solo seco, da umidade durante a infiltração e do volume infiltrado para a medida em laboratório da amostra PC4. _____	97

Figura 65 -	Reconstrução 3-D de 3 seqüências de varreduras obtidas durante a infiltração da água na amostra PC4. _____	97
Figura 66 -	Curvas de infiltração, medida e estimada, da amostra PC4. _____	98
Figura 67 -	Amostra PC4. Perfil de umidade durante infiltração (a) e curva de retenção da água no solo (b). _____	98
Figura 68 -	Condutividade hidráulica e difusividade em função da umidade do solo. Amostra PC4. _____	98
Figura 69 -	Gráficos do perfil de densidades do solo seco, da umidade durante a infiltração e do volume infiltrado para a medida em laboratório da amostra PC5. _____	99
Figura 70 -	Reconstrução 3-D de 3 seqüências de varreduras obtidas durante a infiltração da água na amostra PC5. _____	100
Figura 71 -	Curvas de infiltração, medida e estimada, da amostra PC5. _____	100
Figura 72 -	Amostra PC5. Perfil de umidade durante infiltração (a) e curva de retenção da água no solo (b). _____	101
Figura 73 -	Condutividade hidráulica e difusividade em função da umidade do solo. Amostra PC5. _____	101
Figura 74 -	Gráficos do perfil de densidades do solo seco, da umidade durante a infiltração e do volume infiltrado para a medida em laboratório da amostra PD1. _____	102
Figura 75 -	Reconstrução 3-D de 3 seqüências de varreduras obtidas durante a infiltração da água na amostra PD1. _____	102
Figura 76 -	Curvas de infiltração, medida e estimada, da amostra PD1. _____	103
Figura 77 -	Amostra PD1. Perfil de umidade durante infiltração (a) e curva de retenção da água no solo (b). _____	103
Figura 78 -	Condutividade hidráulica e difusividade em função da umidade do solo. Amostra PD1. _____	104
Figura 79 -	Gráficos do perfil de densidades do solo seco, da umidade durante a infiltração e do volume infiltrado para a medida em laboratório da amostra PD2. _____	105
Figura 80 -	Reconstrução 3-D de 3 seqüências de varreduras obtidas durante a infiltração da água na amostra PD2. _____	105
Figura 81 -	Curvas de infiltração, medida e estimada, da amostra PD2. _____	106
Figura 82 -	Amostra PD2. Perfil de umidade durante infiltração (a) e curva de retenção da água no solo (b). _____	106
Figura 83 -	Condutividade hidráulica e difusividade em função da umidade do solo. Amostra PD2. _____	106
Figura 84 -	Gráficos do perfil de densidades do solo seco, da umidade durante a infiltração e do volume infiltrado para a medida em laboratório da amostra PD3. _____	107
Figura 85 -	Reconstrução 3-D de 3 seqüências de varreduras obtidas durante a infiltração da água na amostra PD3. _____	108
Figura 86 -	Curvas de infiltração, medida e estimada, da amostra PD3. _____	108

Figura 87 -	Amostra PD3. Perfil de umidade durante infiltração (a) e curva de retenção da água no solo (b).	109
Figura 88 -	Condutividade hidráulica e difusividade em função da umidade do solo. Amostra PD3.	109
Figura 89 -	Gráficos do perfil de densidades do solo seco, da umidade durante a infiltração e do volume infiltrado para a medida em laboratório da amostra PD4.	110
Figura 90 -	Reconstrução 3-D de 3 seqüências de varreduras obtidas durante a infiltração da água na amostra PD4.	110
Figura 91 -	Curvas de infiltração, medida e estimada, da amostra PD4.	111
Figura 92 -	Amostra PD4. Perfil de umidade durante infiltração (a) e curva de retenção da água no solo (b).	111
Figura 93 -	Condutividade hidráulica e difusividade em função da umidade do solo. Amostra PD4.	112
Figura 94 -	Gráficos do perfil de densidades do solo seco, da umidade durante a infiltração e do volume infiltrado para a medida em laboratório da amostra PD5.	113
Figura 95 -	Reconstrução 3-D de 3 seqüências de varreduras obtidas durante a infiltração da água na amostra PD5.	113
Figura 96 -	Curvas de infiltração, medida e estimada, da amostra PD5.	114
Figura 97 -	Amostra PD5. Perfil de umidade durante infiltração (a) e curva de retenção da água no solo (b).	114
Figura 98 -	Condutividade hidráulica e difusividade em função da umidade do solo. Amostra PD5.	114
Figura 99 -	Gráficos do perfil de densidades do solo seco, da umidade durante a infiltração e do volume infiltrado para a medida em laboratório da amostra M1.	115
Figura 100 -	Reconstrução 3-D de 3 seqüências de varreduras obtidas durante a infiltração da água na amostra M1.	116
Figura 101 -	Gráficos do perfil de densidades do solo seco, da umidade durante a infiltração e do volume infiltrado para a medida em laboratório da amostra M2.	117
Figura 102 -	Reconstrução 3-D de 3 seqüências de varreduras obtidas durante a infiltração da água na amostra M2.	117
Figura 103 -	Curvas de infiltração, medida e estimada, da amostra M2.	118
Figura 104 -	Amostra M2. Perfil de umidade durante infiltração (a) e curva de retenção da água no solo (b).	118
Figura 105 -	Condutividade hidráulica e difusividade em função da umidade do solo. Amostra M2.	118
Figura 106 -	Gráficos do perfil de densidades do solo seco, da umidade durante a infiltração e do volume infiltrado para a medida em laboratório da amostra M3.	119
Figura 107 -	Reconstrução 3-D de 3 seqüências de varreduras obtidas durante a infiltração da água na amostra M3.	120

Figura 108 - Curvas de infiltração, medida e estimada, da amostra M3. _____	120
Figura 109 - Amostra M3. Perfil de umidade durante infiltração (a) e curva de retenção da água no solo (b). _____	121
Figura 110 - Condutividade hidráulica e difusividade em função da umidade do solo. Amostra M3. _____	121
Figura 111 - Gráficos do perfil de densidades do solo seco, da umidade durante a infiltração e do volume infiltrado para a medida em laboratório da amostra M4. _____	122
Figura 112 - Reconstrução 3-D de 3 seqüências de varreduras obtidas durante a infiltração da água na amostra M4. _____	122
Figura 113 - Curvas de infiltração, medida e estimada, da amostra M4. _____	123
Figura 114 - Amostra M4. Perfil de umidade durante infiltração (a) e curva de retenção da água no solo (b). _____	123
Figura 115 - Condutividade hidráulica e difusividade em função da umidade do solo. Amostra M4. _____	123
Figura 116 - Gráficos do perfil de densidades do solo seco, da umidade durante a infiltração e do volume infiltrado para a medida em laboratório da amostra M5. _____	124
Figura 117 - Reconstrução 3-D de 3 seqüências de varreduras obtidas durante a infiltração da água na amostra M5. _____	125
Figura 118 - Curvas de infiltração, medida e estimada, da amostra M5. _____	125
Figura 119 - Amostra M5. Perfil de umidade durante infiltração (a) e curva de retenção da água no solo (b). _____	126
Figura 120 - Condutividade hidráulica e difusividade em função da umidade do solo. Amostra M5. _____	126
Figura 121 - Esquema de um tensiômetro acoplado a um manômetro de mercúrio ou a um vacuômetro. _____	130
Figura 122 - Feixes paralelos: o raio-soma que passa pelo ponto (x,y) medido no ângulo θ é igual àquele medido no ângulo $\theta+\pi$, medidos na posição $ t $. _____	132
Figura 123 - Feixe em leque: nas posições angulares β e $\beta+\pi$ os raios-soma medidos têm caminhos diferentes e são obtidos por detectores em posições (s) diferentes. _____	133
Figura 124 - <i>Aliasing</i> devido à baixa freqüência de amostragem. A linha cheia representa o sinal de entrada e a linha tracejada representa o sinal obtido na conversão com intervalo de amostragem a . _____	134
Figura 125 - Esquema de um fotodiodo de silício. _____	135
Figura 126 - Características corrente x tensão do fotodiodo. _____	136

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Comparação do tempo de aquisição de dados para quatro gerações de tomógrafos. __	39
Tabela 2 -	Especificações mecânicas dos PDAs. _____	59
Tabela 3 -	Dados da reta de calibração do tomógrafo e o coeficiente de variação em torno do valor médio de UT. _____	74
Tabela 4 -	μ médio de 30 tomografias repetidas em uma única seção transversal de um solo LVA. _____	76
Tabela 5 -	Unidade das amostras, μ médio de 6 tomografias em cada amostra, em posições diferentes, e coeficiente de variação das 6 medidas. _____	76
Tabela 6 -	Comparação da tomografia com TDR e GPR aplicados à medida de umidade. _____	78
Tabela 7 -	Parâmetros de entrada e saída do programa (algoritmo Marquardt) e parâmetros do modelo Rossi & Nimmo (1994). Amostra deformada. _____	82
Tabela 8 -	Correlação da curva de infiltração estimada com os valores medidos e equações de ajuste de I e q com os respectivos R^2 e RMSE. _____	82
Tabela 10 -	Parâmetros de entrada e saída do programa (algoritmo Marquardt) e parâmetros do modelo Rossi & Nimmo (1994). Medida em campo. θ em $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ e h em cm. _____	87
Tabela 11 -	Amostra PC em campo. Correlação da curva de infiltração estimada com os valores medidos e equações de ajuste de I e q com os respectivos R^2 e RMSE. _____	87
Tabela 12 -	Parâmetros de entrada e saída do programa (algoritmo Marquardt) e parâmetros do modelo Rossi & Nimmo (1994). Amostra PC1. θ em $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ e h em cm. _____	89
Tabela 13 -	Amostra PC1. Correlação da curva de infiltração estimada com os valores medidos e equações de ajuste de I e q com os respectivos R^2 e RMSE. _____	89
Tabela 14 -	Parâmetros de entrada e saída do programa (algoritmo Marquardt) e parâmetros do modelo Rossi & Nimmo (1994). Amostra PC2. θ em $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ e h em cm. _____	92
Tabela 15 -	Amostra PC2. Correlação da curva de infiltração estimada com os valores medidos e equações de ajuste de I e q com os respectivos R^2 e RMSE. _____	92
Tabela 16 -	Parâmetros de entrada e saída do programa (algoritmo Marquardt) e parâmetros do modelo Rossi & Nimmo (1994). Amostra PC3. θ em $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ e h em cm. _____	95
Tabela 17 -	Amostra PC3. Correlação da curva de infiltração estimada com os valores medidos e equações de ajuste de I e q com os respectivos R^2 e RMSE. _____	95
Tabela 18 -	Parâmetros de entrada e saída do programa (algoritmo Marquardt) e parâmetros do modelo Rossi & Nimmo (1994). Amostra PC4. θ em $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ e h em cm. _____	97

Tabela 19 - Amostra PC4. Correlação da curva de infiltração estimada com os valores medidos e equações de ajuste de I e q com os respectivos R^2 e RMSE. _____	97
Tabela 20 - Parâmetros de entrada e saída do programa (algoritmo Marquardt) e parâmetros do modelo Rossi & Nimmo (1994). Amostra PC5. θ em $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ e h em cm. _____	100
Tabela 21 - Amostra PC5. Correlação da curva de infiltração estimada com os valores medidos e equações de ajuste de I e q com os respectivos R^2 e RMSE. _____	100
Tabela 22 - Parâmetros de entrada e saída do programa (algoritmo Marquardt) e parâmetros do modelo Rossi & Nimmo (1994). Amostra PD1. θ em $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ e h em cm. _____	103
Tabela 23 - Amostra PD1. Correlação da curva de infiltração estimada com os valores medidos e equações de ajuste de I e q com os respectivos R^2 e RMSE. _____	103
Tabela 24 - Parâmetros de entrada e saída do programa (algoritmo Marquardt) e parâmetros do modelo Rossi & Nimmo (1994). Amostra PD2. θ em $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ e h em cm. _____	105
Tabela 25 - Amostra PD2. Correlação da curva de infiltração estimada com os valores medidos e equações de ajuste de I e q com os respectivos R^2 e RMSE. _____	105
Tabela 26 - Parâmetros de entrada e saída do programa (algoritmo Marquardt) e parâmetros do modelo Rossi & Nimmo (1994). Amostra PD3. θ em $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ e h em cm. _____	108
Tabela 27 - Amostra PD3. Correlação da curva de infiltração estimada com os valores medidos e equações de ajuste de I e q com os respectivos R^2 e RMSE. _____	108
Tabela 28 - Parâmetros de entrada e saída do programa (algoritmo Marquardt) e parâmetros do modelo Rossi & Nimmo (1994). Amostra PD4. θ em $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ e h em cm. _____	111
Tabela 29 - Amostra PD4. Correlação da curva de infiltração estimada com os valores medidos e equações de ajuste de I e q com os respectivos R^2 e RMSE. _____	111
Tabela 30 - Parâmetros de entrada e saída do programa (algoritmo Marquardt) e parâmetros do modelo Rossi & Nimmo (1994). Amostra PD5. θ em $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ e h em cm. _____	113
Tabela 31 - Amostra PD5. Correlação da curva de infiltração estimada com os valores medidos e equações de ajuste de I e q com os respectivos R^2 e RMSE. _____	113
Tabela 32 - Parâmetros de entrada e saída do programa (algoritmo Marquardt) e parâmetros do modelo Rossi & Nimmo (1994). Amostra M2. θ em $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ e h em cm. _____	117
Tabela 33 - Amostra M2. Correlação da curva de infiltração estimada com os valores medidos e equações de ajuste de I e q com os respectivos R^2 e RMSE. _____	117
Tabela 34 - Parâmetros de entrada e saída do programa (algoritmo Marquardt) e parâmetros do modelo Rossi & Nimmo (1994). Amostra M3. θ em $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ e h em cm. _____	120
Tabela 35 - Amostra M3. Correlação da curva de infiltração estimada com os valores medidos e equações de ajuste de I e q com os respectivos R^2 e RMSE. _____	120
Tabela 36 - Parâmetros de entrada e saída do programa (algoritmo Marquardt) e parâmetros do modelo Rossi & Nimmo (1994). Amostra M4. θ em $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ e h em cm. _____	122
Tabela 37 - Amostra M4. Correlação da curva de infiltração estimada com os valores medidos e equações de ajuste de I e q com os respectivos R^2 e RMSE. _____	122

-
- Tabela 38 - Parâmetros de entrada e saída do programa (algoritmo Marquardt) e parâmetros do modelo Rossi & Nimmo (1994). Amostra M5. θ em $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ e h em cm. _____ 125
- Tabela 39 - Amostra M5. Correlação da curva de infiltração estimada com os valores medidos e equações de ajuste de I e q com os respectivos R^2 e RMSE. _____ 125

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D	- Analógico para Digital
bmp	- <i>Bitmap</i> (mapa de bits)
CCD	- <i>Charged Coupled Device</i> (dispositivo de cargas acopladas)
CMOS	- <i>Complementary Metal-Oxide Silicon</i> (transistor de efeito de campo de simetria complementar metal – óxido de silício)
CNPDIA	- Centro Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento de Instrumentação Agropecuária ou Embrapa Instrumentação Agropecuária
CP	- Coeficiente de Partição
CPU	- <i>Central Processing Unit</i> (unidade central de processamento)
DC/DC	- <i>Direct Current to Direct Current</i> (conversor de corrente contínua)
DLL	- <i>Dynamic Link Library</i> (Biblioteca de funções com ligação dinâmica)
EMBRAPA	- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EOS	- <i>End of Scan</i> (fim de varredura)
FAO	- <i>Food and Agriculture Organization – United Nations Organization</i>
Gd ₂ O ₂ S:Tb	- (GOS) Oxissulfídeo de gadolínio dopado com térbio
GPS	- <i>Global Positioning System</i> (sistema de posicionamento global)
LVA	- Latossolo Vermelho-Amarelo
LRd	- Latossolo Roxo Distrófico
PC	- <i>Personal Computer</i> (computador pessoal)
PDA	- <i>Photodiode Array</i> (arranjo de fotodiodos)
PVC	- <i>Polyvinyl Chloride</i> (cloreto de polivinila)
RAM	- <i>Random Access Memory</i> (memória de acesso aleatório)
ROM	- <i>Read Only Memory</i> (memória somente de leitura)
RMSE	- <i>Root Mean Square Error</i> (erro médio quadrático)
SSD	- <i>Solid State Disk</i> (disco-rígido de estado sólido)
TC	- Tomografia Computadorizada
TDR	- <i>Time Domain Reflectometry</i> (reflectometria no domínio do tempo)
TEC	- <i>Thermoelectric Cooler</i> (refrigerador termoelétrico)
USDA	- <i>United States Department of Agriculture</i> (Ministério da Agricultura dos E.U.A.)
UT	- Unidade Tomográfica

LISTA DE SÍMBOLOS

- A - área da seção transversal do solo
- A_a - área ocupada pela água
- a - intervalo de amostragem, distância entre detectores
- D - difusividade
- D - distância entre a fonte radioativa e o centro de rotação
- F - posição da fonte radioativa
- $f(r, \phi)$ - imagem retroprojetada em coordenadas polares
- $f(x, y)$ - imagem retroprojetada em coordenadas cartesianas
- $g(s)$ - metade da resposta a impulso do filtro
- H - potencial hidráulico ou carga hidráulica
- h - resultante de pressões
- $h(s)$ - resposta a impulso do filtro
- I_0 - número de fótons por segundo do feixe livre
- I - número de fótons por segundo do feixe atenuado
- I - infiltração acumulada
- k - condutividade hidráulica
- [L] - unidade de comprimento
- [M] - unidade de massa
- O - centro de rotação do tomógrafo
- P_θ - projeção do feixe paralelo
- q - densidade de fluxo ou taxa de infiltração
- Q - volume de água
- Q_β - projeção filtrada para feixe em leque
- R_β - projeção do feixe em leque no ângulo β
- r - módulo da coordenada polar
- S - sortividade
- s - eixo de projeção do feixe em leque

- [T] - unidade de tempo
- t - eixo de projeção do feixe paralelo
- V_a - volume de água
- w - frequência espacial de amostragem da projeção
- α - porosidade volumétrica
- β - ângulo de projeção do feixe em leque
- γ - ângulo entre um raio-soma e a normal à linha de detectores
- η - variável da Transformada de Boltzmann
- θ - umidade volumétrica
- θ - ângulo de projeção do feixe paralelo
- μ - coeficiente de atenuação linear
- μ^* - coeficiente de atenuação em massa
- v - velocidade real média
- ρ - densidade
- ϕ - ângulo das coordenadas polares
- Ψ_t - potencial total
- Ψ_g - potencial gravitacional
- Ψ_m - potencial matricial
- Ψ_o - potencial osmótico
- Ψ_p - potencial de pressão

RESUMO

NAIME, J.M. (2001). *Um novo método para estudos dinâmicos, in situ, da infiltração da água na região não-saturada do solo*. São Carlos, 2001. 145p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

A agricultura é a atividade humana que mais afeta o meio ambiente. Imensas quantidades de insumos agrícolas são aplicados sobre o solo e grande parte destes degrada os recursos hídricos. Para uma investigação adequada do efeito destes insumos, estudam-se as propriedades hidráulicas do solo, que influem no transporte de solutos neste meio. Medir tais propriedades e modelar os parâmetros correlatos são tarefas extremamente complexas, devido ao tempo requerido, dinheiro, instrumentação e escala. As metodologias convencionais inferem as propriedades hidráulicas em amostras que estão em equilíbrio, através de técnicas invasivas e sob restrições especiais. Esta tese contribui com a Ciência do Ambiente, via Ciência do Solo, propondo um novo método de estudo da infiltração da água na região não-saturada do solo, utilizando a tomografia computadorizada (TC). O tomógrafo foi aqui desenvolvido e construído. A TC, neste trabalho, mediu a umidade (θ) 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 $D(\theta)$. Resultados qualitativos, como imagens 2D e 3D, e resultados quantitativos demonstraram a boa correlação do método proposto com o método tradicional de medida da curva de retenção. Amostras de solo estrurado foram analisadas em laboratório e em campo.

Palavras-chave: infiltração, solo, tomografia, agricultura, plantio direto, meio-ambiente.

ABSTRACT

NAIME, J.M. (2001). *A new method for dynamic studies, in situ, of water infiltration in the unsaturated zone of soil*. São Carlos, 2001. 145p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Agriculture is the human activity that most affects the environment. Huge amounts of chemicals are applied on the soil. Pesticides percolation and runoff degrades water resources. Thus, soil hydraulic properties must be known due to their influence on solute transport. The measurement of these properties and the modelling of related parameters are often difficult, if not impossible, due to the involved time, money, instrumentation, and scale. Traditional methodologies infer hydraulic properties in samples that are in equilibrium, through invasive techniques and under some special constraints. This thesis contributes with Environmental Science, via Soil Science, as it proposes a new method to study the infiltration in the unsaturated zone of soil, by means of CT. The scanner was developed and constructed in this work. The proposed methodology uses profiling CT to measure the water content (θ) during the water flow, and by means of numerical solution of Richards equation and Rossi-Nimmo model water retention, sorptivity, hydraulic conductivity $k(\theta)$, and diffusivity $D(\theta)$ are obtained. Qualitative results, as 2D and 3D images, are presented and the quantitative results of water retention show good correlation of the proposed method with the conventional tensiometers method. Structured soil column samples are analyzed in the field and in laboratory.

Keywords: Infiltration, tomography, soil, agriculture, environment, conservation tillage.

1 INTRODUÇÃO

Esta tese traz uma contribuição às áreas da Ciência do Solo e Ciência do Ambiente, desenvolvendo um novo equipamento e uma nova metodologia que permitem estudar a infiltração da água na região não-saturada do solo, através da tomografia computadorizada (TC). O novo equipamento, constituído de um tomógrafo de campo com esquema de varredura de 3ª geração, foi desenvolvido e construído devido à inexistência de instrumentação disponível e adequada aos objetivos deste trabalho.

Em 1989, iniciamos carreira de pesquisador ao ingressarmos na Embrapa Instrumentação Agropecuária, localizada em São Carlos-SP. Desde 1984, este centro nacional tem desenvolvido, entre outras linhas de pesquisa, equipamentos e metodologias dedicadas ao estudo da Física dos Solos por meio de técnicas nucleares (Crestana et al., 1996a). Seus projetos de pesquisa freqüentemente são multidisciplinares e reúnem equipes mult institucionais com o objetivo de atender às demandas do agronegócio brasileiro e contribuir para o avanço da fronteira do conhecimento científico e tecnológico.

No tocante à instrumentação, esta tese dá continuidade à proposta de trabalho realizada em nosso mestrado em Engenharia Elétrica, onde foi desenvolvido um tomógrafo de primeira geração para estudo de solos e plantas, em campo (Naime, 1994). Devido aos resultados produzidos com aquele equipamento e nossa participação na equipe do projeto temático “Transporte, previsão do destino e balanço de pesticidas no solo” (Crestana, 1995), despertou-nos o interesse em utilizar a técnica da TC para estudar os mecanismos de transporte de água e solutos na região não saturada do solo com um tomógrafo de baixo custo, quando comparado com os equipamentos comerciais, e que permitisse ser levado ao campo.

1.1 A importância de estudar o movimento da água e de solutos no solo

Keeney (2000) apresentou um estudo sobre a ciência do solo nos últimos 100 anos. O autor destaca o papel fundamental desta ciência na produção de alimentos e seus desafios diante de demandas igualmente prioritárias mas antagônicas: o aumento da produção agrícola e a preservação ambiental. A produção agrícola convencional requer grandes áreas cobertas com apenas uma espécie vegetal. As origens da ciência do solo estão na produção de alimentos. Em 1840, Justus von Liebig lançou a pesquisa na agricultura quando estudou a nutrição mineral de plantas. Antes desta data, a necessidade de existência e a importância da ciência do solo já era reconhecida em 1798, com a publicação do ensaio de Thomas Robert Malthus. A ciência do solo se tornou cientificamente sólida no início do século 20, quando agrogeólogos (pedólogos) e químicos do solo se uniram em projetos de pesquisa (Hartemink et al., 2001). No ano de 1927, quando a população mundial era de 2 bilhões, já era consenso entre os cientistas que somente a expansão da área cultivada não seria suficiente para alimentar toda a população. Quando esta chegou a 3 bilhões, praticamente toda a área cultivável estava sendo utilizada e competia à pesquisa agrícola a responsabilidade de ampliar a capacidade produtiva (Keeney, 2000).

A produção de alimentos é totalmente dependente da disponibilidade de água. Portanto, para garantir a sustentabilidade da agricultura torna-se urgente a preservação dos recursos hídricos. Calijuri & Oliveira (2000) enfatizam esta preocupação: “A distribuição da água no globo e sua aparente inesgotabilidade têm levado a humanidade a tratar este recurso renovável e limitado com descaso, uma vez que tanto a escassez da água como os excessos resultam do mau uso dos recursos hídricos”.

A sociedade atual se preocupa com a preservação e recuperação dos recursos hídricos porque já se conscientizou que a água disponível para o consumo humano é um recurso limitado e há fortes indicadores de escassez futura. A água doce corresponde a 2,5% de toda a água do planeta. Desta parcela, aproximadamente 69% está congelada nas regiões polares. Portanto, resta apenas 0,775% de toda a água da Terra em condições de utilização e 95% desta parte se encontra no subsolo (Stikker, 1998). Esta parcela é significativamente menor se considerarmos os recursos hídricos

que já estão poluídos. Atualmente, diz-se com frequência que o estopim de guerras futuras será a escassez de água, não mais o petróleo (Swain, 2001).

Diante deste quadro complexo, tornam-se urgentes métodos de gerenciamento integrado dos recursos hídricos. O aproveitamento auto-sustentado dos recursos hídricos de uma região requer estudos de sua disponibilidade no espaço e no tempo¹, das demandas potenciais para finalidades múltiplas previstas, de projetos e construção de obras de controle e utilização e, finalmente, estudos para alocação de custos e benefícios entre os usos e para determinação de uma estratégia ótima de operação (Fazal, 2000).

Dentre os “ecossistemas dominados pelo homem”, a agricultura, através do uso dos recursos naturais para produzir bens e serviços, representa, nos dias de hoje, a atividade humana com maior capacidade de alteração do sistema terrestre. A agricultura é responsável por 75% do consumo de água pelo homem (Wallace, 2000). Crestana (2000) enfatiza: “Se é verdade que os nômades destruíam a natureza por onde passavam, também é verdade que no século XX o homem, somente através da agricultura, aumentou sua capacidade de destruição de forma colossal, sem precedentes em sua trajetória histórica”. A atividade agrícola tem ocupado extensas áreas com monoculturas ou reduzidas variedades de espécies, propiciando, desta forma, uma proliferação descontrolada de insetos e pragas microbianas, provocada pela quebra da cadeia alimentar de um ecossistema anteriormente equilibrado. As conseqüências deste problema têm sido devastadoras para o meio ambiente. Anualmente, são aplicados cinco milhões de toneladas de pesticidas sobre as culturas de todo o mundo. Como resultado, a saúde humana é ameaçada através das transferências dos pesticidas para a água e o ar. O controle biológico de pragas, apesar dos avanços ocorridos, tem sido muito pouco empregado devido às políticas que incentivam a utilização dos pesticidas com preços atrativos. Além disto, a adoção do controle integrado de pragas e doenças requer um gerenciamento intensivo de tecnologia (Matson et al., 1997).

No Brasil, no período de 1990 a 1998, houve um crescimento de 136% no consumo de pesticidas. No ano de 1998, foram comercializados 2,6 milhões de

¹ A atual crise nos setores de abastecimento de água e de geração de energia elétrica reforça esta proposta.

dólares em pesticidas (ANDEF, 2001), enquanto houve pouco crescimento do mercado de máquinas agrícolas e estagnação no consumo de fertilizantes. Em 1990 foram produzidas 33.114 unidades de máquinas agrícolas enquanto no ano de 1998 foram produzidas 33.412 unidades (Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 2001).

A contaminação das águas através dos pesticidas ocorre de duas maneiras: escoamento superficial para os rios e corpos d'água e percolação profunda no solo até atingir as águas subterrâneas. No caso destas últimas, o conhecimento dos mecanismos de transporte de soluto na região não-saturada do solo é de fundamental importância. Através deste conhecimento, pode-se otimizar a aplicação dos insumos agrícolas, dentre estes a água para irrigação, com vistas à minimização dos efeitos danosos aos reservatórios hídricos naturais. Além de poupar o meio-ambiente, esta tecnologia oferece lucros aos produtores, condição essencial para a sua adoção.

Atualmente, a ciência tem razoável domínio sobre os estudos de solos saturados. Uma das fronteiras do conhecimento está no estudo da região não-saturada do solo, horizonte agricultável na maioria das culturas. Esta região apresenta enorme complexidade por ser um meio anisotrópico com umidade e concentração variáveis no tempo e no espaço, além das reações químicas e dos processos biológicos que nela ocorrem. A solução para um problema como este, evidentemente, não será encontrada em apenas uma área do conhecimento científico.

Bouma & Hoosbeek (1996) enfatizam a importância da interdisciplinaridade no estudo dos solos:

“O solo tem papel principal em todos os assuntos ambientais que tratam do uso e gerenciamento da terra, tais como degradação e erosão do solo, salinização, poluição química e reflorestamento. Tais assuntos têm um caráter interdisciplinar que envolve os próprios usuários da terra, cientistas, agrônomos, engenheiros, economistas e aqueles que fazem as leis e tomam decisões na sociedade, tais como advogados, planejadores e políticos”.

Antigamente, os estudos edáficos preocupavam-se em resolver problemas específicos, visando apenas o aumento de produtividade de uma determinada cultura. Hoje é evidente que a compartimentalização do conhecimento não é tão produtiva quanto à abordagem interdisciplinar. Esta, sim, tem promovido os grandes progressos

tecnológicos da humanidade. A Figura 1 evidencia a dificuldade atual em integrar conhecimentos e escalas, quando se trata de estudar solos. A Figura 2 mostra, do ponto de vista científico-tecnológico, a dificuldade em dar uma resposta simples e convincente à questão do equilíbrio da atividade antrópica envolvida na agricultura e no manejo sustentável do ecossistema (Crestana, 1997).

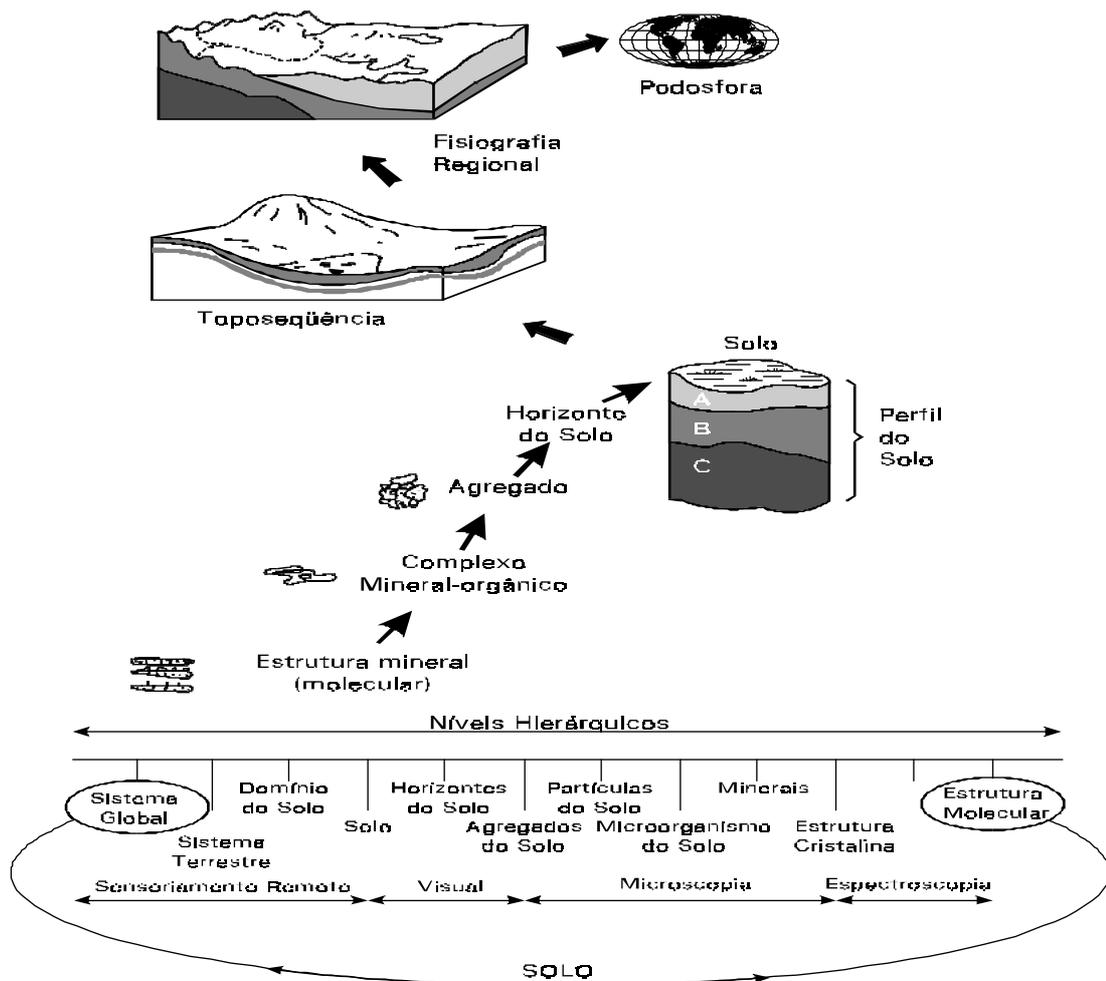


Figura 1 - Diagrama mostrando a importância da escala e alguns métodos de medida utilizados em solos. Adaptado por Crestana (1997), de Sposito & Reginato (1992).

Várias áreas de pesquisa têm surgido e as já existentes têm se expandido a partir da necessidade de uma visão holística para o completo conhecimento do solo. Crestana & Posadas (1996b) destacam a importância do entendimento do mecanismo de transporte de água e solutos nos solos, visando o estudo de problemas ambientais:

“Mais recentemente, o intenso interesse pela contaminação química do lençol freático tem ampliado largamente o leque de aplicações do transporte de solutos além do campo da agricultura. Hoje, muitas disciplinas, como Ciência do Solo, Hidrologia, Ciência da Planta, Engenharia Civil e Ambiental, só para citar algumas, possuem áreas de pesquisa que requerem o entendimento do transporte de solutos no solo (Jury & Roth, 1990)”.

Muito da degradação do ambiente gerada pelo homem decorre de manejos inadequados de produtos químicos na agricultura, do lixo jogado pelas indústrias (rejeitos químicos, polímeros e outros) e das diversas atividades presentes nos municípios (lixo hospitalar, urbano, radioativo, doméstico e outros). Pesticidas e fertilizantes utilizados continuamente na agricultura contaminam o solo e o lençol freático no mundo inteiro.

A pesquisa em Manejo e Conservação dos Solos demanda, tanto em campo como em laboratório, medição, monitoramento, simulação e manipulação de um grande número de parâmetros ambientais que apresentam, em geral, grande heterogeneidade, refletindo-se em forte variabilidade espacial e temporal (Crestana & Vaz, 1997). Atualmente, no campo do manejo agrícola, apresenta-se o conceito de “agricultura de precisão” onde se pretende, através do monitoramento, interpretação e controle de vasta gama de parâmetros, maximizar a produção agrícola com mínima degradação ambiental (Torre-Neto et al., 1997).

ESQUEMA GERAL PARA AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO AMBIENTAL DE COMPOSTOS ORGÂNICOS ANTROPOGÊNICOS

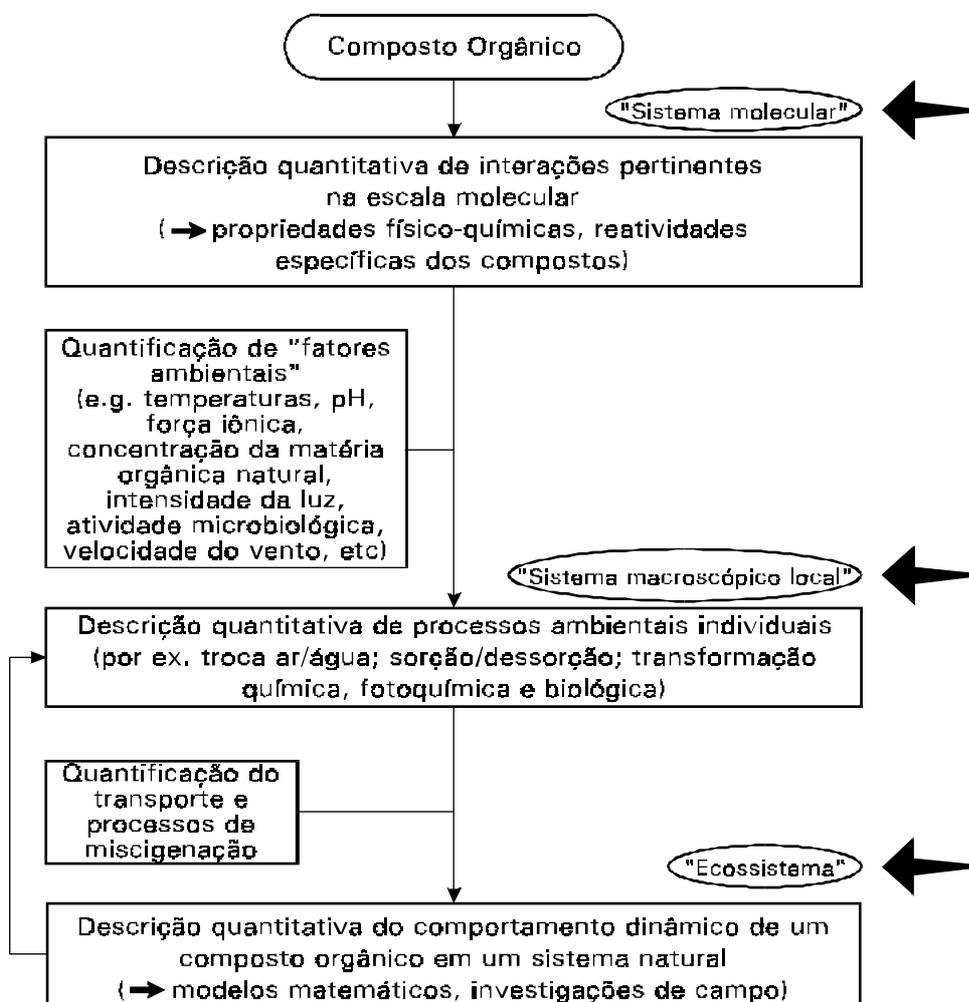


Figura 2 - Esquema geral, mostrando a complexidade da avaliação de compostos orgânicos distribuídos no ambiente. Adaptado por Crestana (1997), de Schwarzenbach et al. (1993).

1.2 Poluição do solo e da água

As principais fontes poluidoras do solo e da água são rejeitos orgânicos, alterações ambientais, metais pesados, pesticidas e fertilizantes. Estas fontes serão comentadas a seguir.

Rejeitos orgânicos são materiais resultantes de inúmeros processos naturais de animais e plantas. Alguns exemplos de rejeitos orgânicos que comumente poluem

as águas são: esgoto urbano, escoamento superficial carregado de dejetos da pecuária, restos de alimentos e decomposição de animais e plantas. A contaminação da água é causada por subprodutos formados pela matéria orgânica em decomposição. Este processo consome o oxigênio utilizado pela vida aquática enquanto produz elementos tóxicos tais como os nitratos. Pequenas quantidades de matéria orgânica podem enriquecer a vida aquática, mas em concentrações elevadas são prejudiciais.

Quando ocorrem alterações ambientais no interior ou ao redor dos corpos d'água, os efeitos decorrentes destas alterações podem degradar a qualidade da água. Como exemplos, podemos citar a destruição da mata ciliar, os impactos da mineração, a elevação da temperatura e a alteração de outras propriedades físicas da água. Uma ou mais destas alterações podem causar um deslocamento do balanço natural do ambiente aquático. Este balanço provém de um sistema que mantém a qualidade da água para os organismos vivos.

Metais pesados tais como mercúrio, chumbo, selênio e cádmio, são altamente prejudiciais à saúde humana, mesmo em pequenas quantidades. Estes metais são subprodutos das regiões industriais e urbanas que, ao chegarem aos corpos d'água, são ingeridos pelos organismos aquáticos e entram na cadeia alimentar. Neste processo, chamado de bioacumulação, estes elementos são absorvidos pelos animais e não são eliminados, podendo atingir níveis letais.

Pesticidas e fertilizantes, por serem insumos agrícolas, são os poluentes que atingem a maior extensão territorial do planeta. O nitrogênio e o fósforo são os poluentes mais importantes associados aos fertilizantes. A poluição da água, associada à aplicação de fertilizantes, ocorre devido à adição de nutrientes ao solo ser maior que aquela que a cultura é capaz de consumir, devido às características físico-químicas do solo e precipitação intensa.

1.2.1 Fertilizantes

O nitrogênio e o fósforo são essenciais para a obtenção de ótimos níveis de produtividade na agricultura. Aplicados acima da capacidade de absorção da cultura, nitrogênio e fósforo em águas superficiais e nitrogênio em águas subterrâneas, causam eutrofização (crescimento excessivo de algas) das águas de superfície e problemas de saúde em humanos e animais como resultado da alta infiltração de

nitrogênio na forma de nitrato. Quantidades excessivas de nutrientes, especialmente nitrogênio e fósforo, aceleram o processo de eutrofização. Enquanto as algas se desenvolvem e se decompõem, elas consomem o oxigênio dissolvido na água, causando mortalidade de peixes, mal cheiro e má aparência.

O nitrogênio, na forma de nitrato (NO_3), pode causar problemas à saúde humana quando sua concentração excede 10 mg/l (44 mg de NO_3).

O fosfato é utilizado na agricultura em formulações que são muito solúveis em água. No período de algumas semanas ou meses, o fosfato adicionado ao solo converte-se em formas menos solúveis se ainda não foi absorvido pelas plantas. O fosfato não utilizado precipita com o cálcio, ferro e alumínio ou é incorporado à matéria orgânica e torna-se essencialmente insolúvel. Neste ponto, o fosfato representa pouco perigo ao sistema aquático. A exceção a esta situação ocorre em solos muito arenosos, onde a infiltração é mais intensa.

A poluição das águas subterrâneas pode ser expressivamente minimizada com a aplicação da dosagem correta de fertilizantes, isto é, considerando-se a capacidade de absorção das plantas e as características físico-químicas do solo. A contaminação das águas superficiais pode ser reduzida através da diminuição do escoamento superficial.

1.2.2 Pesticidas

Os pesticidas são considerados um dos maiores desenvolvimentos do século XX. Durante os últimos 30 anos, entretanto, a preocupação com os efeitos dos defensivos agrícolas sobre o meio ambiente tem crescido muito. A presença destes produtos químicos no ambiente representa uma ameaça à vida selvagem e ao homem (Rao & Hornsby, 1989).

Atribui-se aos pesticidas o mérito de ampliar a longevidade e melhorar a qualidade de vida, notadamente na área de saúde pública. Programas de controle de insetos têm salvado milhões de vidas combatendo doenças tais como malária, febre amarela e tifo. O uso de pesticidas constitui um aspecto importante da agricultura moderna. Sem ele, o controle de várias pragas como insetos, ervas daninhas, doenças de plantas, vermes e roedores não seria possível. Esta situação provoca diminuição da oferta de alimentos e, conseqüentemente, aumento de preços. Regiões de clima tropical favorecem o crescimento de muitas pragas da lavoura. No Brasil, onde este

clima predomina, há uma grande dependência de pesticidas para um gerenciamento econômico da cultura.

Infelizmente, por serem tóxicos, os pesticidas acabam causando mortalidade de peixes, problemas reprodutivos em pássaros e doenças agudas em humanos por meio da ingestão e/ou exposição. Frequentemente as intoxicações ocorrem devido a falhas na aplicação, no armazenamento ou no descarte das embalagens.

Além do escoamento superficial e da percolação, os pesticidas são transportados junto com os produtos agrícolas e também através da vaporização para a atmosfera. A ocorrência de resíduos de pesticidas nas partes comestíveis das plantas é significativa em termos de exposição humana, enquanto pesticidas liberados na atmosfera têm impacto sobre a qualidade do ar e cria problemas quando trabalhadores rurais permanecem nas áreas tratadas.

1.2.3 Movimento de água e solutos no solo

A lixiviação é o processo pelo qual os poluentes infiltram no solo, transportados pela água. Em regiões onde o solo é arenoso e permeável, a lixiviação é mais intensa que o escoamento superficial. A lixiviação é análoga ao preparo do café. A água percola entre os grãos do pó de café e em seu caminho carrega consigo os materiais que produzirão o café. A bebida é obtida devido à solubilidade do pó em contato com a água.

O volume de água e solutos transportados através do solo depende de vários fatores: da quantidade de água aplicada ou infiltrante; da capacidade de absorção do solo; da presença de macroporos, da quantidade de matéria orgânica presente no solo; da solubilidade das substâncias presentes e da permeabilidade do solo.

A TC já é utilizada para estudar a influência da estrutura física do solo nos mecanismos de transporte de água no solo. Perret et al. (1997), Perret et al. (1999) e Perret et al. (2000a) estudaram a estrutura do solo como uma rede de poros em 3 dimensões através da TC. Pioneiramente, Perret et al. (2000b) utilizaram a TC de emissão de fótons (SPECT) para estudo de fluxo preferencial em solos. Os poros grandes têm papel importante na penetração de raízes, gases e água no volume do solo. Quanto maior a densidade de macroporos, mais as raízes podem explorar o solo. Similarmente, quanto mais contínuos são os macroporos, mais livremente os gases podem realizar trocas com a atmosfera. Macroporos contínuos também têm

efeito direto sobre a infiltração de água e o transporte de soluto no solo. O tamanho das aberturas dos poros é mais importante para o crescimento da planta do que a própria porosidade (Shipitalo et al., 2000).

O tipo de manejo do solo tem papel definitivo nos processos hidrológicos do solo. O plantio direto é uma seqüência de plantio projetada para minimizar perdas de solo e água pela ação do escoamento superficial. A Soil Science Society of America (SSSA), em 1997, definiu plantio direto como o sistema de manejo que mantém a cobertura vegetal em índices maiores que 30%. O sistema de plantio convencional apresenta área de cobertura vegetal menor do que 30% (SSSA, 1997). Shipitalo et al. (2000) mostraram, através de estudos com lisímetros² de 75cm de altura durante 2 anos, que o solo sob plantio direto favorece a formação de macroporos devido à matéria orgânica incorporada, maior presença de minhocas e atividade biológica mais intensa. No plantio convencional a maior exposição do solo ao impacto direto da chuva causa o selamento superficial do solo e assim provoca escoamento superficial e erosão. Além disso, o uso intenso de implementos no plantio convencional rompe a continuidade dos macroporos e assim é reduzida a contribuição destes no fluxo total.

Shipitalo et al. (2000) concluíram que o plantio direto pode reduzir o escoamento superficial e aumentar a infiltração, mais notadamente durante a fase de crescimento da cultura quando o índice pluviométrico é alto e a evapotranspiração é maior. Devido à crescente formação e preservação de macroporos, a proporção de água de chuva que entra e flui pelos macroporos é maior em solos sob plantio direto do que em plantio convencional.

Se uma porção pequena do volume de solo está envolvida no fluxo através dos macroporos, a velocidade com que a água se move e a profundidade de penetração são muito maiores do que na situação em que todo o volume do solo está envolvido no processo de fluxo. Conseqüentemente, o volume de solo e tempo de contato com o soluto dissolvido são reduzidos. Quando o solo seco recebe uma

² Instrumento utilizado para medir a percolação das águas pluviais através do solo e determinar os constituintes solúveis removidos na drenagem.

precipitação intensa, a contribuição relativa dos macroporos a infiltração é muito mais significativa. A maior parte dos percolados adicionais são armazenados na zona radicular e são transpirados. Uma pequena quantidade atinge águas subterrâneas durante a época de crescimento da cultura.

Os agroquímicos aplicados na superfície do solo são mais suscetíveis ao transporte em macroporos nas primeiras chuvas intensas após a aplicação porque a difusão, adsorção, degradação, volatilização e absorção pela cultura reduzem, com o passar do tempo, a quantidade disponível para o transporte. Desse modo, qualquer atraso entre a hora de aplicação e a ocorrência de uma chuva forte, ou quaisquer chuvas fracas, pode reduzir o transporte de agroquímicos nos macroporos. Embora o fluxo pelos macroporos possa provocar lixiviação mais rápida dos solutos não adsorvidos, o efeito total do plantio direto é provavelmente desprezível porque qualquer soluto restante no solo no fim da estação de crescimento estará sujeito à lixiviação durante a fase de dormência da cultura (Shipitalo et al., 2000). Durante a fase de dormência, a cobertura vegetal é drasticamente reduzida. O volume de água envolvido no escoamento superficial é muito elevado, independentemente do tipo de manejo.

Shipitalo et al. (2000) concluem: “o entendimento dos fatores que influenciam a quantidade de um soluto adsorvido, que se move para o subsolo através de macroporos logo após a aplicação e atinge o lençol freático, representa um vazio crítico em nosso conhecimento”.

O destino de um pesticida no solo depende expressivamente de duas de suas propriedades: persistência e solubilidade. A persistência define a “durabilidade” de um pesticida. A maioria dos pesticidas fragmenta-se ou degrada-se com o tempo, devido a várias reações químicas e biológicas nos solos. A luz solar degrada alguns pesticidas. Geralmente, as reações químicas provocam desativação parcial dos pesticidas. Nestas reações, os microorganismos do solo podem transformar muitos pesticidas em dióxido de carbono, água e outros compostos inorgânicos. Alguns pesticidas produzem substâncias intermediárias denominadas metabólitos enquanto degradam. Do ponto de vista ambiental, a atividade biológica destas substâncias pode também ser muito importante devido à população de micróbios decrescer rapidamente abaixo da região radicular.

O tempo de degradação é medido em meia-vida, definida como o intervalo de tempo requerido para a metade do volume de pesticida aplicado se degradar completamente e ser liberado como dióxido de carbono.

A propriedade de maior influência no movimento de um pesticida com a água no solo é a solubilidade. 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 microorganismos. Quando um pesticida penetra no solo, uma parte estará ligada às partículas do solo, particularmente à matéria orgânica, através do processo denominado adsorção e outra parte irá se dissolver 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. A solubilidade de um pesticida é inversamente proporcional à sua capacidade de sorção ao solo (Trautmann et al., 2000).

1.3 Objetivo

O objetivo deste trabalho foi desenvolver e validar um novo método, de laboratório e de campo, através da construção e utilização de um tomógrafo portátil com sistema de varredura suficientemente rápido para monitorar e medir não destrutivamente, em duas e três dimensões, o movimento da água na região não-saturada do solo e estimar as propriedades hidráulicas do solo.

1.4 Descrição sucinta do conteúdo de cada capítulo

No capítulo 2 será apresentada uma revisão bibliográfica dos aspectos teóricos dos processos hidrológicos que ocorrem no solo, com ênfase à infiltração da água na região não saturada do solo. No capítulo 3 será apresentada a TC como metodologia de estudo da infiltração da água no solo e os princípios de funcionamento de um tomógrafo. No capítulo 4 será apresentado o tomógrafo que opera com esquema de varredura de 3ª geração, o programa de reconstrução de imagem para feixe em leque, a verificação do funcionamento do equipamento e a metodologia utilizada para medir os parâmetros de infiltração da água no solo, em

campo. O capítulo 5 apresentará os resultados, as discussões e as propostas para trabalhos futuros.

2 O SOLO E OS PROCESSOS HIDROLÓGICOS QUE NELE OCORREM

O termo solo refere-se à camada particulada da superfície terrestre sujeita às intempéries. É formado, inicialmente, pela desintegração e decomposição de rochas, através de processos químicos e físicos e é influenciado pela atividade e acumulação de resíduos de inúmeras espécies de animais e plantas, de dimensões microscópicas e macroscópicas. Dentre as ações físicas das intempéries, que provocam a desintegração de rochas em pequenos fragmentos, destacam-se a expansão e contração causadas pela alternância entre aquecimento e esfriamento, estresses resultantes do congelamento e descongelamento da água, penetração de raízes e atrito causado pelo escorrimento de partículas abrasivas carregadas pela movimentação do gelo, água e vento. Os processos químicos que contribuem com a decomposição das rochas são dissolução, oxi-redução, solução e dissociação, imobilização por precipitação ou remoção de componentes por volatilização ou lixiviação e várias reações físico-químicas. Os produtos liberados por estes processos são transportados pelas águas, massas de gelo e vento que os depositam em outros locais.

A formação do solo é um processo contínuo que vai além da desintegração de rochas e minerais. Durante o seu desenvolvimento, suas características originais continuam a se modificar pela formação de minerais secundários (e.g., minerais argilosos) e o crescimento de organismos contribui com matéria orgânica que provocam uma série de reações físico-químicas e bioquímicas além daquelas que ocorrem com a matéria mineral de origem. O processo de desenvolvimento do solo culmina com a formação do perfil de solo.

Existem registros de que há 4000 anos, na China, houve tentativas de classificar os diferentes tipos de solos. Na Europa, há 2000 anos gregos, e romanos realizaram trabalho similar. O mais conhecido livro romano de agricultura foi o de

Columella, em que os solos produtivos foram distinguidos dos não produtivos. Este conhecimento prático foi transmitido pelas escolas medievais, mas estas não acrescentaram nenhum avanço científico. A Ciência do Solo dos dias atuais surgiu há 100 anos, a partir de duas diferentes escolas de pensamento, uma da Química e a outra da Geologia. O cientista alemão Liebig (1803-1873) foi um dos maiores expoentes da escola Química, mas antes de Liebig, em 1803, o cientista sueco Berzelius descreveu o solo como um laboratório químico da natureza em que ocorrem várias decomposições químicas e reações de síntese.

Os primeiros pedologistas, com formação em Geologia, definiam o solo como um conjunto de partículas de rochas com uma certa quantidade de matéria orgânica produzida pela decomposição de plantas. Em 1917, o cientista alemão Ramann (1851-1926) descreveu o solo da seguinte maneira: “rochas que foram reduzidas a minúsculos fragmentos alterados quimicamente junto com restos de plantas e animais que viveram acima e abaixo da superfície do solo”.

As atuais definições de solo têm origem nos trabalhos de dois estudiosos: do “Pai da Pedologia” V.V. Dokuchaev (1846-1903) na Rússia, e Hilgard (1832-1916) nos E.U.A. Em 1880, foi Dokuchaev quem primeiro definiu o conceito de solo como um corpo natural independente. Isoladamente, ambos pesquisadores notaram que os solos podem ser descritos em amplas zonas geográficas e correlacionados com as zonas climáticas e associados com os cinturões de vegetação natural. Embora atualmente tem-se conhecimento que isto é só parcialmente verdadeiro, ainda serve para chamar a atenção às relações ambientais do solo que cobre nosso planeta.

Hilgard notou que os solos do estado do Mississippi eram distribuídos em amplos cinturões associados com a Geologia da superfície, mas subseqüentemente, quando passou a trabalhar na Califórnia, ele concluiu que o clima também tem influência importante como, por exemplo, nas acumulações de carbonatos e outros sais presentes nos solos de regiões secas.

O solo pode ser genericamente definido como o mineral e a matéria orgânica não solidificados na superfície da Terra, capaz de sustentar o desenvolvimento de plantas. Esta definição está de acordo com uma definição simples utilizada na agricultura que descreve o solo como “a coisa onde a planta cresce”. Tais definições

são suficientes para muitos propósitos práticos, mas o cientista de Ciência do Solo precisa de uma definição mais detalhada.

A definição proposta por Joffe (1949) incorpora as características físicas, os constituintes químicos e biológicos e a morfologia do solo: “O solo é um corpo natural constituído de animais, matéria orgânica e mineral diferenciado em horizontes de profundidades variáveis distintos uns dos outros em morfologia, constituição física, propriedades químicas e biológicas”.

Em descrição mais recente, Sposito & Reginato (1992) acrescentam, além da variabilidade espacial, a variabilidade temporal no texto reproduzido a seguir:

“O solo é um meio poroso estruturado, biologicamente ativo, que se desenvolveu na superfície do nosso planeta. Este material, suporte da vida, foi criado e continua a evoluir através de processos atmosféricos de desagregação causados por influências biológicas, climáticas, geológicas e topográficas. Apesar da variabilidade espacial e temporal dos solos, possuem uma característica que é única: o solo é uma seqüência vertical e sistemática de camadas produzidas pela ação combinada dos organismos vivos e da percolação das águas.”

O solo é constituído de um sistema composto de três fases: sólida, líquida e gasosa. A fase sólida é formada por matéria inorgânica e matéria orgânica. A fase líquida é constituída pela solução do solo ou água do solo e compõem-se de água, sais dissolvidos e matéria coloidal em suspensão. A fase gasosa é o próprio ar do solo, assim denominado porque sua composição difere do ar atmosférico quanto à proporção percentual de seus elementos.

As ações de vários processos químicos, físicos e biológicos sobre os materiais geológicos conferem características que reconhecemos como solos. Estas alterações, que afetam a parte superior das rochas expostas ao tempo, podem ser vistas como uma seqüência de camadas, tecnicamente chamadas de horizontes, com diferentes cores, composições e estrutura, denominadas perfil do solo.

O perfil do solo compreende seus horizontes em uma seção vertical, a partir da matéria orgânica na superfície, passando pelos horizontes do solo até as camadas inferiores que influenciam a gênese ou o comportamento do solo. Este conceito de perfil do solo é uma visão simples, uma vez que a variabilidade espacial do solo ocorre nas três dimensões. Desta forma, para efeito de classificação e mapeamento,

os pedologistas adotaram o conceito de um volume de solo, um corpo tridimensional (3-D) denominado pedon. Um pedon é descrito como a quantidade mínima de material que pode logicamente ser chamado de “um solo”, podendo seu tamanho variar de 1 a 10m² (Kutílek & Nielsen, 1994). Como o solo é razoavelmente variável em composição e aparência, um conjunto de características comuns permitem que um número de pedons sejam agrupados em um polipedon, caracterizando o tipo de solo de uma área. Para fins práticos, na literatura, os pedons são descritos no perfil de uma trincheira cuja dimensão lateral varia de 1 a 1,5m, e sua profundidade é determinada pelo horizonte do solo. Somente em seções extensas, tais como barrancos de estradas e escavação de tubulações, a verdadeira imagem da variabilidade lateral do solo pode ser apreciada.

Horizonte é uma camada de um perfil de solo, aproximadamente paralelo à superfície da Terra, que possui características pedológicas homogêneas. Os horizontes de um perfil de solo são a expressão morfológica dos processos que o formaram e podem ser distinguidos uns dos outros através de sua constituição física, de suas propriedades químicas e de suas características biológicas. Os limites vertical e horizontal dos horizontes definem-se quando estes atributos são significativamente diferentes em aparência ou quantidade.

Dokuchaev introduziu um sistema de identificação dos horizontes através de letras, no qual se basearam os dois sistemas de designação de horizontes mais utilizados atualmente, muito similares entre si, são os da Organização de Alimentos e Agricultura das Nações Unidas (FAO) e o do Ministério da Agricultura dos E.U.A. (USDA). O sistema da FAO utiliza 7 letras maiúsculas O, H, A, E, B, C e R para representar o horizonte mais significativo, denominado horizonte principal. As características secundárias dentro do horizonte principal são designadas por letras minúsculas seguindo a letra do horizonte principal. Cada país, através de sua sociedade de ciência do solo, pode adotar uma nomenclatura própria com pequenas diferenças deste sistema e dar-lhes um significado particular. Lemos & dos Santos (1979) detalham a nomenclatura adotada no Brasil para a identificação dos horizontes de um perfil de solo.

Características físicas do solo como granulometria, grau de compactação, quantidade de matéria orgânica e distribuição de raízes determinam os processos

hidrológicos que nele ocorrem. Dentre estes processos, Kutflek & Nielsen (1994) destacaram como os mais importantes:

- infiltração;
- redistribuição da água no solo, seguida de infiltração;
- drenagem para a camada de solo saturado próxima à superfície do solo;
- evaporação do solo descoberto e
- evaporação e transpiração (evapotranspiração) de um solo com cobertura vegetal.

Com exceção da infiltração, todos os processos citados provocam perda de água em todo volume de solo ou pelo menos em uma camada particular, geralmente a superficial, quando um fluxo unidimensional na direção vertical é considerado. Quando fluxos bi e tridimensionais são considerados devido às circunstâncias de campo, fluxos horizontais sub-superficiais podem participar do balanço hídrico em um perfil de solo.

As condições meteorológicas controlam a extensão de cada um destes processos elementares e, juntamente com a capacidade de campo de um perfil de solo, um estágio particular do regime hidrológico desenvolve-se por um longo período de tempo. Se estes estágios são combinados em médias por um período de tempo ainda maior, pode-se determinar o regime hidrológico do solo. Analogamente, enquanto as condições meteorológicas durante períodos de semanas ou meses referem-se às condições do tempo, em uma determinada região, as condições meteorológicas médias obtidas durante décadas caracterizam o clima da região.

2.1 Macroporos

A importância dos macroporos nos processos que ocorrem no sistema solo-planta-raízes tem motivado pesquisadores a descrever tamanhos e formas (Perret et al., 1999). A definição de macroporo pode parecer simples. Entretanto, se considerarmos a complexidade de um macroporo, sua definição se torna nebulosa e ambígua. Não há consenso entre os pesquisadores quanto à definição das faixas de tamanho de poros em função de sua dimensão. Perret et al. (1999) apontaram doze trabalhos com definições diferentes de poros. Para classificar os poros, a grandeza utilizada é o diâmetro do cilindro equivalente (ECD), derivado da área da seção

transversal assumida como sendo circular. Perret et al. (1999) adotaram a definição proposta por Luxmoore et al. (1990): “O termo macroporo inclui todos os poros em um perfil que, geralmente, são drenados até a capacidade de campo, com diâmetro equivalente maior ou igual a 1mm”. Perret et al. (1999) estudaram e caracterizaram as formas e parâmetros 3-D de redes de macroporos com o auxílio de programas de computador a fim de descreverem a geometria do macroporo. A seguir são apresentados parâmetros definidos nesse estudo.

Em um meio poroso, uma rede é um conjunto de macroporos que estejam interconectados de tal modo que exista uma passagem de qualquer parte para quaisquer outras partes. Deste modo, o conceito de macroporo demanda uma abordagem 3-D. Um ramo é uma porção da rede de macroporos que conecta um poro com o restante da rede. Tortuosidade (τ) é um dos parâmetros 3-D mais significativos de uma estrutura porosa. Hillel (1982) definiu tortuosidade: $\tau = L/L_e$ (Figura 3). A tortuosidade pode ser facilmente relacionada com a condutividade de um meio poroso uma vez que ela indica a resistência ao fluxo devido ao maior comprimento do caminho percorrido. Richter (1987) definiu o termo continuidade porosa como o inverso da tortuosidade.

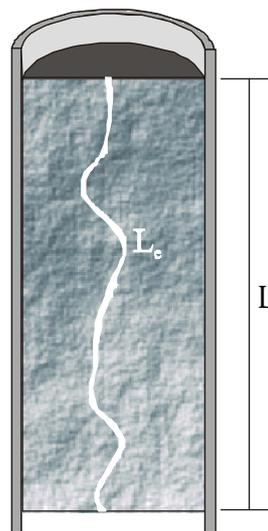


Figura 3 - Tortuosidade de um macroporo do solo.

Outro parâmetro importante é o raio hidráulico do macroporo dado pela razão entre o volume do poro e a área da parede do poro. O raio hidráulico indica posição

dos gargalos, onde ocorrem as máximas pressões capilares, como também a expansão e contração dos poros (Perret et al., 1999).

2.2 Infiltração em solo homogêneo

Inicialmente, serão apresentadas as relações básicas utilizadas para descrever o movimento da água no solo. Henry Darcy, estudando a filtragem de água por meios porosos em 1856, estabeleceu a equação geral do fluxo saturado. Esta equação descreve o movimento de um fluido em um meio poroso homogêneo e saturado. De maneira mais geral, ela pode ser escrita na forma:

$$\vec{q} = -K\vec{\nabla}\Psi_t \quad [LT^{-1}] \quad (1)$$

onde:

\vec{q} = densidade de fluxo $[L.T^{-1}]$;

K = condutividade hidráulica do solo $[L.T^{-1}]$ e

Ψ_t = potencial total da água no solo $[L]$, $\nabla\Psi$ $[L.L^{-1}]$.

$$\Psi_t = \Psi_g + \Psi_m + \Psi_o + \Psi_p + \Psi_i \quad [L] \quad (2)$$

onde:

Ψ_g = potencial gravitacional;

Ψ_m = potencial matricial, devido às forças coloidais, adsorção e capilaridade;

Ψ_o = potencial osmótico, devido aos gradientes de concentração pela presença de solutos na água do solo;

Ψ_p = potencial de pressão, ocorre quando a pressão que atua sobre a água é maior que a atmosférica e

Ψ_i = outras forças.

O sinal negativo na eq.(1) é devido ao sentido do fluxo ser inverso ao do gradiente, sendo a coordenada z positiva no sentido de baixo para cima.

Os potenciais mais significativos, na maioria dos casos práticos, são Ψ_g , Ψ_p e Ψ_m . O potencial osmótico é desprezível porque não causa movimento significativo de água, apenas os sais se movem até o equilíbrio ser atingido. Desconsiderado o potencial osmótico, o potencial resultante é denominado potencial hidráulico ou carga hidráulica (H). Portanto, só há fluxo de água quando o gradiente de potencial hidráulico ($L.L^{-1}$) é diferente de zero.

Por conveniência, as unidades de potencial são expressas em energia por peso ou altura de coluna d'água. Então, $\Psi_g = \rho \cdot g \cdot z$, é identificado pela profundidade z . As pressões positivas (Ψ_p) e as pressões negativas (Ψ_m), somadas, resultam na componente h . Assim, $H = h + z$.

Na condutividade hidráulica influem a granulometria do solo, a massa específica e a viscosidade do fluido, as quais, por sua vez, são funções da temperatura e da pressão. Para um solo não-saturado, K é função da umidade volumétrica (θ). Os poros ocupados pelo ar reduzem a área efetiva ao fluxo, aumentando a tortuosidade do fluxo remanescente. Assim, a condutividade hidráulica em meios porosos não saturados é menor do que nos saturados e é dependente do conteúdo de água ou da pressão da água nos meniscos dos poros (Prevedello, 1996). Com estas considerações, Buckingham, em 1907, introduziu a dependência da umidade na Lei de Darcy, criando a equação de Darcy-Buckingham:

$$\bar{q} = -K(\theta)\bar{\nabla}H \quad [LT^{-1}] \quad (3)$$

Reichardt (1996) mostrou, experimentalmente, que a condutividade hidráulica cai bruscamente devido às pequenas diminuições da umidade e, quando o fluxo permanece constante, a queda de K é compensada pelo aumento do gradiente de H .

A infiltração descreve a entrada de água no solo através de sua superfície que pode assumir as mais variadas formas e ser coberta pela água em sua totalidade ou apenas parcialmente. As equações mais comumente utilizadas para descrever a infiltração são as definidas para um fluxo unidimensional na direção vertical ou horizontal. Um número limitado de soluções existe para processos de infiltração em 2 e 3 dimensões (Kutílek & Nielsen, 1994).

Em solo não saturado, o processo de infiltração ocorre em regime transiente. Após um determinado intervalo de tempo, num perfil uniforme, a distribuição da umidade com a profundidade pode ser caracterizada pelas zonas apresentadas no gráfico da Figura 4. A zona saturada é uma camada estreita imediatamente abaixo da superfície do solo. Na zona de transição ocorre decréscimo de umidade. Sua espessura é de poucos milímetros. A zona de transmissão, diferentemente de todas as outras, cresce continuamente durante a aplicação de água na superfície. Nela, a umidade varia muito pouco com a profundidade. A zona de molhamento é estreita e apresenta grandes variações de umidade.

A frente de molhamento é o limite visível da penetração da água, onde o gradiente de pressão $[\partial h/\partial z]$ é elevado, principalmente nos solos inicialmente secos.

A infiltração acumulada (I) é o volume de água infiltrada no solo dividido pela área de infiltração e pode ser calculada através da eq.(4):

$$I = \int_{\theta_i}^{\theta_s} z.d\theta \quad [L], \quad (4)$$

onde θ_i é a umidade volumétrica inicial do perfil e θ_s é a umidade volumétrica de saturação.

O gradiente de potencial gravitacional ($\partial\Psi_g/\partial z = \partial z/\partial z$) é constante e unitário. O gradiente de potencial matricial decresce com o tempo devido ao avanço da frente de molhamento. Conseqüentemente, a densidade de fluxo na superfície do solo decresce monotonicamente com o tempo e aproxima-se assintoticamente de um valor constante (Figura 5), quando o potencial gravitacional é o único a atuar sobre o fluxo.

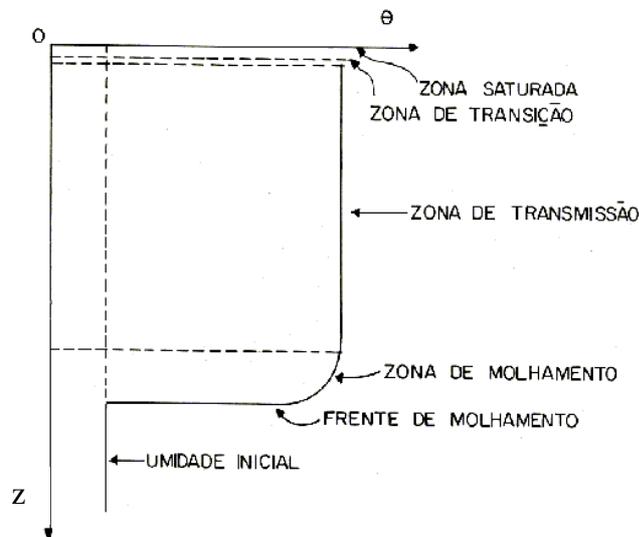


Figura 4 - Perfil de umidade do solo, num tempo t genérico após o início da infiltração. (Prevedello, 1996)

De acordo com a terminologia atual, a densidade de fluxo de água através de uma área de superfície de solo é também chamada de taxa de infiltração:

$$q = \frac{dI}{dt} \quad [LT^{-1}]. \quad (5)$$

Segundo Prevedello (1996), a infiltração acumulada em função do tempo pode ser medida em condições de campo. Mas, em tal medida, não se dispõe de informações sobre a distribuição da umidade ao longo da profundidade e nem da profundidade da frente de molhamento alcançada. Para se obter o perfil de umidade é necessária a utilização de modelos matemáticos, tais como os de Green & Ampt (1911) e Kostiaikov (1932), supondo solos hidraulicamente homogêneos e adotando condições de fronteira apropriadas.

A equação de Darcy-Buckingham é suficiente para a solução de problemas de fluxo em regime permanente em solos não-saturados quando $\nabla \cdot q = 0$, $dq/dt = 0$, e $d\theta/dt = 0$. Em situações práticas, a umidade varia ao longo do tempo. Nessas situações são necessárias 2 equações, uma para descrever a densidade de fluxo (Darcy-Buckingham) e outra para calcular a taxa de variação da umidade com o tempo. A taxa de preenchimento ou esvaziamento dos poros do solo é descrita pela equação da continuidade, a ser apresentada a seguir.

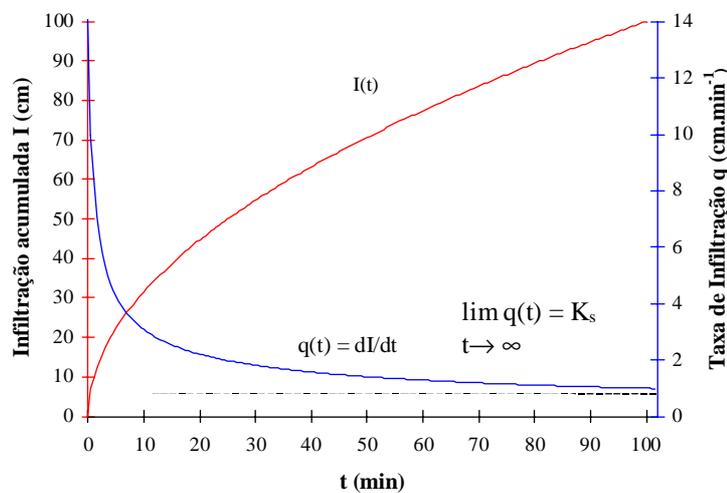


Figura 5 - Curvas de infiltração acumulada e instantânea (Kutílek & Nielsen, 1994).

Considere o elemento de volume ΔV com dimensões Δx , Δy , Δz apresentado na Figura 6. A variação do volume de água contido no elemento é igual à diferença entre o volume de água que entra no elemento e o volume que sai, durante o intervalo de tempo Δt . A razão de fluxo de entrada na direção x é q_x . Supondo-se que a variação em q_x é contínua, a taxa de variação do fluxo de saída é $[q_x + (\partial q_x / \partial x) \Delta x]$. O

volume de água ΔQ_x que entra, nesta direção, é $q_x \Delta y \Delta z \Delta t$ e o volume de água que sai é $[q_x + (\partial q_x / \partial x) \Delta x] \Delta y \Delta z \Delta t$. A diferença entre o volume que entra e o que sai é:

$$\Delta Q_x = q_x \Delta y \Delta z \Delta t - \left[q_x + \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} \right) \Delta x \right] \Delta y \Delta z \Delta t \quad (6)$$

ou, se calcularmos o limite para um tempo infinitesimal,

$$\frac{\partial Q_x}{\partial t} = - \frac{\partial q_x}{\partial x} \Delta x \Delta y \Delta z = - \frac{\partial q_x}{\partial x} \Delta V \quad (7)$$

Analogamente, a eq.(7) pode ser estendida para calcular as variações nas direções y e z e, somando-se essas componentes, obter-se a variação total no elemento ΔV :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \Delta V. \quad (8)$$

Dividindo a eq.(8) por ΔV , no primeiro membro tem-se a variação do volume de água (∂Q) dentro do elemento de volume ΔV . Este resultado representa a taxa de variação temporal da umidade volumétrica. Dessa maneira, a eq.(9) representa a equação da continuidade para fluxo de água em meios porosos.

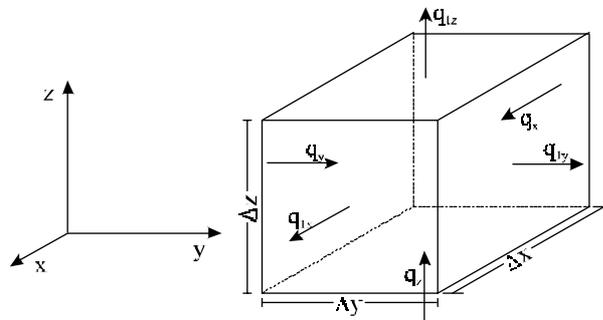


Figura 6 - Elemento de volume definido para determinar a taxa de variação da umidade com o tempo através da equação da continuidade.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) \quad (9)$$

Aplicando a equação de Darcy-Buckingham nas três direções:

$$q_x = -k_x(\theta) \frac{\partial H}{\partial x}, \quad q_y = -k_y(\theta) \frac{\partial H}{\partial y}, \quad q_z = -k_z(\theta) \frac{\partial H}{\partial z}, \quad (10)$$

e substituindo na equação da continuidade tem-se a Equação de Richards:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x(\theta) \frac{\partial H}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y(\theta) \frac{\partial H}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \right). \quad (11)$$

O operador ∇ aplicado ao vetor q é igual ao divergente de q :

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \nabla \cdot \vec{q} = \text{div } \vec{q}. \quad (12)$$

2.2.1 Infiltração horizontal

Seja uma coluna de solo horizontal (Figura 7) com seção transversal e massa específica global³ constantes, de comprimento infinito e umidade inicial constante θ_i . No instante $t=0$, inicia-se o processo de infiltração da água através da placa porosa com resistência desprezível. Durante todo o tempo de infiltração, a extremidade ($x=0$) é mantida saturada (θ_s).

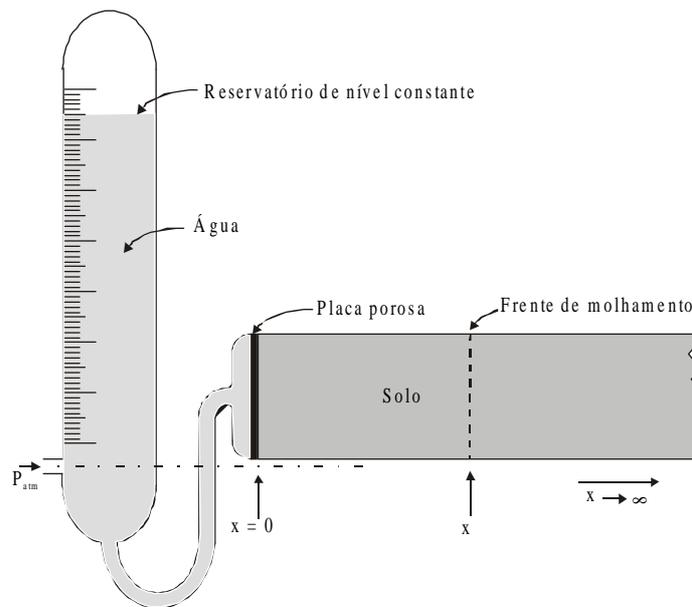


Figura 7 - Coluna horizontal infinita de seção transversal constante preenchida com solo homogêneo.

O fluxo horizontal (absorção) é provocado apenas pela diferença de potencial de pressões (h) entre dois pontos. A contribuição do potencial gravitacional é nula, h é função da umidade e esta, por sua vez, é função da posição horizontal x . Com estas considerações, a equação de Darcy Buckingham pode ser escrita da seguinte forma:

³ Relação entre a massa do solo seco e o volume total.

$$q = -K(\theta) \left(\frac{\partial h}{\partial \theta} \right) \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right) = -D \frac{\partial \theta}{\partial x} \quad (13)$$

onde $D = D(\theta)$ é a difusividade do solo definida por:

$$D(\theta) = K(\theta) \frac{\partial h}{\partial \theta} \quad (14)$$

A Eq.(13) descreve a infiltração horizontal, sujeita às seguintes condições de contorno:

$$\begin{cases} \theta = \theta_i, x > 0, & t = 0 \\ \theta = \theta_s, x = 0, & t > 0 \\ \theta = \theta_i, x \rightarrow \infty, & t > 0 \end{cases}$$

A difusividade pode ser interpretada como uma medida da densidade de fluxo sob um gradiente de umidade. Com a introdução da difusividade, a equação de Richards (11) para a infiltração horizontal, sem a componente gravitacional, pode ser escrita como:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) \quad (15)$$

A solução do problema da infiltração horizontal é dada por uma função $\theta = \theta(x,t)$ que permite calcular a umidade em qualquer ponto x a qualquer instante t . Esta solução não é fácil de ser encontrada a menos que $D(\theta)$ seja conhecida. Swartzendruber (1969) propôs uma solução com x sendo a variável dependente $x = x(\theta,t)$, através da Transformação de Boltzmann:

$$\eta(\theta) = xt^{-1/2} \quad (16)$$

sendo suas derivadas:

$$\begin{cases} \frac{\partial \eta(\theta)}{\partial t} = -\frac{\eta}{2t} \\ \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{d\theta}{d\eta} \frac{\partial \eta}{\partial t} = -\frac{\eta}{2t} \frac{d\theta}{d\eta} \\ \frac{\partial \eta}{\partial x} = t^{-1/2} \end{cases}$$

Essas derivadas, aplicadas na eq.(15) resultam em

$$-\frac{\eta}{2} \frac{d\theta}{d\eta} = \frac{\partial}{\partial \eta} \left[D(\theta) \frac{d\theta}{d\eta} \right] \quad (17)$$

com as seguintes condições de contorno:

$$\begin{array}{l} \eta = 0 \Rightarrow \theta = \theta_s \\ \eta \rightarrow \infty \Rightarrow \theta = \theta_i \end{array}$$

onde θ_s é a umidade de saturação do solo e θ_i é a umidade inicial.

A difusividade hidráulica $D(\theta)$ pode ser determinada a partir das distribuições de umidade obtidas experimentalmente (Bruce & Klute, 1956). Integrando-se a eq.(17) entre os limites θ_i e um θ qualquer, resulta em:

$$\int_{\theta_i}^{\theta} \eta \cdot d\theta = -2 \cdot D(\theta) \frac{d\theta}{d\eta} \quad (18)$$

Bruce & Klute explicitaram $D(\theta)$ da seguinte forma:

$$D(\theta) = -\frac{1}{2t_0} \frac{dx}{d\theta} \int_{\theta_i}^{\theta} x \cdot d\theta \quad (19)$$

Assim, conhecida a curva $\theta(x)$ experimentalmente, em um dado instante t_0 (Figura 8), é possível determinar $D(\theta)$ em t_0 para qualquer θ entre θ_i e θ_s através da eq.(19).

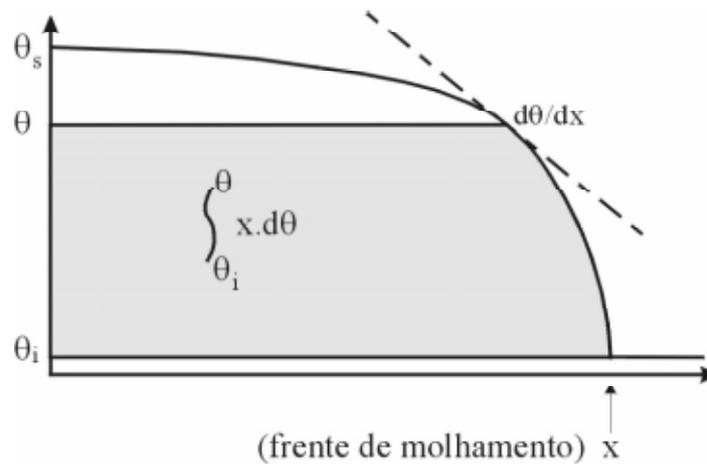


Figura 8 - Curva de $\theta(x)$ para um dado instante t durante a infiltração horizontal em um solo homogêneo com umidade inicial θ_i .

A solução que se busca para o problema da infiltração horizontal é $\theta(\eta)$, apresentada na Figura 9. Os valores de umidade medidos no perfil, dados por $\theta[x(t_1)]$, $\theta[x(t_2)]$, $\theta[x(t_3)]$ etc., são transformados em um único $\theta(\eta)$ dividindo por $t_1^{1/2}$ para o primeiro perfil, $t_2^{1/2}$ para o segundo etc. Quando $t=1$, $x \equiv \eta$; deste modo,

fisicamente, $\theta(\eta)$ é o perfil de água $\theta(x)$ no solo quando o tempo de infiltração é unitário.

A infiltração acumulada (I) é obtida através do cálculo da área abaixo da curva limitada por θ_i e θ_s ,

$$I = \int_{\theta_i}^{\theta_s} x d\theta \quad (20)$$

ou,

$$I = \int_{\theta_i}^{\theta_s} \eta(\theta) \cdot t^{1/2} d\theta \quad (21)$$

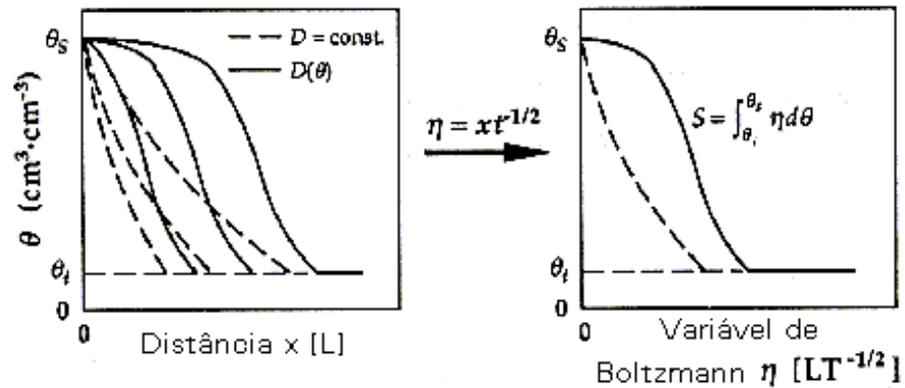


Figura 9 - Transformação de Boltzmann reduz os perfis de umidade do solo $\theta(x)$ para diferentes tempos t a um único perfil $\theta(\eta)$ com $\eta=xt^{-1/2}$ para infiltração horizontal (absorção). As linhas tracejadas representam um “solo linear”, D constante, enquanto as linhas contínuas são para um solo com $D(\theta)$. (Kutílek & Nielsen, 1994).

Sendo $\eta(\theta)$ único para cada solo, Philip (1957) apresentou o termo sortividade $S [LT^{-1/2}]$, capacidade de sorção, conforme dado pela eq.(22):

$$S = \int_{\theta_i}^{\theta_s} \eta(\theta) \cdot d\theta \quad (22)$$

A infiltração pode, então, ser escrita como:

$$I = St^{1/2} \quad (23)$$

e a taxa de infiltração:

$$q = \frac{1}{2} St^{-1/2} \quad (24)$$

Fisicamente, a sortividade pode ser definida como a quantidade de água infiltrada por uma unidade de tempo e, neste intervalo, a velocidade de infiltração diminui para a metade do valor de S.

2.2.2 Infiltração vertical

Para infiltração vertical, ψ_z e ψ_m são os potenciais que contribuem significativamente e as eq.(23) e eq.(24) se aplicam na direção z. A taxa de variação da umidade com o tempo é dada por:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \right) \quad (25)$$

e substituindo H pela soma do potencial de sucção (h) e o potencial gravitacional (z), obtém-se:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} + K(\theta) \right), \quad (26)$$

onde aplicando-se as derivadas indicadas resulta na eq.(27):

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + \frac{\partial K}{\partial \theta} \frac{\partial \theta}{\partial z}, \quad (27)$$

conhecida como equação de Fokker-Planck. O primeiro termo do segundo membro da eq.(27) contabiliza o transporte de água devido ao grau inicial de insaturação do perfil de solo, o segundo termo é devido ao potencial gravitacional.

No início do processo de infiltração, a influência da gravidade é pequena em relação às pressões negativas do solo seco ou potencial matricial solo. Com o decorrer do processo, o aumento da umidade reduz a influência do potencial matricial e eleva a influência do potencial gravitacional. O gráfico da Figura 10 ilustra as participações desses potenciais durante o processo de infiltração em um solo argiloso claro (Yolo light clay).

A eq.(27) sujeita às seguintes condições de contorno:

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta = \theta_i \text{ para } z > 0 \quad \text{e } t = 0 \\ \theta = \theta_i \text{ para } z \rightarrow \infty \quad \text{e } t \geq 0 \\ \theta = \theta_s \text{ para } z = 0 \quad \text{e } t \geq 0 \end{array} \right.$$

Ela pode ser resolvida através da técnica proposta por Philip (1957):

$$z(\theta, t) = \lambda(\theta) t^{1/2} + \chi(\theta) t + \psi(\theta) t^{3/2} + \omega(\theta) t^2 + \dots + f_m(\theta) t^{m/2} \quad (28)$$

onde λ , χ , ψ , ω ... f_m são todas funções de θ . Usando a eq.(26), a profundidade de infiltração, para um par de valores θ e t , pode ser conhecida, quando as funções $\lambda(\theta)$, $\chi(\theta)$, $\psi(\theta)$, $\omega(\theta)$... $f_m(\theta)$ são conhecidas. Philip mostrou que essas funções são soluções de uma série de equações diferenciais ordinárias e podem ser avaliadas por métodos numéricos usando as funções $D(\theta)$ e $K(\theta)$.

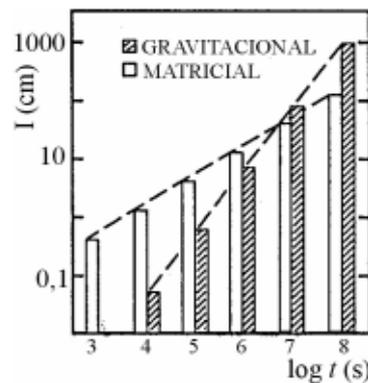


Figura 10 - Influências dos potenciais gravitacional e matricial durante a infiltração (Kunze & Nielsen, 1982).

2.3 Medida das funções hidráulicas do solo

Raats (2001) fez uma retrospectiva do desenvolvimento do estudo da física da água no solo desde meados dos anos 60. O resumo deste trabalho é transcrito abaixo:

“A teoria para estudo do movimento da água na região não saturada do solo, publicada por Richards há 70 anos é ainda um ponto de partida importante para a análise da maioria dos problemas de Física do Solo. Nos últimos 25 anos, tem sido muito grande o interesse em encontrar novas soluções para a equação de Richards, tanto por métodos analíticos quanto por métodos numéricos, particularmente com vistas a situações de campo. Os diversos métodos experimentais tornaram-se sofisticados: os métodos eletromagnéticos para medir umidade e salinidade agora são confiáveis e largamente difundidos, os métodos inversos para inferir as propriedades físicas do solo têm amadurecido. Mas durante este período, também é percebido um alargamento do escopo da Física do Solo além da teoria clássica de Richards com estudos mais profundos de vários aspectos multifásicos, como o movimento simultâneo de água e ar, transporte simultâneo de calor e umidade, fluxo de água e

transporte de solutos em solos estruturados, infiltração de água em solos expansivos e transporte de solutos na região não saturada dos solos. Os dois últimos assuntos citados tornaram-se gerenciáveis através da substituição das tradicionais descrições espaciais pela descrição dos materiais em que, respectivamente, a fase sólida serve como meio contínuo de referência para a água e a água serve como meio contínuo de referência para os solutos. Os avanços nestes estudos não têm ocorrido apenas em bases teóricas, computacionais e experimentais, mas também pela interação produtiva com diversas disciplinas e por desafiantes problemas sociais”.

2.3.1 Métodos experimentais

Os métodos experimentais em Física do Solo são tratados em vários livros (Klute, 1986; Reichardt, 1996; Dirksen 1999; Smith & Mullins, 2000). A pesquisa e a prática em Física do Solo geralmente necessitam de instrumentação altamente especializada. Além de trabalhos científicos, congressos e livros, empresas dirigidas por especialistas em Física do Solo têm tido um papel importante, especialmente nos E.U.A. (Raats, 2001). A estreita relação entre os grupos de pesquisa e as empresas de instrumentos científicos tem estimulado o rápido desenvolvimento comercial e expandido o uso dos novos métodos. O aperfeiçoamento dos métodos existentes é fortemente impulsionado pelos avanços em outros setores da Física e da Engenharia.

Há 25 anos já estavam disponíveis métodos para medir a umidade e o potencial da água e seus componentes. Além do método gravimétrico, já eram muito utilizados os métodos baseados no espalhamento de nêutrons e na atenuação de raios gama. Geralmente, avanços significativos têm vindo do desenvolvimento de sistemas eletrônicos de coleta de dados. O maior desenvolvimento instrumental dos últimos 25 anos tem ocorrido com os métodos dielétricos, que além da umidade, possibilitam medir a concentração de eletrólitos. Os construtores de tensiômetros (Anexo A) têm trocado o tubo em forma de “U” preenchido com água ou mercúrio ou mesmo o vacuômetro por transdutores elétricos, permitindo também o desenvolvimento de micro-tensiômetros (Göttlein et al., 1995). O uso de transdutores de pressão e coletores de dados permite determinar a sensibilidade a fatores de perturbação tais como variações na temperatura diurna e desvio de fluxo ao longo da haste e da tubulação durante precipitações intensas ou de longa duração (Buchter et al., 1999).

Os métodos inversos para determinar as propriedades físicas dos solos, baseados no equilíbrio e regime permanente, datam dos primórdios da moderna Física dos Solos de Buckingham e Richards. Nos anos 50, as soluções da equação de Richards tornaram-se a base da próxima geração de métodos. Nos últimos 25 anos, tem ocorrido um grande progresso na parte experimental, tanto em laboratório como no campo. A combinação de soluções analíticas ou numéricas com algoritmos de otimização levaram a uma grande variedade de novos métodos (Raats, 2001).

Os pesquisadores preferem estimar as funções hidráulicas $K(\theta)$, $K(\Psi_m)$ ou $D(\theta)$ em experimentos de campo, principalmente se estas funções forem utilizadas para solucionar problemas de campo. Os experimentos realizados em laboratório têm como principais desvantagens a dificuldade ou a impossibilidade de simular as pressões naturais que ocorrem no solo e as perturbações causadas pelo processo de amostragem que interrompe a continuidade e a capilaridade da amostra.

Amostras perturbadas não podem ser utilizadas para caracterizar as propriedades hidráulicas do solo. Os dados obtidos são inúteis, mesmo aqueles obtidos de amostras de solos arenosos e homogêneos. Os experimentos de laboratório são úteis para verificar a teoria e obter soluções aproximadas. (Kutílek & Nielsen, 1994)

Os procedimentos para estimar as funções hidráulicas do solo são agrupados em 3 classes: (i) Experimentos com fluxo de água em regime permanente, descritos pela equação de Darcy-Buckingham, realizados com condições de contorno apropriadas. (ii) Experimentos com fluxo de água em regime transiente, conduzidos sob condições restritivas e com condições de contorno selecionadas de modo a permitir a aplicação de soluções analíticas, semi-analíticas ou aproximadas. Tipicamente, prescreve-se algum tipo específico de função para a condutividade hidráulica. (iii) Experimentos com fluxo de água em regime transitório, realizados sem condições restritivas, analisados através de procedimentos de estimação de parâmetros. A confiabilidade das funções de condutividade hidráulica é melhor testada comparando-se com os resultados de um teste de fluxo adicional realizado em campo. Os dados obtidos são comparados com os valores teóricos da equação que contém a função de condutividade hidráulica estimada.

Os instrumentos comumente utilizados para medir o potencial matricial e a umidade do solo são o tensiômetro (Timlin & Pachepsky, 1998) e a sonda de nêutrons ou o TDR (Herrmann et al., 1992; Vaz et al., 2001 e Noborio, 2001), respectivamente. Estes instrumentos medem o valor médio da grandeza na região onde estes estão inseridos, portanto não permitem a determinação da distribuição espacial dos dados.

Várias têm sido as propostas para medir a condutividade hidráulica e a retenção da água no solo, porque estas propriedades são relativamente difíceis de serem medidas (Dirksen, 1999). Os parâmetros do modelo muitas vezes tornam-se impossíveis de serem medidos diretamente, devido ao tempo, aos recursos financeiros, à instrumentação, à escala e às restrições conceituais (Abbaspour et al., 2001). Em procedimentos básicos de laboratório, a retenção da água é medida em amostras em equilíbrio e a condutividade hidráulica do solo não saturado é medida em amostras onde é estabelecido um fluxo estacionário (American Society of Agronomy, 1982). Vários métodos são sugeridos para inferir propriedades hidráulicas do solo de dados obtidos em fluxo não-estacionário. Alguns métodos usam integrais da equação de Richards, eq.(11), para calcular a condutividade hidráulica do solo quando a sua curva de retenção de água é conhecida. Outros métodos sugeridos são o método do ar quente (Gieske & de Vries, 1990), método de Wind (Mohrath et al., 1997), métodos baseados em tensiômetro (Timlin & Pachepsky, 1998) e método integral (Pachepsky & Scherbakov, 1983). A retenção de água tem que ser medida para, independentemente ou em paralelo nas mesmas amostras/perfis onde o fluxo é monitorado, calcular a condutividade hidráulica.

O desenvolvimento de modelos que relacionam a retenção de água com condutividade hidráulica (Mualem, 1978; Van Genuchten, 1980) forneceram um conjunto de parâmetros para calcular a curva de retenção de água no solo e a curva de condutividade hidráulica do solo. Estes modelos permitem estimar todos estes parâmetros de um único experimento. Devido à retenção da água não ser conhecida *a priori*, as soluções numéricas, ao invés da integrais da equação de Richards, têm que ser ajustadas aos dados. As soluções numéricas da equação de Richards requerem condições nas fronteiras do domínio do fluxo. Portanto, a entrada ou saída do fluxo têm que ser medidas juntamente com a distribuição do conteúdo de água nas

amostras de solo. No primeiro método deste tipo, Eching & Hopmans (1992) mediram de fluxo, aplicando uma carga de sucção única, suficiente para percorrer praticamente toda a curva de retenção do solo em estudo (“one-step method”). Neste método e em suas variantes, o fluxo de saída de água fornece uma condição de contorno que pode ser usada juntamente com a quantidade de água na amostra, para estimar os parâmetros do modelo “retenção de água – condutividade hidráulica”.

Experimentos em colunas de solo com medidas em várias profundidades apresentam um arranjo conveniente para aplicar métodos baseados na solução da equação de Richards, porque o fluxo de entrada de água, em experimentos de infiltração, ou o fluxo de saída, em experimentos de evaporação, são conhecidos. Conhecidas as condições de contorno, a equação de Richards pode ser resolvida numericamente. Em experimentos deste tipo, pequenos tensiômetros têm que ser instalados em coluna de solo em várias profundidades a fim de monitorar alterações no potencial da água durante o experimento. O perfil de potenciais é comparado com o perfil calculado pela equação de Richards e os parâmetros do modelo de “retenção-condutividade” são gradualmente ajustados a fim de fornecer a melhor solução para os dados fornecidos. As dificuldades de instalação de tais tensiômetros impossibilitam uma ampla aplicação desta técnica.

A técnica das tomografias ao longo do perfil elimina os problemas de instalação e manutenção relacionados com os tensiômetros instalados em colunas. O princípio do método permanece o mesmo, como por exemplo o método de Wind. Os resultados da solução numérica da equação de Richards são comparados com os dados do perfil e os parâmetros do modelo “retenção-condutividade” são gradualmente ajustados para obter a melhor solução. Duas diferenças entre o método da tomografia e os métodos já desenvolvidos devem ser levadas em conta. Primeiramente, os dados obtidos no perfil não são potenciais hidráulicos e sim valores de umidade. Teoricamente, isto não é importante porque a solução numérica da equação de Richards fornece o potencial da água e a umidade do solo. A segunda diferença está no tempo em que as medidas são feitas. Enquanto que nos métodos tradicionais de medida do perfil, os potenciais da água ao longo do perfil são medidos simultaneamente, a tomografia fornece umidades em tempos diferentes. Isto também não é teoricamente importante, porque a solução numérica da equação de

Richards pode ser obtida em diferentes profundidades em qualquer tempo. Portanto, os parâmetros do modelo “retenção-condutividade” podem ser gradualmente ajustados para produzir a solução numérica para os dados obtidos em diferentes profundidades em momentos diferentes.

Nota-se, a partir da breve introdução teórica apresentada no item anterior, que a complexidade dos cálculos torna-se muito grande e a propagação de erros é considerável quando, nos modelos, são introduzidas as variabilidades espacial e temporal do solo. Pretende-se, com a metodologia a ser apresentada, contribuir com uma ferramenta capaz de fornecer resultados mais precisos para estudo da infiltração da água no solo, em condições de campo.

3 A TOMOGRAFIA COMO METODOLOGIA DE ESTUDO DA INFILTRAÇÃO DA ÁGUA NO SOLO

Historicamente, as maiores contribuições para a tomografia computadorizada foram dadas por Radon, Cormack e Hounsfield. Radon (1917) desenvolveu a matemática de reconstrução de uma função a partir de suas projeções. Cormack (1963) desenvolveu o método da retroprojeção a partir de transmissões de raios X. Hounsfield (1968 e 1973) construiu e testou o primeiro tomógrafo de raios X. Devido a estas contribuições, Hounsfield e Cormack dividiram o prêmio Nobel de medicina em 1979. No Brasil, o desenvolvimento de tomógrafos dedicados a pesquisa agrícola (Cruvinel, 1987) e a testes não destrutivos de materiais (Lopes, 1988) tem viabilizado economicamente o acesso a técnica tomográfica, até então restrita aos hospitais.

3.1 Aplicação da tomografia em Física dos Solos

Nos dias atuais, dentre as várias técnicas e instrumentos utilizados para o estudo da água no solo, destaca-se a TC. Os trabalhos pioneiros de TC aplicados à ciência do solo foram desenvolvidos por Petrovic et al. (1982), Hainsworth & Aylmore (1983) e Crestana et al. (1985a). Petrovic et al. (1982) demonstraram que a TC pode ser utilizada para medir a massa específica global de um solo. Hainsworth & Aylmore (1983) utilizaram a TC para determinar a distribuição espacial do conteúdo de água de um solo. Crestana et al. (1985a) demonstraram que é possível utilizar esta técnica para medir a umidade do solo e o movimento da água neste meio, em três dimensões além de calibrarem o tomógrafo em termos de massa específica e umidade em função de unidades Hounsfield.

Na área de Engenharia Ambiental, foi desenvolvido e aplicado um tomógrafo de resolução micrométrica para estudos, em laboratório, da distribuição de poros e de grãos, possibilitando entre outros, estudar o selamento superficial do solo e o

aparecimento de fraturas (Macedo, 1998). O fluxo de água e solutos na região não-saturada do solo é dependente e governado pela distribuição de poros da matriz deste meio poroso, conforme recentemente mostrado por Onody et al. (1995).

Os primeiros resultados de validação da TC aplicada ao estudo de problemas da pesquisa agropecuária foram obtidos em tomógrafos médicos comerciais, extremamente caros, em torno de 500 mil dólares, e sofisticados para utilização em pesquisa tão específica. Solucionando este problema, Crestana et al. (1986) demonstraram ser possível utilizar um tomógrafo dedicado mais simples e muito mais barato, em torno de 20 mil dólares, construído por Cesareo & Giannini (1980).

Dentre as várias aplicações da TC em ciência do solo (Crestana, 1996a), destacam-se:

- Compactação;
- Penetração de raízes;
- Encrostamento;
- Ciclos de umedecimento e secagem;
- Deslocamento miscível e imiscível de nutrientes na presença de raízes e
- Fluxo preferencial de poluentes em solos fraturados.

3.2 Tomógrafos dedicados a estudos de solos

Os tomógrafos computadorizados até hoje desenvolvidos pela Embrapa Instrumentação Agropecuária para estudo de solos tanto in situ (Naime, 1994) como em laboratório (Cruvinel et al., 1990; Macedo 1997) são de 1ª geração. A TC de 1ª geração fornece boa qualidade de imagem, mas apresenta como desvantagem o elevado tempo de varredura. A Figura 11 e a Tabela 1 mostram, respectivamente, os esquemas de varredura e as características de cada geração de tomógrafos. Quando se deseja estudar parâmetros de fenômenos dinâmicos que variam em minutos, tais como a infiltração da água no solo, ou de solutos como nutrientes e pesticidas, ou mesmo obter imagens tridimensionais, deve-se procurar diminuir o tempo de varredura utilizando-se os sistemas de 2ª ou 3ª geração.

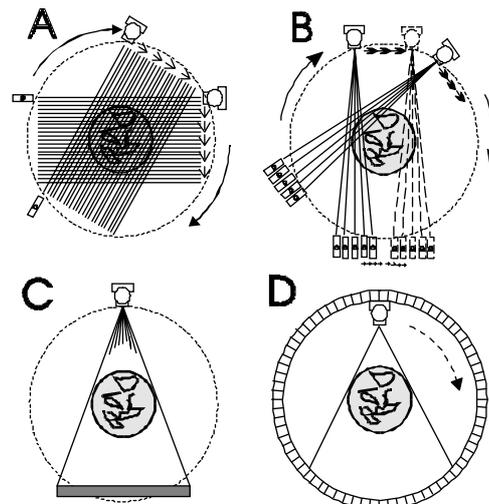


Figura 11 - Movimentos de varredura na tomografia computadorizada (Hendee, 1984).

O uso de um tomógrafo de campo, com sistema de varredura de 3ª geração, permite estudar o transporte de água na região não saturada do solo através de varreduras tomográficas rápidas o suficiente para acompanhar o avanço da frente de molhamento. Através deste estudo, podem-se determinar parâmetros físicos relevantes, com maior fidelidade às condições de campo, a fim de alimentar modelos matemáticos de água no solo e de simular o destino de pesticidas e nutrientes na região não saturada do solo.

Tabela 1 - Comparação do tempo de aquisição de dados para quatro gerações de tomógrafos.

Geração	Feixe radioativo	Detectores	Movimentos	Tempo
1ª (Figura 11A)	Fino, colimado	1	Translação e rotação, fonte e detector	Horas
2ª (Figura 11B)	Em leque, envolvendo parte da amostra	em torno de 10	Translação e rotação, fonte e detector	Minutos
3ª (Figura 11C)	Em leque, envolvendo toda a amostra	De 100 a mais de 600	Rotação da fonte e detector	Segundos
4ª (Figura 11D)	Em leque, envolvendo toda a amostra	mais de 1000	Rotação da fonte	< 1 s

3.3 Princípios da tomografia

Tomografia computadorizada por transmissão é o processo de obtenção da imagem reconstruída da seção transversal ou fatia de um corpo, utilizando-se um

equipamento externo, controlado por computador. O processo ocorre através de múltiplas projeções obtidas de quaisquer radiações ou partículas com energia suficiente para passar através do corpo de interesse (Figura 12), dentre as quais podemos citar raios X, raios γ e ondas ultra-sônicas.

À medida em que um feixe radioativo atravessa uma amostra, ele é atenuado devido às interações da radiação com a matéria. Os fundamentos teóricos da interação da radiação com a matéria são descritos por vários autores, dentre eles citam-se Wang et al. (1975) e Knoll (1989). De maneira geral, pode-se considerar o número atômico dos elementos químicos constituintes da amostra e a massa específica como os fatores predominantes nas medidas de atenuação da radiação ionizante.

Se I fótons emergem de uma amostra homogênea de comprimento x , irradiada com I_0 fótons incidentes em uma dada direção, podemos calcular o coeficiente de atenuação linear (μ), para um feixe monoenergético, utilizando a lei de Lambert-Beer:

$$I = I_0 \cdot \exp(-\mu x). \quad (29)$$

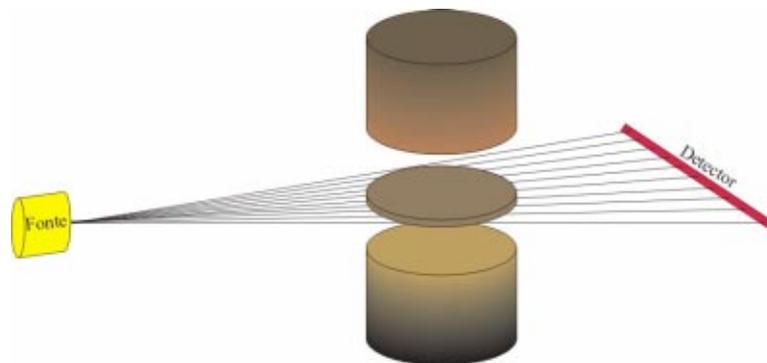


Figura 12 - Plano de uma varredura axial da tomografia computadorizada.

Para uma amostra homogênea, $\mu[\text{L}^{-1}]$ é caracterizado pela energia da radiação incidente, além das propriedades físicas da amostra. O μ de um material indica a probabilidade de ocorrência de absorção ou espalhamento da radiação, de uma determinada energia, por unidade de comprimento do caminho que o feixe radioativo percorre neste material. Para ter-se um parâmetro que caracteriza uma amostra

independente de sua massa específica (ρ), define-se o coeficiente de atenuação em massa $\mu^*[\text{L}^2.\text{M}^{-1}]$ como a divisão de μ pela massa específica.

Considerando-se uma amostra heterogênea (Figura 13), os fótons que percorrem a amostra nas diversas direções encontram em seu caminho elementos de volume com diferentes valores de massa específica. Portanto, os fótons emergentes são proporcionais à integral de todos os $\mu(x,y)$ do caminho L. Substituindo esta integral na eq.(29) e denominando l a medida de distância sobre L temos:

$$I = I_0 \cdot \exp \left[- \int_L \mu(x,y) dl \right]. \quad (30)$$

Portanto, as medidas de I e I_0 permitem calcular $\ln(I_0/I)$, raio-soma no caminho L.

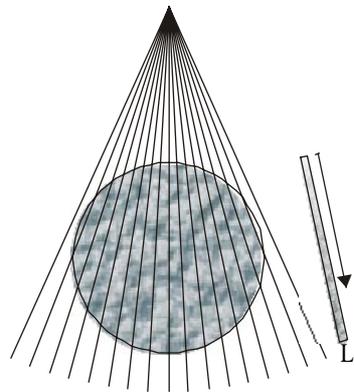


Figura 13 - Caminhos L percorridos pelos fótons de um feixe em leque.

O conjunto de raios-soma formam uma projeção do objeto em uma dada direção. Durante a varredura tomográfica, as projeções são obtidas em várias posições angulares igualmente espaçadas até completar 360° (3ª geração). A partir destas projeções é possível reconstruir matematicamente a imagem do objeto, i.e., os valores de $\mu(x,y)$ são calculados para cada ponto do plano tomográfico e uma imagem pode ser associada a estes valores distribuídos em uma escala de cinzas ou cores.

Em um sistema de varredura de 3ª geração pode-se utilizar um arranjo circular de detectores distribuídos em ângulos iguais ou um arranjo linear de detectores equidistantes. Para cada caso há um desenvolvimento matemático específico para o algoritmo de reconstrução de imagem. O equipamento desenvolvido neste trabalho utiliza um arranjo linear de detectores.

3.4 Método da retroprojeção filtrada para feixe em leque e arranjo linear de detectores

A partir das projeções obtidas na varredura tomográfica, é possível reconstruir a imagem fazendo a retroprojeção na área de varredura circular coberta pelo feixe radioativo. Como na prática tem-se um número de finito de projeções, ocorre um artefato no contorno da imagem chamado de efeito estrela. Para atenuar este ruído, uma função filtro apropriada é aplicada às projeções.

A seguir será apresentado o algoritmo de reconstrução de imagem através do método da retroprojeção filtrada, para um feixe em leque incidente sobre uma linha de detectores (Kak & Slaney, 1987). O desenvolvimento é feito a partir da expressão deduzida para projeções paralelas do esquema de varredura de 1ª geração (Figura 11A).

A Figura 14 representa as projeções de um feixe em leque sobre um arranjo linear de detectores, onde s é um eixo ao longo da linha de detectores. A projeção em uma dada posição angular β é representada por $R_\beta(s)$. Embora as projeções sejam medidas na linha de detectores D_1D_2 (Figura 15), é conveniente assumir a linha de detectores imaginária $D_1'D_2'$ que passa pela origem ou centro do mecanismo de varredura. Desta forma, o raio-soma FB é associado ao ponto A em $D_1'D_2'$, correspondente ao ponto B em D_1D_2 . Para o raio-soma FA , s corresponde ao comprimento OA . Se fosse gerada uma projeção paralela nesta direção, o raio FA pertenceria à projeção paralela $P_\theta(t)$. θ e t são mostrados na Figura 16. A relação entre β e t para raios paralelos é dada por:

$$\begin{aligned} t &= s \cos \gamma & \theta &= \beta + \gamma \\ t &= \frac{sD}{\sqrt{D^2 + s^2}} & \theta &= \beta + \tan^{-1} \frac{s}{D}, \end{aligned} \quad (31)$$

obtidas a partir da semelhança entre os triângulos AOC e OFC . D é a distância entre a fonte F e a origem O .

A eq.(32) reconstrói, através do método da retroprojeção filtrada, a imagem de um objeto a partir das projeções obtidas de um feixe paralelo (Kak & Slaney, 1987). O intervalo de integração para feixes paralelos é de 180° e para feixe em leque 360° (Anexo B).

$$f(r, \phi) = \int_0^{\pi} \int_{-t_m}^{t_m} P_{\theta}(t) h(r \cos(\theta - \phi) - t) dt d\theta =$$

$$\frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \int_{-t_m}^{t_m} P_{\theta}(t) h(r \cos(\theta - \phi) - t) dt d\theta \quad (32)$$

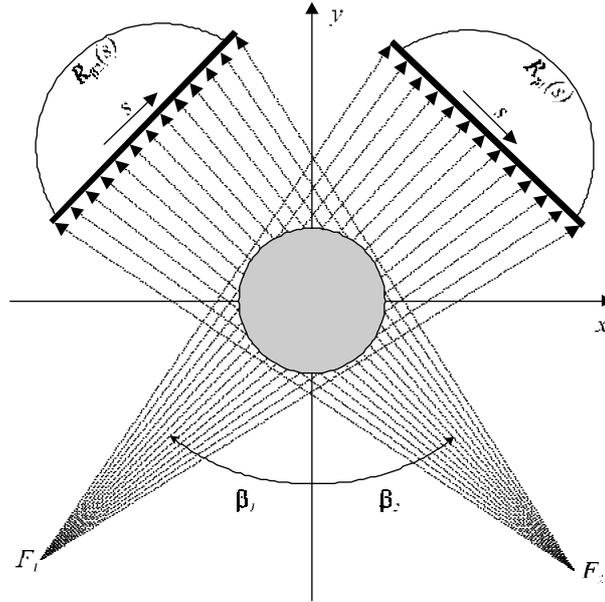


Figura 14 - Representação das projeções de um feixe em leque.

$f(r, \phi)$ é a imagem reconstruída em coordenadas polares⁴ e $h(t)$ ⁵ é a resposta a impulso do filtro. Utilizando as relações apresentadas nas eqs.(31), a eq.(32) pode ser expressa para o feixe em leque da seguinte forma:

$$f(r, \phi) = \frac{1}{2} \int_{-\tan^{-1}(s_m/D)}^{2\pi - \tan^{-1}(s_m/D)} \int_{-s_m}^{s_m} P_{\beta+\gamma} \left(\frac{sD}{\sqrt{D^2 + s^2}} \right)$$

$$h \left[r \cos \left(\beta + \tan^{-1} \left(\frac{s}{D} \right) - \phi \right) - \frac{Ds}{\sqrt{D^2 + s^2}} \right] \frac{D^3}{(D^2 + s^2)^{3/2}} ds d\beta \quad (33)$$

onde

⁴ $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ e $\phi = \text{tg}^{-1}(y/x)$

⁵ $h(t)$ é apresentada mais adiante juntamente com a função filtro.

$$dt d\theta = \frac{D^3}{(D^2 + s^2)^{3/2}} ds d\beta . \tag{34}$$

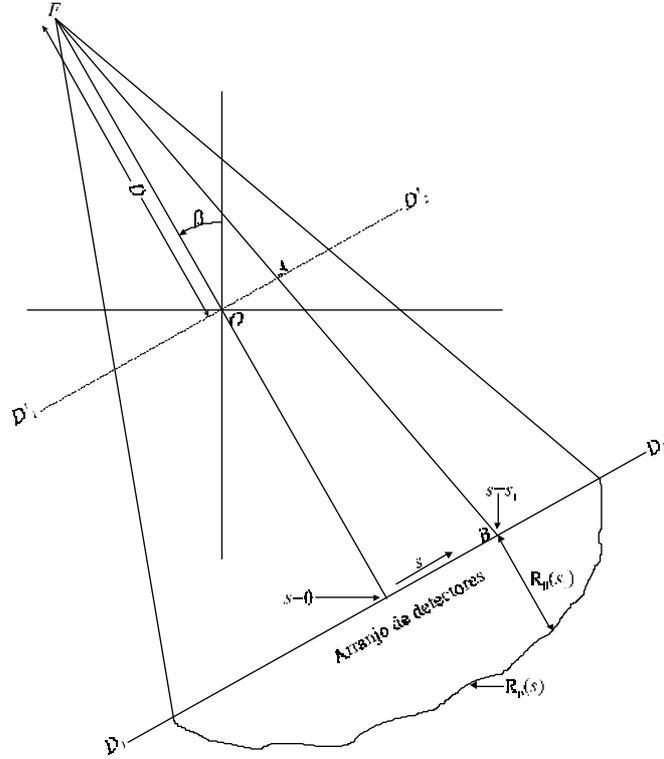


Figura 15 - Representação de uma projeção $R_\beta(s)$ na posição angular β .

Na eq.(33), s_m é o valor máximo de s em cada projeção e corresponde ao t_m da projeção paralela. Os limites da primeira integral cobrem sempre um período igual a 2π . Sendo todas as funções de β periódicas com período igual a 2π , os limites inferior e superior podem ser substituídos por 0 e 2π , respectivamente. Além disto, a expressão:

$$P_{\beta+\gamma} \left(\frac{sD}{\sqrt{D^2 + s^2}} \right), \tag{35}$$

corresponde ao raio-soma ao longo de FA da projeção paralela $P_\alpha(t)$, que é o próprio raio-soma da projeção $R_\beta(s)$ do feixe em leque. Substituindo na eq.(33) temos

$$f(r, \phi) = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \int_{-s_m}^{s_m} R_\beta(s) \cdot h \left(r \cdot \cos \left(\beta + \tan^{-1} \left(\frac{s}{D} \right) - \phi \right) - \frac{Ds}{\sqrt{D^2 + s^2}} \right) \frac{D^3}{(D^2 + s^2)^{3/2}} ds d\beta \tag{36}$$

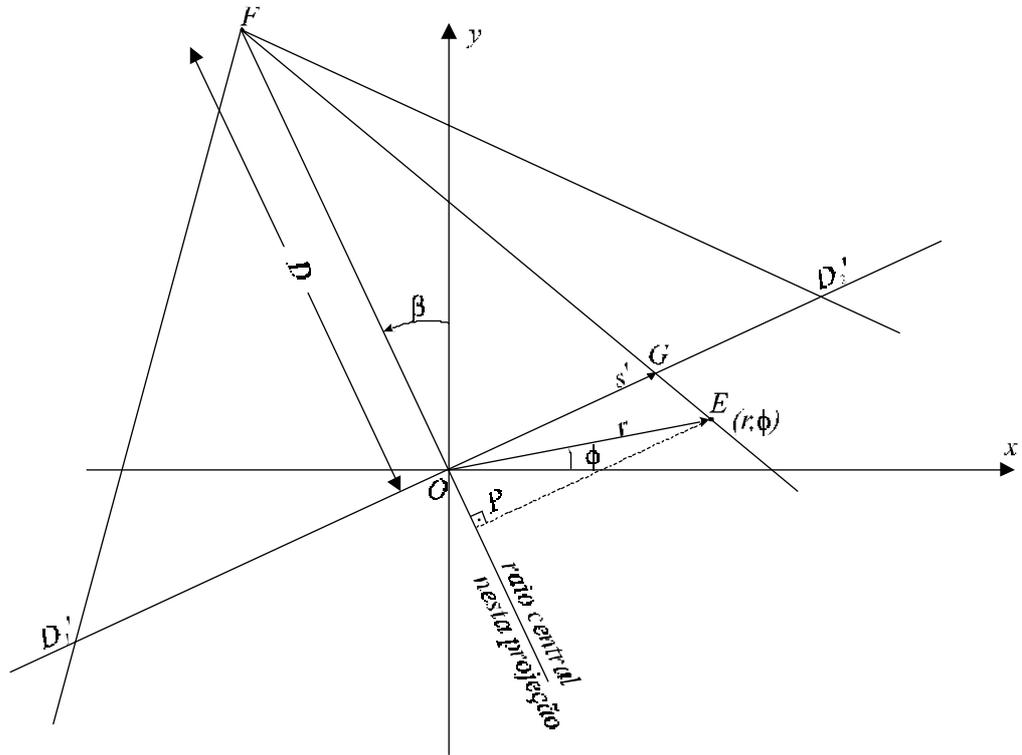


Figura 17 - Para uma célula localizada nas coordenadas polares (r, ϕ) , a variável U é a razão entre a distância FP , projeção de FE sobre o raio central, e a distância entre fonte e centro (D).

Expressando a eq.(37) em termos de U e s' obtém-se:

$$\frac{1}{\sqrt{D^2 + s^2}} (D.r.\cos(\beta - \phi) - s(D + r.\sen(\beta - \phi))) = \frac{s'UD}{\sqrt{D^2 + s^2}} - \frac{sUD}{\sqrt{D^2 + s^2}}. \quad (41)$$

Substituindo a eq.(41) na eq.(36), a retroprojeção se apresenta da seguinte forma:

$$f(r, \phi) = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \int_{-s_m}^{s_m} R_\beta(s).h\left((s'-s)\frac{UD}{\sqrt{D^2 + s^2}}\right) \frac{D^3}{(D^2 + s^2)^{3/2}} dsd\beta. \quad (42)$$

Sabe-se que $h(t)$ é a transformada inversa de Fourier da função filtro com frequência espacial $|w|$:

$$h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} |w| e^{j.2\pi wt} dw \quad (43)$$

portanto,

$$h\left((s'-s)\frac{UD}{\sqrt{D^2+s^2}}\right) = \int_{-\infty}^{\infty} |w| e^{j \cdot 2\pi \cdot w(s'-s) \left(\frac{UD}{\sqrt{D^2+s^2}}\right)} dw. \quad (44)$$

Utilizando a transformação:

$$w' = w \frac{UD}{\sqrt{D^2+s^2}} \quad (45)$$

a eq.(44) pode ser escrita da seguinte maneira:

$$h\left((s'-s)\frac{UD}{\sqrt{D^2+s^2}}\right) = \frac{D^2+s^2}{U^2 D^2} \int_{-\infty}^{\infty} |w'| \cdot e^{j \cdot 2\pi (s'-s) \cdot w'} \cdot dw' = \frac{D^2+s^2}{U^2 D^2} h(s'-s). \quad (46)$$

Substituindo a eq.(46) na eq.(42), obtém-se:

$$f(r, \phi) = \int_0^{2\pi} \frac{1}{U^2} \int_{-\infty}^{\infty} R_{\beta}(s) \cdot g(s'-s) \frac{D}{\sqrt{D^2+s^2}} ds d\beta \quad (47)$$

onde

$$g(s) = \frac{1}{2} h(s). \quad (48)$$

Para a implementação computacional, a eq.(47) pode ser interpretada como a retroprojeção filtrada. Para demonstrar isto, reescreve-se a eq.(47) da seguinte forma:

$$f(r, \phi) = \int_0^{2\pi} \frac{1}{U^2} Q_{\beta}(s') d\beta \quad (49)$$

onde $Q_{\beta}(s')$ é a projeção filtrada, obtida da convolução⁶ da projeção modificada $R_{\beta}'(s)$ com $g(s)$:

$$Q_{\beta}(s') = R_{\beta}'(s) * g(s) \quad (50)$$

e

$$R_{\beta}'(s) = R_{\beta}(s) \cdot \frac{D}{\sqrt{D^2+s^2}} \quad (51)$$

Seja a o comprimento do intervalo de amostragem dos raios-soma, então a frequência espacial de amostragem é $1/a$. Para atenuar o *aliasing* (Anexo C), responsável pelo efeito estrela na imagem, as frequências maiores que a metade da

⁶ As características das duas funções convoluídas são combinadas em uma única função. Convoluir com uma função filtro significa amostrar a função original através dos limites impostos pelo filtro.

freqüência de amostragem devem ser filtradas. Portanto, a banda de freqüências passantes é limitada no intervalo $(-W, W)$ onde:

$$W = \frac{1}{2a} \text{ [L}^{-1}\text{]} \quad (52)$$

então, no domínio da freqüência, a função de transferência (Figura 18) do filtro ideal $H(w)$ é dada por:

$$\begin{cases} H(w) = |w|, & |w| \leq W \\ H(w) = 0, & |w| > W. \end{cases}$$

A resposta a impulso deste filtro é calculada pela transformada inversa de Fourier de $H(w)$, ou seja:

$$h(s) = \int_{-\infty}^{\infty} H(w) \cdot e^{j2\pi ws} dw = \frac{1}{2a^2} \frac{\text{sen}(2\pi s / 2a)}{2\pi s / 2a} - \frac{1}{4a^2} \left(\frac{\text{sen}(\pi s / 2a)}{\pi s / 2a} \right)^2 \quad (53)$$

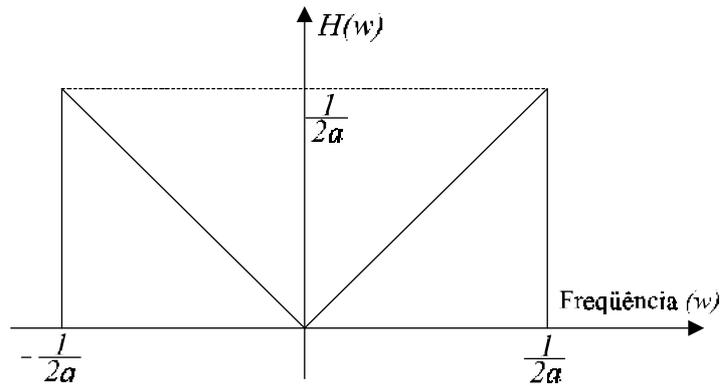


Figura 18 - Função de transferência do filtro $H(w) = |w|$, freqüência de corte $1/(2a)$.

Como as medidas da projeção são valores discretos, obtidos por detectores com largura a , $h(s)$ é representado em sua forma discreta $h(na)$, onde n é um número inteiro que identifica cada detector do arranjo. Portanto, na forma discreta, a eq.(53) pode ser escrita da seguinte forma:

$$\begin{cases} h(na) = \frac{1}{4a^2}, & n = 0 \\ h(na) = 0, & n \text{ par} \\ h(na) = -\frac{1}{n^2 \pi^2 a^2}, & n \text{ ímpar.} \end{cases} \quad (54)$$

Sejam $R_{\beta_i}(na)$ as medidas de atenuação obtidas na varredura tomográfica, n igual a zero no centro da linha de detectores e β_i as posições angulares em que a projeções do feixe em leque são medidas. A partir da discretização das eqs. (49), (50) e (51) faz-se a implementação computacional do algoritmo de reconstrução, da seguinte forma:

i) Gera-se a projeção modificada $R'_{\beta_i}(na)$ a partir de cada projeção medida $R_{\beta_i}(na)$:

$$R'_{\beta_i}(na) = R_{\beta_i}(na) \cdot \frac{D}{\sqrt{D^2 + n^2 a^2}} \quad (55)$$

ii) Calcula-se a convolução da projeção modificada $R'_{\beta_i}(na)$ com o filtro $g(na)$ para obter a projeção filtrada:

$$Q_{\beta_i}(na) = R'_{\beta_i}(na) * g(na), \quad (56)$$

sendo $g(na) = \frac{1}{2} \cdot h(na)$, obtém-se a seguinte resposta a impulso do filtro convolutivo:

$$g(na) = \begin{cases} \frac{1}{8a^2}, & n = 0 \\ 0, & n \text{ par} \\ -\frac{1}{2n^2 \pi^2 a^2}, & n \text{ ímpar} \end{cases} \quad (57)$$

iii) Calcula-se o somatório de todos os raios-soma que passaram pelo ponto (x,y) , e obtém-se a imagem retroprojetada:

$$f(x, y) = \Delta\beta \sum_{i=1}^M \frac{1}{U^2(x, y, \beta_i)} Q_{\beta_i}(s') \quad (58)$$

onde s' identifica o raio que passa por (x,y) , pertencente ao feixe rotacionado com o ângulo β . O valor de s' pode não corresponder a aqueles valores de na em Q_{β_i} é conhecido. Neste caso, é necessário fazer a interpolação entre os valores medidos.

O algoritmo descrito acima foi implementado, com alterações descritas no Capítulo 4, no programa de reconstrução de imagem desenvolvido neste trabalho. Este programa grava a imagem em arquivo formato padrão mapa de bits (bmp) do Windows™, em 256 tons de cinza ou 512 tons de cores. Cada célula representa um quadrado cuja dimensão é definida pela resolução da varredura tomográfica. O tom

de cinza de cada célula é atribuído a partir de uma escala onde o preto (zero) corresponde à menor atenuação, ou seja o ar em torno da amostra, e o branco (255) corresponde à maior atenuação presente na amostra.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Metodologia de estudo do avanço da frente de molhamento em solos

Através das imagens de sucessivas tomografias de diversos planos transversais de amostras do perfil de solo e dos dados obtidos, pode-se acompanhar o avanço da frente de molhamento em estado transiente e em regime estacionário (Crestana et al., 1985b e Posadas et al., 1996).

As medidas obtidas com o tomógrafo portátil, em laboratório ou em campo, possibilitam determinar parâmetros físicos do solo, empregando a solução numérica da equação de Richards e o modelo “Retenção de água-condutividade hidráulica”, de Rossi-Nimmo (1994). Antes de apresentar este método, mostra-se uma importante observação sobre algumas grandezas envolvidas na infiltração.

Analisando a equação de Darcy-Buckingham, eq.(3), aplicada à direção vertical, a densidade de fluxo (q) representa a vazão de água por unidade de área de seção transversal de solo:

$$q = \frac{V_a}{A.t} \quad [LT^{-1}] \quad (59)$$

onde:

V_a : volume de água;

A : área da seção transversal do solo paralela ao plano horizontal e

t : tempo.

Apesar de q ter dimensão de velocidade, ela não representa a velocidade real com que a solução se move nos poros do solo, uma vez que a seção transversal disponível para o fluxo exclui a área ocupada pelas partículas de solo. Assim, define-se a velocidade real média v :

$$v = \frac{V_a}{A_a.t} \quad (60)$$

sendo A_a : área ocupada pelo líquido = $A_{total} - (A_{sólida} + A_{ar})$.

O programa do tomógrafo permite calcular a área da seção do solo umedecida a partir das imagens das seções transversais da coluna ou perfil de solo, obtidas com a amostra seca e úmida, repetidas nas mesmas seções. A contabilização das células da imagem obtida através da subtração entre as imagens “úmida” e “seca”, permite calcular a área úmida.

Dividindo-se a eq.(59) pela eq.(60), a equação para v fica igual a:

$$v = \frac{qA}{A_a} \quad (61)$$

A_a/A representa a fração da área de solo que é ocupada pelo líquido em movimento.

A seguir, são apresentadas a solução numérica da equação de Richards e o modelo “Retenção de água-condutividade hidráulica”, desenvolvidos por Shcherbakov et al. (1986) Estas soluções serão utilizadas para calcular a variação da umidade em função do tempo, a curva de infiltração e a curva de retenção da água no solo.

4.1.1 Solução numérica da equação de Richards

Na direção z do fluxo vertical da água, a solução numérica da equação de Richards parte da forma dada pela eq.(26) com as seguintes condições de contorno:

$$h = h_0, \quad z = 0, \quad t > 0, \\ q|_{z_b} = \left[k \frac{\partial h}{\partial z} + k \right]_{z_b} = k|_{z_b}, \quad \text{para} \quad \frac{\partial h}{\partial z} \Big|_{z_b} = 0 \quad (62)$$

h_0 é a sucção no topo da coluna, igual à altura da coluna d'água acima do solo tomada com sinal negativo; $q|_{z_b}$ é a densidade de fluxo descendente na base da coluna (z_b); a condição de contorno define drenagem livre. As condições iniciais foram representadas pelas umidades antes da aplicação da água.

A equação de Richards foi resolvida pelo método de diferenças finitas com aproximação de conservação de massa no termo da umidade (Sherbakov et al., 1987; Celia et al., 1990). A aproximação dos pontos internos é feita através da seguinte relação:

$$c_i^{(s-1)} \frac{h_i^{(s)} - h_i^{(s-1)}}{\Delta t^n} + \frac{\theta_i^{(s-1)} - \theta_i^n}{\Delta t^n} = -\frac{\omega}{(\Delta z)^2} \left[k_{i+1/2}^{(s-1)} (h_{i+1}^{(s)} - h_i^{(s)} + \Delta z) - k_{i-1/2}^{(s-1)} (h_i^{(s)} - h_{i-1}^{(s)} + \Delta z) \right] - \frac{1-\omega}{(\Delta z)^2} \left[k_{i+1/2}^n (h_{i+1}^n - h_i^n + \Delta z) - k_{i-1/2}^n (h_i^n - h_{i-1}^n + \Delta z) \right] \quad (63)$$

O subscrito i denota os pontos internos z_i , $i=0,1,2,\dots,N$, $z_0=0$, $z_N=z_b$, $\Delta z=z_{i+1}-z_i$; nos cálculos foi adotado $N=100$, s é o número de iterações para prosseguir do nível-instante n para o nível-instante $n+1$; ω é o parâmetro de convergência – foi utilizado $\omega=0,55$; c é a capacidade diferencial de água no solo - $c = \partial\theta/\partial h$. A condutividade hidráulica em pontos médios $k_{i+1/2}$ foi calculada como uma integral média utilizando-se aproximação discreta log-linear (Shcherbakov et al., 1986).

O critério de convergência utilizado para a iteração foi o seguinte:

$$\begin{cases} \max |h^{(s)} - h^{(s-1)}| < \varepsilon_1, & h^{(s)} < 10 \\ \max |1 - h^{(s)} / h^{(s-1)}| < \varepsilon_2, & h^{(s)} \geq 10 \end{cases} \quad (64)$$

onde ε_1 e ε_2 são 0,1 e 0,001, respectivamente. O passo na escala de tempo varia; se o número de iterações for maior que 7, o passo decresce 1,2 vezes; se o número de iterações for maior que 3, o passo aumenta 1,05 vezes mas não excede 0,001 dia (1,44 minutos).

4.1.2 Modelo “Retenção de água-condutividade hidráulica”

Devido ao solo estar seco no início do experimento, o conhecido modelo retenção de água-condutividade hidráulica de Van Genuchten (1980) não pode ser utilizado. Utilizou-se o modelo proposto por Rossi & Nimmo (1994). Estes autores estenderam o modelo de Campbell (1974) numa faixa de umidade desde a saturação completa até solo secos em estufa.

O modelo de retenção da água é descrito por:

$$\frac{\theta}{\theta_s} = \begin{cases} \theta_I = 1 - C \left(\frac{h}{h_0} \right)^2, & 0 \leq h \leq h_I \\ \theta_{II} = \left(\frac{h_0}{h} \right)^\lambda, & h_I \leq h \leq h_J \\ \theta_{III} = \alpha \ln \frac{h_D}{h}, & h_J \leq h \leq h_D \end{cases} \quad (65)$$

h_0 e λ são dois parâmetros do modelo, h_D é a sucção do solo seco, $h_D=5.10^7$ cm, θ_s é umidade saturada. Os parâmetros h_i , h_j , C e α são determinados analiticamente, como funções de h_0 e λ , através das igualdades da eq.(66), que garantem a continuidade do modelo junção de dois parâmetros, desenvolvido por Rossi & Nimmo (1994).

$$\begin{aligned} \theta_I(h_I) = \theta_{II}(h_I) & \quad \frac{\partial \theta_I}{\partial h}(h_I) = \frac{\partial \theta_{II}}{\partial h}(h_I) \\ \theta_{II}(h_J) = \theta_{III}(h_J) & \quad \frac{\partial \theta_{II}}{\partial h}(h_J) = \frac{\partial \theta_{III}}{\partial h}(h_J) \end{aligned} \quad (66)$$

Aplicando-se as igualdades da eq.(66) determina-se os parâmetros:

$$h_I = h_0 \left(\frac{2+\lambda}{2} \right)^{1/\lambda}; \quad h_J = h_D \exp\left(-\frac{1}{\lambda}\right); \quad C = \frac{\left[1 - \left(\frac{h_0}{h_I} \right)^\lambda \right]}{\left(\frac{h_I}{h_0} \right)^2}; \quad \alpha = \lambda \left(\frac{h_0}{h_J} \right)^\lambda \quad (67)$$

A condutividade hidráulica neste modelo pode ser expressa como uma função dos mesmos dois parâmetros h_0 e λ , tal como retenção de água:

$$k = K_s \sqrt{\frac{\theta}{\theta_s} \frac{I^2(\theta)}{I^2(\theta_s)}} \quad (68)$$

onde K_s é a condutividade hidráulica saturada,

$$\begin{aligned} I(\theta) &= I_{III}(\theta) \quad 0 \leq \theta \leq \theta_J \\ I(\theta) &= I_{II}(\theta) \quad \theta_J \leq \theta \leq \theta_I \\ I(\theta) &= I_I(\theta) \quad \theta_I \leq \theta \leq \theta_s \end{aligned} \quad (69)$$

e

$$\begin{aligned} I_{III} &= \frac{\alpha}{h_D} \left[\exp\left(\frac{\theta}{\alpha \theta_s}\right) \right] \\ I_{II} &= I_{III}(\theta_J) + \frac{1}{h_0} \frac{\lambda}{\lambda+1} \left[\left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{\lambda+1} - \left(\frac{\theta_J}{\theta_s} \right)^{\lambda+1} \right] \\ I_I &= I_{II}(\theta_I) + \frac{2\sqrt{C}}{h_0} \left[\left(1 - \frac{\theta_I}{\theta_s} \right)^{1/2} - \left(1 - \frac{\theta}{\theta_s} \right)^{1/2} \right] \\ \theta_I &= \theta(h_I), \quad \theta_J = \theta(h_J) \end{aligned} \quad (70)$$

Devido à condutividade hidráulica de saturação não ser conhecida nos experimentos, ela tem que ser calculada a partir dos dados experimentais com h_0 e λ . Assume-se o valor de umidade de saturação calculando-se o média no topo do perfil.

Para estimar os parâmetros K_s , h_0 e λ , aplica-se uma versão modificada do algoritmo Marquardt publicada por Van Genuchten (1981). O erro médio quadrático RMSE⁷, entre os N parâmetros observados (θ_{obs} e I_{obs}) e estimados (θ_{est} e I_{est}), é minimizado tanto para a umidade como para a infiltração. Para permitir observações da infiltração acumulada, aproximadamente com o mesmo peso das medidas de umidade, os dados de umidade foram multiplicados por $10(N_{\text{Obs}} - N_C)/N_C$, onde N_{Obs} é o número total de observações englobando as medidas de infiltração e umidade, e N_C é o número camadas onde foram medidas as umidades. A umidade média nas camadas é calculada antes de computar o RMSE.

Para executar este modelo, é necessário fornecer estimativas iniciais de h_0 , λ e K_s ; θ_s e h_D .

No item seguinte será descrita a instrumentação desenvolvida e construída para realizar medidas tomográficas em laboratório e em campo.

4.2 Construção do tomógrafo

O TC portátil, com sistema de varredura de 3ª geração, de campo e de laboratório, desenvolvido e construído neste trabalho, tem a configuração apresentada no diagrama da Figura 19. É composto de um computador pessoal (PC) portátil, mecanismo de posicionamento, detector constituído de 2 arranjos de fotodiodos⁸ (PDA *photodiode array*) 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. Uma bateria automotiva de

$${}^7 \text{RMSE: Root Mean Square Error} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\theta_{\text{obs}} - \theta_{\text{est}})^2}{N}}$$

12V, 36A.h, fornece energia para o sistema eletrônico. Optou-se pela utilização do PC/104 além do PC portátil, para além de ampliar a capacidade de interfaceamento com o mecanismo, permitir o processamento paralelo das funções relacionadas à aquisição e à reconstrução de imagem. Desse modo, durante uma aquisição pode-se reconstruir a imagem da aquisição anterior.

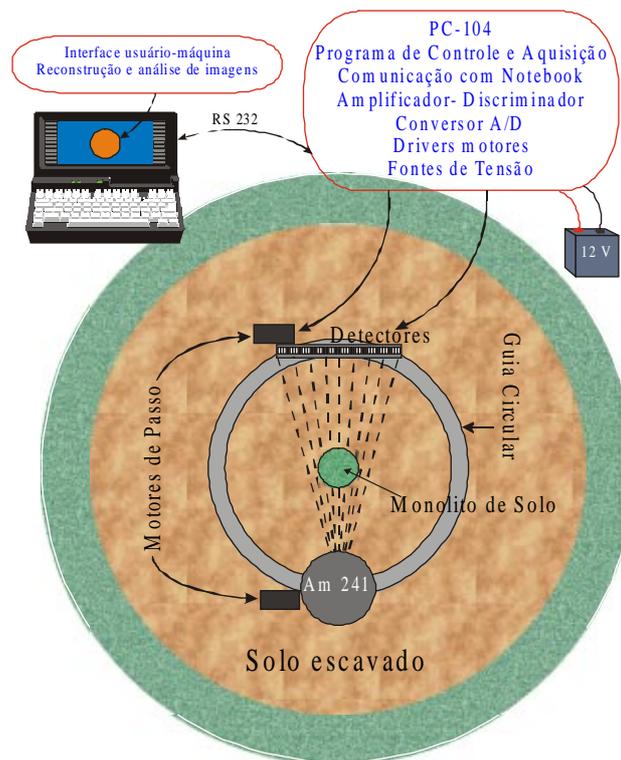


Figura 19 - Esquema do TC portátil, com sistema de varredura de 3ª geração, instalado em torno de um monolito de solo.

Desenvolveram-se 3 programas de computador: (i) programa de controle do mecanismo e aquisição de dados; (ii) programa interface usuário-máquina e (iii) programa de reconstrução da imagem tomográfica, algoritmo de reconstrução de imagem para geometria de feixe em leque, apresentado por Kak & Slaney (1987), para o caso onde os detectores são igualmente espaçados.

A fonte radioativa de Amerício-241 foi blindada em castelo de chumbo com espessura de 5mm. Esta blindagem garante proteção segura o suficiente, segundo normas da CNEN⁹, para o operador trabalhar a pelo menos 10cm da fonte, durante

⁸ Ver anexo D.

⁹ Comissão Nacional de Energia Nuclear estabelece taxa de exposição menor que 25μSv/h.

40 horas semanais. Também se deve acrescentar que a dose típica de radiação a ser absorvida pelo meio material (amostra, coluna, monolito, planta, dentre outros) é extremamente reduzida não causando efeitos nocivos sobre este ou sobre o ambiente vizinho.

4.2.1 Fonte radioativa

Para atender à característica de portabilidade, o ideal é a utilização de um radioisótopo, com meia-vida de dezenas de anos e de energia apropriada para a transmissão da radiação em intensidade significativa através do interior da amostra. A escolha do radioisótopo deve atender ao compromisso entre o tempo de varredura, tamanho e massa específica da amostra, e peso e tamanho da blindagem necessária para proteger o operador.

A experiência obtida com o tomógrafo portátil de 1ª geração (Naime, 1994) mostrou que o Césio-137 é a fonte de raios gama mais adequada para a análise de amostras de solo de até 30cm, devido à sua energia de 662keV e meia-vida de 30 anos. Entretanto, no decorrer do atual projeto houve necessidade de substituir o ^{137}Cs pelo Amerício-241, atividade de $1,11 \cdot 10^{10} \text{Bq}^{10}$, devido às razões que serão apresentadas na seção seguinte.

4.2.2 Detector de radiação

As características do detector são de fundamental importância tanto para a qualidade da imagem como para o tempo de varredura. Nos tomógrafos mais rápidos, o detector permite medir uma projeção completa sem que haja necessidade de movimentar o mecanismo. Isto significa que ele deve ter extensão suficiente para ser atingido por todo o feixe radioativo, em forma de leque, que atravessou a amostra e pelos fótons que passaram livremente em seu entorno. O mecanismo de posicionamento construído tem 51cm de diâmetro. Portanto, para projetar uma amostra de 30cm, considerando as dimensões do mecanismo, calculou-se que o detector deveria ter aproximadamente 75cm de comprimento. A seguir, descrevem-se

¹⁰ Um Bequerel corresponde a uma desintegração por segundo, $1 \text{ Bq} = 2,703 \cdot 10^{-11} \text{ Ci}$

os caminhos percorridos para explicar as alterações realizadas no equipamento para adequá-lo às tecnologias disponíveis e às limitações de custo.

Para o sistema de detecção ser economicamente viável e possibilitar sua utilização em campo, optou-se, inicialmente, por um sistema que utilizaria uma placa transparente com deposição de um pó cintilador tal como o Oxissulfídeo de Gadolínio dopado com Tório ($Gd_2O_2S:Tb$), para a conversão da radiação em luz, acoplado a um circuito CCD (*charge coupled device*). Outra opção, menos viável, seria uma montagem de cristais cintiladores como o NaI acoplado a fotomultiplicadoras, mas o custo é muito alto, é frágil e exige alta tensão de polarização ($\approx 1kV$).

Após várias consultas a fabricantes de detectores e discussões com pesquisadores especialistas sobre a possibilidade de construir os sensores, concluiu-se que tanto a tecnologia de confecção como os sensores comerciais que têm deposição de cintilador não estão disponíveis para energias maiores que $100keV$. O desenvolvimento de um detector com estas características que opera em energias maiores que $100keV$ demanda um longo trabalho de pesquisa, na área de Física, para determinar o cintilador mais apropriado, sua distribuição granulométrica, dimensionar a espessura da deposição com vistas a obter máxima eficiência com mínima difração da luz emitida pelo cintilador. Uma provável solução para atender a este compromisso de projeto seria depositar camadas de pó com granulometrias diferentes. Adicionalmente, seriam necessários equipamentos adequados e muita experiência em tecnologia de deposição, específica para cintiladores em pó, com a finalidade de obter camadas suficientemente uniformes para obter-se um sinal homogêneo dos fotodiodos.

Diante da inexistência de sistemas de detecção que atendam aos requisitos iniciais do projeto, resolveu-se então utilizar aqueles comercialmente disponíveis, ou seja, arranjos de fotodiodos com deposição de cintilador que operam na faixa de energia de 10 a $100keV$, recém lançados no mercado a preços acessíveis. Esta decisão implicou na substituição da fonte de ^{137}Cs ($661,63keV$) por ^{241}Am ($59,54keV$), devido à energia e na redução do tamanho máximo da amostra de solo para 40mm devido à eficiência e ao comprimento do detector utilizado, que é composto de 2 arranjos de fotodiodos (PDA) modelo S6493-128G, com especificações apresentadas na Tabela 2 e na Figura 20.

Tabela 2 - Especificações mecânicas dos PDAs.

Parâmetro	S6493-128G
Número de fotodiodos	128
Passo entre fotodiodos (P)	0,4mm
Largura de difusão do fotodiodos (W)	0,25mm
Altura do fotodiodo (H)	0,4mm
Comprimento da área ativa	51,2mm

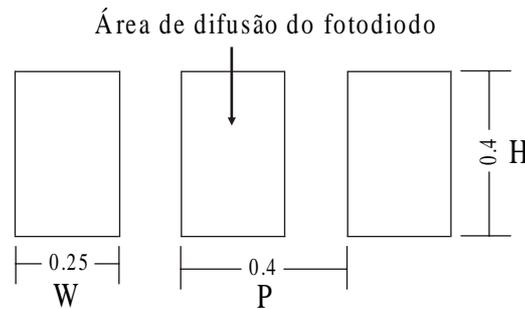


Figura 20 - Detalhe dos fotodiodos apresentados na Tabela 2.

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.

O dispositivo da série S6493 é constituído de fotodiodos de silício combinados com um circuito de processamento de sinal, que é montado em um único circuito integrado de tecnologia CMOS. Inclui um registrador de deslocamento, circuito de amostragem e armazenamento e um arranjo de amplificadores de carga. As correntes de cada fotodiodo, proporcionais à intensidade de luz, fluem para o arranjo de amplificadores de carga, conectados a cada elemento, onde são convertidas em tensões. As tensões são amostradas, armazenadas e finalmente lidas pelo registrador de deslocamento formando um sinal de vídeo composto de amplitudes de tensões dos fotodiodos. A tensão de cada fotodiodo é obtida através do método de armazenamento de carga, portanto o sinal de saída é proporcional ao produto entre o nível de luz incidente e o tempo de integração.

Quando fótons radioativos incidem sobre um cintilador, ocorrem choques de partículas. Uma pequena parte da energia cinética dissipada pela partícula carregada em um cintilador é convertida em energia fluorescente. O restante da energia é dissipada em forma de calor gerado pelas vibrações da rede cristalina. A energia fluorescente emitida pelo cintilador é luz visível (400 a 700nm), enquanto que o espectro das ondas eletromagnéticas da radiação gama está entre 10^{-4} e 10^{-2} nm. A

resposta espectral dos fotodiodos situa-se na faixa de 200 a 1100nm com o pico em 720nm.

Os circuitos de interface (C6785) de cada PDA operam com 5V de tensão e têm os seguintes sinais de entrada (e) e saída (s) para controle e leitura:

- *Clock* (e) - base de tempo para o sincronismo dos sinais do PDA.
- *Start* (e) - primeiramente envia as tensões dos fotodiodos para o sinal de vídeo e em seguida, anula estas tensões e inicia uma nova integração. O intervalo de tempo entre dois Start determina o tempo de integração dos fotodiodos.
- *Trigger* (s) – sinal para disparar o processo de leitura da tensão de cada fotodiodo através do conversor A/D.
- *EOS* (s) - indica fim do sinal de vídeo.
- *Video* (s) - sinal serial analógico com as tensões de cada fotodiodo dispostas em seqüência, em intervalos de dois períodos do Clock.

Devido à influência do ruído térmico sobre o sinal dos fotodiodos, os PDAs são refrigerados por um sistema TEC (refrigerador termoeletrônico), construído neste projeto. É constituído de uma placa de efeito Peltier, dissipador de calor com ventilação forçada e circuito eletrônico de controle de temperatura que mede a temperatura sobre os PDAs e monitora a corrente do TEC.

4.2.3 Sistema eletrônico

O sistema eletrônico constitui-se de uma unidade de processamento central padrão PC/104 (Figura 21), de uma fonte de alimentação padrão PC/104 (Figura 22) e de um circuito eletrônico (Figura 22) desenvolvido para comandar as interfaces dos detectores, o conversor analógico/digital e o sistema de mecânico de posicionamento através dos 2 motores de passo e sensores ópticos de posição. Produzido por mais de trezentos fabricantes, o padrão PC/104 é a versão miniaturizada do computador pessoal (IBM-PC). Basicamente, o PC/104 somente tem as dimensões alteradas; todas as outras características e funções do PC são mantidas, com a vantagem de ser compacto, robusto e modular. Os componentes eletrônicos empregados em sua

construção permitem utilização na faixa de temperaturas de -40°C a 80°C , sendo assim adequado para instrumentos embarcados e em ambientes industriais.



Figura 21 - Placa CPU do PC/104.

As placas padrão PC/104 medem 91cm x 96cm e têm um conector de 104 pinos que permite acesso aos dutos de dados e endereço como também o empilhamento de tantas placas quantas forem necessárias para atender às necessidades de projeto. Diversas unidades de processamento e uma grande variedade de interfaces são produzidas neste padrão, como por exemplo: CPU (386, 486, Pentium), conversor DC/DC, interfaces analógicas e digitais, modem, sistema de posicionamento global via satélite (GPS), placas de vídeo e etc.

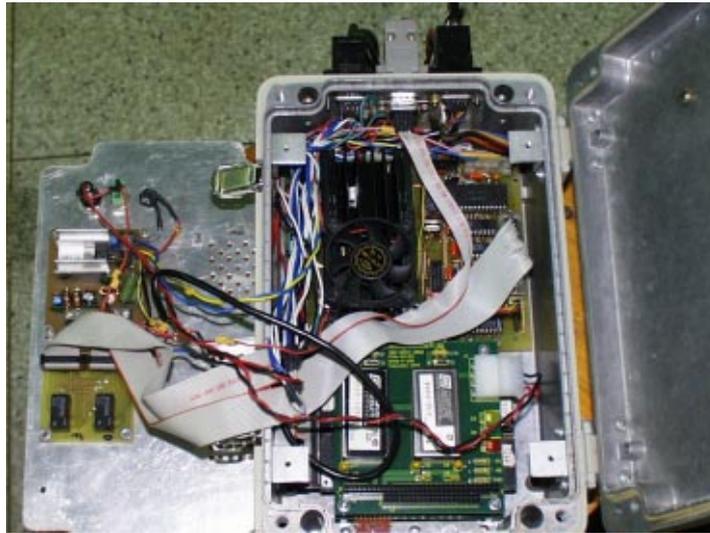


Figura 22 - Foto da montagem do sistema eletrônico do tomógrafo. Acima, à direita, está a placa de comando dos motores e do detector; abaixo à direita está a montagem do PC/104 com a placa de alimentação conectada sobre a CPU. À esquerda, na tampa, vêm-se as fontes reguladas.

O PC/104 utilizado neste projeto é constituído de dois módulos:

- CPU 386SX 33MHz, 8Mbytes de RAM, disco rígido de estado sólido (SSD “Solid State Disk”) de 2Mbytes, 2 interfaces seriais RS-232, uma interface paralela, controlador de disco rígido, controlador de disco flexível 3,5” e interface para teclado.
- PCM-DC/DC-12-512, conversor DC/DC com entrada entre 12V e 48V e saídas reguladas em 5V e $\pm 12V$.

Na fase de desenvolvimento do programa do PC/104, utilizou-se um módulo com disco rígido e uma unidade de disco flexível, uma placa de vídeo modelo PCM-FPVGA e um teclado.

O computador portátil comanda o PC/104 através da interface serial. Os comandos são relativos aos movimentos circular e vertical do mecanismo de varredura ou ao controle e à leitura dos 2 PDAs. Através de sua interface paralela, o PC/104 comanda os motores de passo, lê os sensores ópticos de indexação, seleciona, controla e lê os PDAs.

4.2.4 Sistema mecânico de posicionamento

Foi desenvolvido e construído um mecanismo de posicionamento circular, e bipartido (Figura 23). Além do movimento circular em torno da amostra, o mecanismo permite o deslocamento vertical da fonte radioativa e do detector em até 270mm. A construção do sistema foi baseada em uma guia circular e dois carros deslizantes produzidos pela HEPCO. A guia circular é constituída de 2 setores de 180°, sendo dentada na face externa e seu diâmetro mede 510mm. O carro desliza sobre o trilho retificado da guia circular, acionado por um motor de passo acoplado a uma engrenagem que está em contato com os dentes da guia. Sobre o carro da guia circular está apoiado o sistema de elevação do conjunto fonte e detector. O sistema de elevação é constituído de um motor de passo, um fuso, uma porca de rolamento de esferas e uma guia linear com um carro. O motor de passo gira o fuso que movimenta a porca acoplada ao carro da guia linear. A porca e o carro sustentam um arco de 180° onde estão apoiados a fonte e o detector.



Figura 23 - Sistema mecânico de varredura do tomógrafo.

4.2.5 Programas de computador desenvolvidos para o tomógrafo

O PC/104 executa um programa desenvolvido em Assembler e C para o sistema operacional DOS. Sua finalidade é realizar tarefas básicas demandadas pelo PC através da interface serial RS-232. Estas tarefas são:

- Selecionar, acionar e temporizar os PDAs;
- Ler o conversor A/D sincronizado com o sinal de vídeo dos PDAs;
- Transferir ao PC os valores das 256 tensões integradas nos detectores e
- Controlar os movimentos de rotação e elevação.

O programa de varredura tomográfica do PC foi desenvolvido em Visual Basic 4.0, roda em ambiente Windows 32 bits e atua como interface homem-máquina para ajustar os parâmetros de varredura, comandar toda a seqüência de tomografias desejadas e gravar em arquivos os dados obtidos nas varreduras programadas.

Os 2 PDAs juntos apresentam 28 fotodiodos com baixa eficiência de conversão em relação aos demais, isto é, quando o ruído de fundo do detector é subtraído, a tensão lida é praticamente nula quando ocorre atenuação da radiação. O gráfico da Figura 24 mostra as tensões, integradas durante 1 segundo, do ruído de fundo (sem radiação), do feixe livre e a diferença entre as duas situações. As tensões dos fotodiodos defeituosos são substituídas pelas média das tensões dos vizinhos. Após as substituições, o ruído de fundo é subtraído. Para eliminar possíveis variações do ruído de fundo devido à temperatura e ao ruído eletrônico, a cada leitura ele é estimado tomando como referência o fotodiodo número 1, que está bloqueado para a radiação. Em seguida o programa normaliza as tensões para que a resposta seja homogênea quando os PDAs estão expostos ao feixe livre.

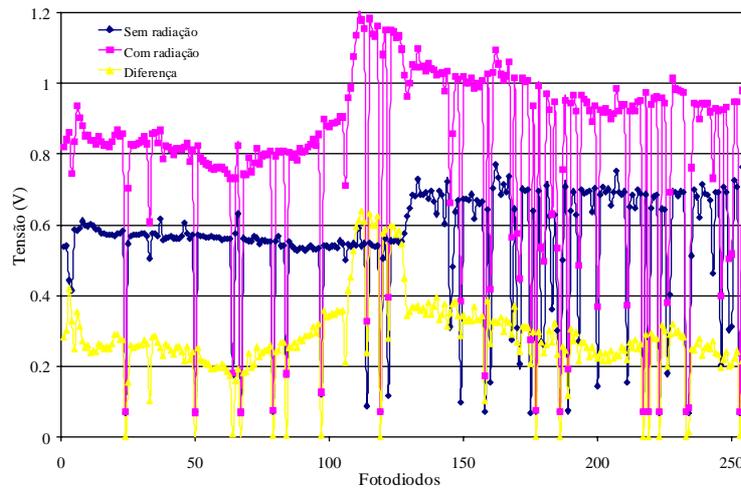


Figura 24 - Ruído de fundo dos fotodiodos (sem radiação), sinal obtido com o detector exposto ao feixe livre e a diferença entre a duas situações. O tempo de integração é de 1s.

Devido à facilidade de programação, a parte gráfica do programa de reconstrução de imagem foi desenvolvida em Visual Basic 4.0. O algoritmo de reconstrução e as operações com os arquivos de dados e imagens foram implementados em um arquivo de funções executáveis tipo “dll” (biblioteca de ligação dinâmica), escrito em C++Builder 4.0 porque a velocidade de execução é 16 vezes maior que em Visual Basic.

Alterações foram introduzidas no algoritmo de reconstrução de imagem, apresentado no capítulo 3, a fim de corrigir distorções geométricas causadas pelo fato da fonte radioativa utilizada neste projeto ter dimensão de 15mm e o desenvolvimento do algoritmo apresentado na literatura é baseado em fonte radioativa puntual. Para tanto, na reconstrução, utiliza-se um misto de geometria de feixes paralelos e feixe em forma de leque. A tela principal do programa de reconstrução pode ser vista na Figura 25.

O programa de reconstrução desenvolvido tem as seguintes características:

- Gravação de imagens tipo “bitmap” com 256 tons de cinza ou 512 tons de cores;
- Reconstrução de imagens em seqüência para um conjunto de arquivos selecionados;

- Subtração de imagens;
- Padronização de escala para um conjunto de imagens selecionadas;
- Segmentação de imagens com tons de marrom para o solo seco e tons de azul para região úmida do solo;
- Exibição do valor do μ correspondente à célula apontada pelo cursor e também das duas células vizinhas em todas as direções;
- Calibração para a apresentação de valores de massa específica;
- Cálculos estatísticos como média, desvio padrão e coeficiente de variação sobre uma região de interesse, circular ou retangular, selecionada sobre a imagem;
- Medição de distância sobre a imagem;
- Ampliação da imagem em até 4 vezes e
- Geração de arquivos no padrão VTK¹¹ para reconstrução 3-D no programa PowerVis¹².

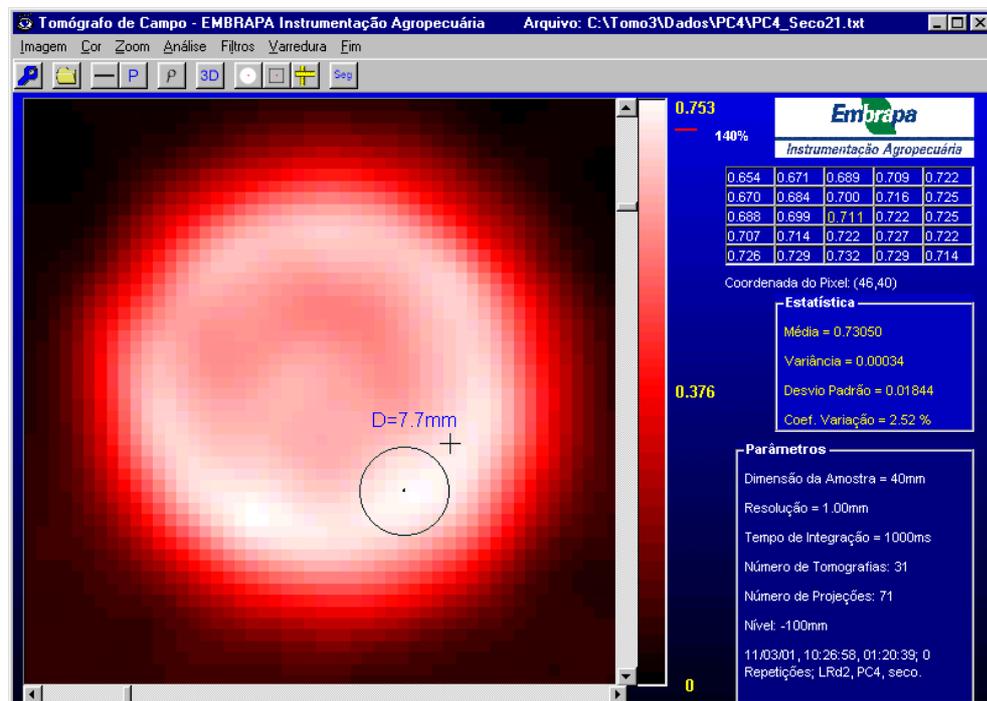


Figura 25 - Tela principal do programa de reconstrução e visualização de imagem.

¹¹ VTK – Visualization ToolKit: é um programa gratuito de código aberto para computação gráfica 3-D, processamento e visualização de imagens.

4.3 Materiais e métodos referentes à validação do tomógrafo e aos experimentos de infiltração em amostras de solos desestruturados

Todas as tomografias apresentadas nesta tese foram feitas com 71 projeções espaçadas em ângulos de $5,07^\circ$. Cada projeção é dividida em 71 partes iguais na linha de detectores e o tempo de integração das projeções é 1s. A duração de cada varredura é de 4 minutos e estas são feitas nos dois sentidos de rotação do mecanismo para evitar que os cabos elétricos se enrolem em torno do mecanismo e para evitar perda do tempo de retorno. Ao final de cada varredura, o sistema eletrônico verifica, através de sensor óptico, se não houve falha de posicionamento ao completar 360° .

Os cálculos do algoritmo de reconstrução atribuem, a cada célula da imagem, um valor proporcional à atenuação de cada ponto da seção transversal da amostra. Estes valores ainda não são os coeficientes de atenuação linear. É necessário calibrar a medida. A reta de calibração do tomógrafo relaciona o coeficiente de atenuação linear $\mu(\text{cm}^{-1})$ com as unidades tomográficas (UT) calculadas pelo programa de reconstrução de imagem. Foram realizadas tomografias com amostras homogêneas de água, solo, teflon, PVC e alumínio. As unidades tomográficas foram obtidas calculando-se a média dos valores de cada célula que compõe a área da imagem da amostra. Os valores dos μ 's da água, PVC e teflon foram obtidos de tabelas (Hubbel, 1969), enquanto que para o solo e o alumínio, os μ s foram medidos por transmissão direta no analisador granulométrico de solos (Vaz et al., 1999 e Naime et al., 2001). Este equipamento opera com fonte ^{241}Am e detector cristal de NaI(Tl) .

Para verificar a repetibilidade das medidas, 30 tomografias foram feitas em uma única seção transversal (corte tomográfico) de uma amostra de latossolo vermelho-amarelo álico (LVa), textura média, constituído por 68,9% de areia, 3,2% de silte e 27,9% de argila, da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos-SP. Calderano Filho et al. (1998) fizeram um levantamento semidetalhado das propriedades dos solos desta fazenda. A amostra foi retirada da região identificada como LVa2 (Anexo E). Este solo, seco e peneirado em malha de 1mm, foi colocado em um recipiente de

¹² PowerVis: Programa de reconstrução de imagens 3-D desenvolvido pelo grupo de Computação Gráfica e Processamento de Imagens do ICMC-USP (www.lcad.icmc.sc.usp.br/~powervis/).

PVC com 40mm de diâmetro e 45mm de altura. A massa específica da amostra é $1,337\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Trinta tomografias foram feitas em uma única seção

Para a verificação da resposta do tomógrafo em função da variação da umidade do solo, foram preparadas 21 amostras do LVa2. Após secagem em estufa a 105°C , durante 24 horas, o solo foi peneirado em malha de 2mm e distribuído em porções de 65,5g em cada um dos 21 recipientes de 49cm^3 , feitos com tubo de PVC 40mm e fundo de acrílico. Desta forma, garantiu-se que todas as amostras tivessem massa específica igual a $1,337\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Em diferentes teores de umidade, desde seco até a saturação, as amostras foram umedecidas através de gotejamento com pipeta, distribuindo-se a água uniformemente sobre a superfície da amostra. Aguardaram-se 10 dias para que as amostras atingissem o equilíbrio hídrico. Em todas as amostras, foram feitas 6 tomografias em seções transversais espaçadas de 6mm. A umidade volumétrica foi determinada através do método gravimétrico antes de cada varredura.

Nos experimentos de estudo da infiltração, as amostras de solo foram preparadas com latossolo roxo distrófico, extraído do horizonte A de um campo cultivado com aveia, da Embrapa Pecuária Sudeste, São Carlos-SP. A área de coleta é denominada de LRd2 por Calderano Filho et al. (1998). A descrição sumária deste solo é apresentada no Anexo F. A textura do solo é 45% de argila, 15% de silte e 42% de areia. Cabe destacar que a argila deste solo é constituída de caulinita, mineral 1:1 (Anexo F), portanto tem péssimas propriedades de retenção de água (Reichardt, 1996).

Após o destorroamento, o solo foi seco em estufa a 105°C durante 24 horas, peneirado em malha de 1mm e posteriormente acondicionado em recipientes feitos com tubo de PVC branco, 40mm de diâmetro e 150mm de altura. No fundo do recipiente foi colado um tecido de nylon com 18 fios por milímetro com a finalidade de permitir a continuidade do fluxo de água e ar.

Inicialmente, as tomografias foram feitas com a amostra seca em diversas seções transversais para obterem-se referências para subtração de imagens, determinar o perfil de massa específica e calcular a massa específica global média. Durante a infiltração, as varreduras eram realizadas numa única seção transversal ou em diversas seções, observando-se a repetição dos planos das tomografias feitas com

a amostra seca. O fluxo de água foi introduzido na forma de carga hidráulica, onde uma lâmina d'água de 5mm era mantida constante sobre a superfície do solo.

O coeficiente de atenuação em massa (μ^*) do solo foi determinado utilizando o μ médio de 21 tomografias espaçadas de 5,5mm ao longo dos 120mm da coluna de solo e dividindo-o pela massa específica global, calculada através do método gravimétrico. O μ^* obtido foi comparado com a medição feita no analisador granulométrico com fonte de ^{241}Am . Os valores obtidos para μ^* foram de $0,404\text{cm}^2.\text{g}^{-1}$ e $0,406\text{cm}^2.\text{g}^{-1}$ no tomógrafo e no analisador granulométrico, respectivamente, o que representa um desvio de 0,5% entre os dois resultados.

A análise textural dos solos utilizados foram feitas através do método da atenuação de raios-gama no analisador granulométrico de solos.

4.4 Experimentos em laboratório com amostras de solo estruturado

Na Embrapa Pecuária Sudeste foram retiradas amostras de latossolo roxo distrófico, descrito na seção anterior, submetido a duas diferentes condições de manejo - plantio convencional e plantio direto - e de uma área de mata ciliar. Em cada área foram colhidos 5 blocos de solo com seção quadrada de 30cm e 20cm de altura, a partir da superfície (Figura 26).



Figura 26 - Escavação para retirada de bloco de solo.

Os blocos foram retirados de modo a evitar perturbações em sua estrutura original. Transportados para o laboratório, os 15 blocos de solo foram cortados e deles retiradas amostras cilíndricas medindo 4cm de diâmetro e 18cm de altura (Figura 27).



Figura 27 - Corte e raspagem do bloco de solo para retirada de amostra cilíndrica.

As 15 amostras cilíndricas foram secas em estufa a 105°C durante 24 horas, cobertas com parafina e introduzidas em tubos de PVC, 4cm de diâmetro e 20cm de altura, para evitar rachaduras na parafina durante a infiltração de água. O espaço entre a amostra protegida com parafina e o tubo de PVC foi preenchido com parafina. A diferença de 2cm de altura entre o tubo de PVC e a amostra determina o volume a ser preenchido pela coluna d'água durante a infiltração. As coberturas de parafina do topo e da base da coluna de solo foram retiradas. A amostra foi colocada sobre outro tubo de PVC de 40mm de altura com fundo e sem tampa com a finalidade de coletar a água que percorreu toda a coluna de solo. Na Figura 28, pode-se ver a amostra posicionada no centro de varredura do tomógrafo.

Inicialmente, uma seqüência de varreduras tomográficas foram feitas com o solo seco e em seguida, durante a infiltração de água, foram feitas 4 seqüências de varreduras. Cada seqüência compreende 31 varreduras espaçadas de 5mm em um perfil total de 150mm. A duração de uma seqüência é de 124 minutos.



Figura 28 - Amostra de solo estruturado parafinada dentro de tubo de PVC, vista durante a varredura tomográfica.

4.5 Experimento em campo

Na mesma área de plantio convencional onde foram coletadas as amostras para a análise em laboratório, foi realizado um experimento de campo com o tomógrafo portátil. Escavou-se uma trincheira em forma de anel com 2,5m de diâmetro externo, 30cm de diâmetro interno e 0,80m de altura (Figura 29). A escavação permaneceu deste modo durante 24 horas sob temperatura média de 25°C e sem ocorrência de chuva. Após este período, o monolito foi desbastado conforme o desenho da Figura 30, para possibilitar a instalação do equipamento e observar as limitações do sistema de detecção. Do volume de solo desbastado, foram retiradas 4 amostras de 250cm³, espaçadas de 10cm no perfil, para medida de umidade pelo método gravimétrico. Obteve-se umidade média de 12,2% e C.V. igual a 3,4%. Nas medidas de infiltração, considerou-se a umidade inicial da coluna de solo.

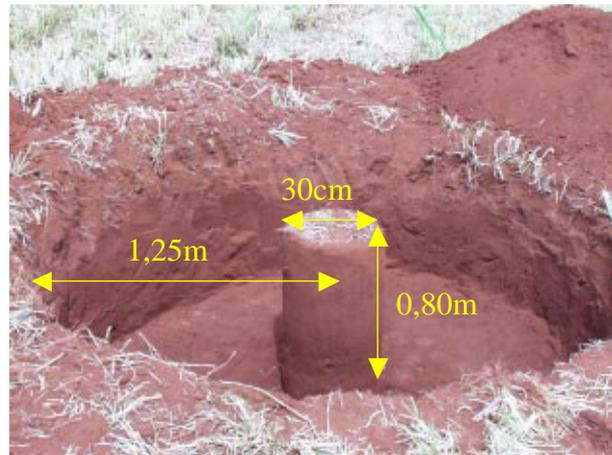


Figura 29 - Trincheira escavada no solo e monólito antes de ser desbastado.

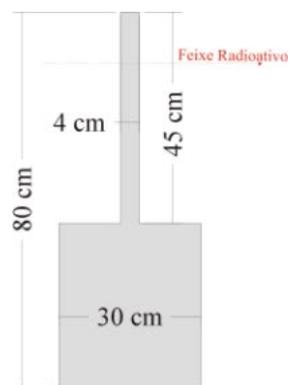


Figura 30 - Dimensões do monólito de solo desbastado.

Após o desbaste, a parte superior (45cm) foi parafinada, conservando a umidade global inicial do solo de 12,2% ao longo do perfil. No topo do monólito, foi moldado, com parafina, um recipiente de 2cm de altura para conter o volume de água aplicado sobre a superfície do solo. Uma camada de água com 1cm de altura foi mantida durante o processo de infiltração.

Com o tomógrafo portátil instalado, conforme mostra a Figura 31, foram feitas 3 seqüências de varreduras tomográficas, da mesma forma como descrita no item anterior. O início das tomografias e da infiltração são simultâneos.

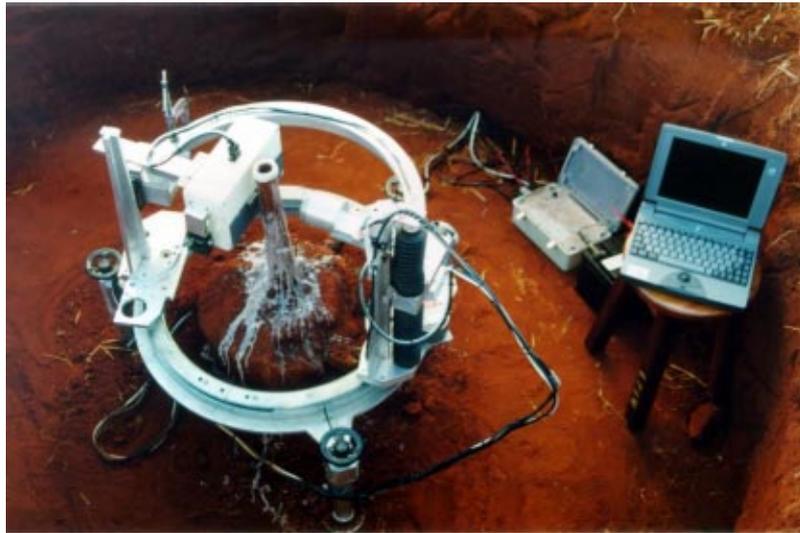


Figura 31 - Tomógrafo portátil realizando varredura tomográfica durante o processo de infiltração de água.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados de avaliação e validação do tomógrafo desenvolvido e os resultados dos experimentos de infiltração de água no solo. Em seguida, os resultados apresentados são discutidos.

5.1 Validação do tomógrafo

5.1.1 Calibração

A Tabela 3 mostra os dados da reta de calibração da Figura 32. As imagens das amostras utilizadas na calibração são apresentadas na Figura 33.

Tabela 3 - Dados da reta de calibração do tomógrafo e o coeficiente de variação em torno do valor médio de UT.

Amostra	$\mu(\text{cm}^{-1})$ 60keV	UT	C.V. %
Água	0,205	4,870	1,61
Alumínio	0,755	19,558	3,09
PVC	0,465	12,468	0,76
Teflon	0,406	9,981	3,25
Solo	0,380	9,151	1,80

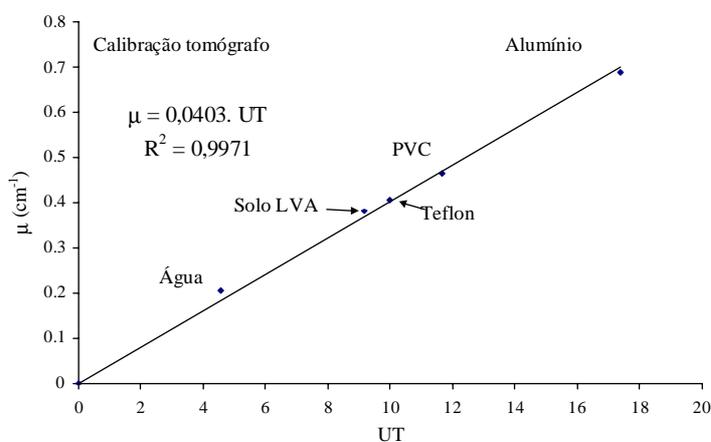


Figura 32 - Reta de calibração do tomógrafo, equação da reta e coeficiente de correlação (R^2).

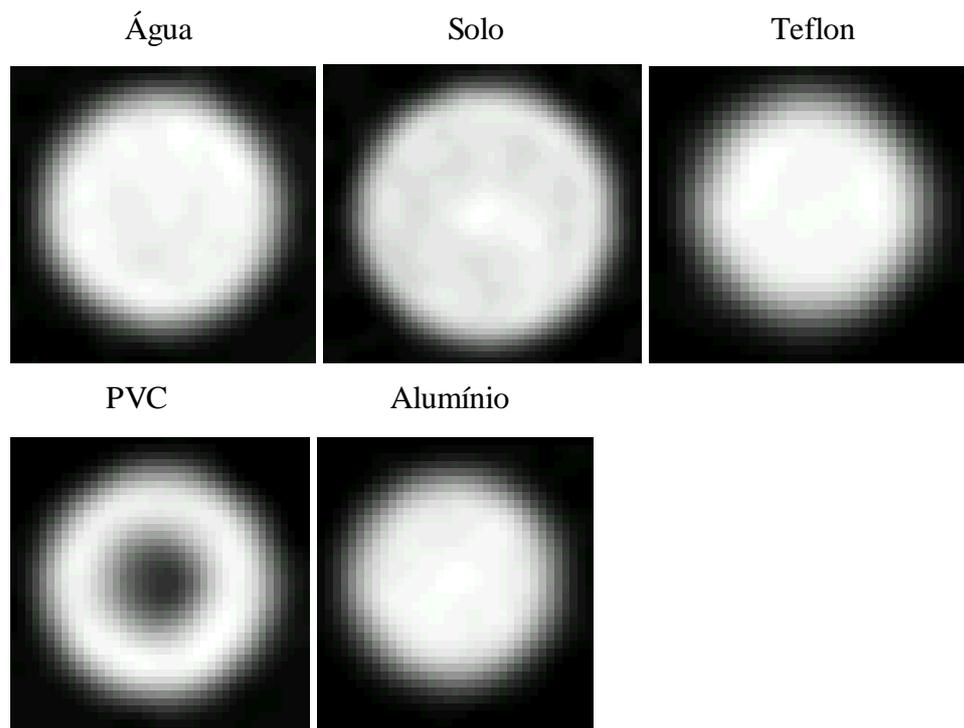


Figura 33 - Imagens tomográficas de amostras homogêneas de água, solo, teflon, tubo de PVC e alumínio, utilizadas para calibração do tomógrafo.

5.1.2 Repetibilidade das medidas

A Tabela 4 apresenta os valores médios dos μ 's, calculados em uma área circular de 3,5cm de diâmetro, e o coeficiente de variação dos valores contidos nesta área. O coeficiente de variação dos valores médios das 30 varreduras é de 0,86%, o que mostra uma boa repetibilidade dos valores de μ nas tomografias.

Tabela 4 - μ médio de 30 tomografias repetidas em uma única seção transversal de um solo LVA.

Tomografia	$\mu(\text{cm}^{-1})$	C.V.(%)	Tomografia	$\mu(\text{cm}^{-1})$	C.V.(%)
1	0,3663	3,14	16	0,3710	2,23
2	0,3653	2,97	17	0,3717	2,41
3	0,3624	2,86	18	0,3709	2,13
4	0,3612	2,95	19	0,3694	2,24
5	0,3626	2,92	20	0,3669	2,81
6	0,3615	3,25	21	0,3623	2,17
7	0,3628	2,92	22	0,3648	2,72
8	0,3649	3,15	23	0,3621	2,80
9	0,3648	2,73	24	0,3653	2,79
10	0,3669	3,43	25	0,3667	2,40
11	0,3703	3,19	26	0,3663	2,39
12	0,3629	2,75	27	0,3633	2,51
13	0,3693	3,06	28	0,3692	3,05
14	0,3687	3,21	29	0,3694	2,70
15	0,3671	2,45	30	0,3680	2,60

5.1.3 Verificação da resposta do tomógrafo em função da variação da umidade do solo

A Tabela 5 apresenta a variação de μ em função da umidade para 21 amostras com teores de umidade diferentes, determinados pelo método gravimétrico.

Tabela 5 - Umidade das amostras, μ médio de 6 tomografias em cada amostra, em posições diferentes, e coeficiente de variação das 6 medidas.

θ (%)	$\mu(\text{cm}^{-1})$	C.V. (%)	θ (%)	$\mu(\text{cm}^{-1})$	C.V. (%)
0,0	0,3628	0,57	21,2	0,4069	1,90
3,3	0,3669	1,21	23,9	0,4131	1,67
5,5	0,3793	2,01	25,9	0,4135	0,92
7,2	0,3755	1,41	27,0	0,4166	1,12
8,4	0,3800	2,51	29,5	0,4221	1,18
9,9	0,3857	2,14	31,3	0,4237	1,42
10,4	0,3894	2,78	32,6	0,4252	0,99
12,9	0,3996	1,08	34,2	0,4325	0,72
14,1	0,3972	2,57	35,7	0,4371	1,18
15,6	0,4058	1,80	38,4	0,4429	2,07
17,8	0,4044	1,23			

Estes dados são apresentados no gráfico da Figura 33, do qual obtém-se a curva de calibração, dada por:

$$\mu = 0,1941.\theta + 0,3661. \quad (71)$$

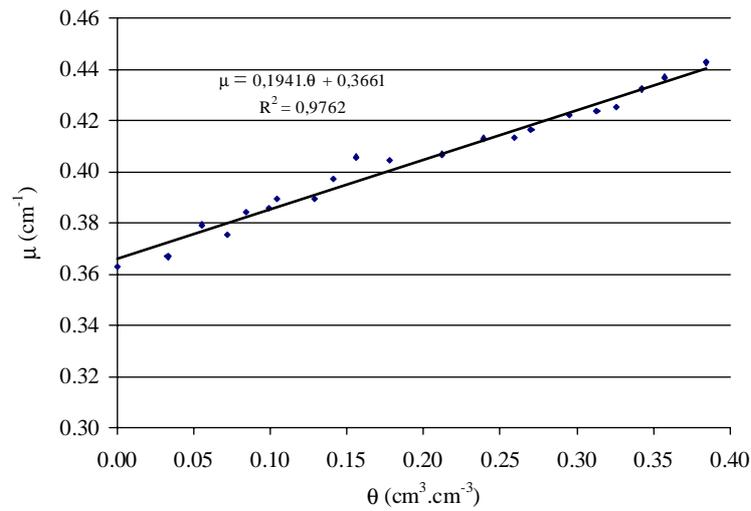


Figura 34 - Gráfico da variação do μ em função da umidade para um solo LVA.

A equação esperada para μ em função de θ é:

$$\mu = \mu_{H_2O} \cdot \theta + \mu_{solo_seco} = 0,205 \cdot \theta + 0,3628 \quad (72)$$

onde 0,205 e 0,3628 são, respectivamente, os μ 's da água e do solo seco para a energia de 60keV.

Comparando a eq.(71) com a eq.(72), o erro na determinação do valor de μ em função da umidade do solo é apresentado no gráfico da Figura 35.

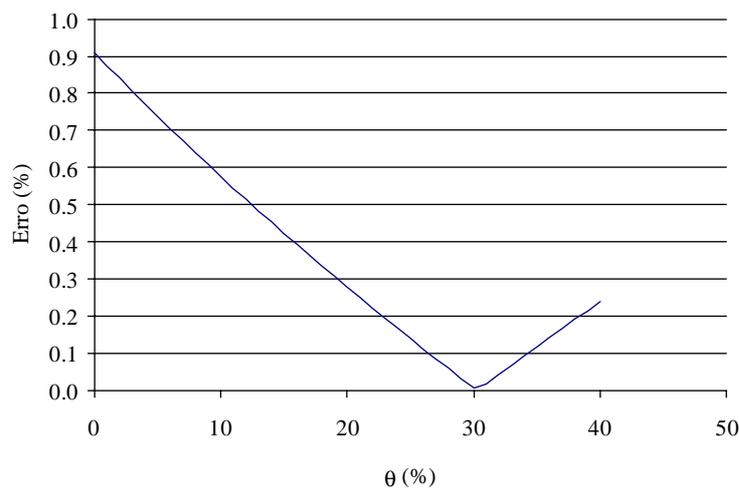


Figura 35 - Erro percentual na determinação de μ em função da umidade.

A boa correlação ($R^2=0,9762$) da curva de calibração e o erro RMS igual a $0,019\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ demonstram que o método é plenamente viável para medidas de

umidade. A Tabela 6 apresenta uma comparação da técnica tomográfica com outras modernas técnicas, como TDR e GPR (*ground-penetrating radar*), com dados obtidos por outros autores na calibração destes instrumentos, quando empregados para a medida de umidade.

Técnica de medida	RMSE (m³.m⁻³)	R²
Tomografia	0,019	0,9762
GPR (Huisman et al., 2001)	0,024	-
TDR (Huisman et al., 2001)	0,024	-
TDR (Starr et al., 2000)	0,039	0,9000

Tabela 6 - Comparação da tomografia com TDR e GPR aplicados à medida de umidade.

Para demonstrar a capacidade de análise qualitativa, mostra-se a seguir o contraste provocado pelo umedecimento do solo. Uma amostra de solo foi acondicionada em um recipiente de acrílico com seção transversal quadrada, sendo que, no sentido da diagonal, uma placa com a mesma altura do recipiente o divide em duas partes. Um lado foi umedecido e outro foi mantido seco. A tomografia desta amostra é mostrada na Figura 36.

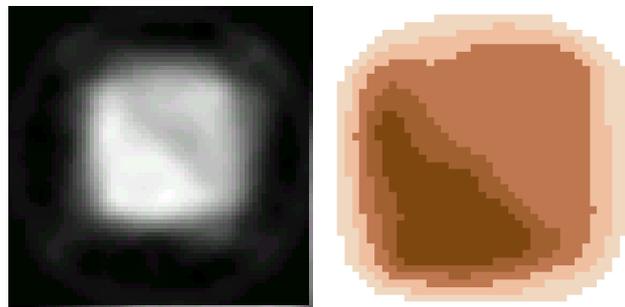


Figura 36 - Tomografia de uma coluna de solo de seção quadrada com uma placa de separação na direção diagonal. A região superior à diagonal está seca e a inferior úmida. No lado direito é apresentada a imagem segmentada.

A umidade do solo da Figura 36, calculada com a eq.(71), resultou em 36,9% enquanto através do método gravimétrico foi obtido 36,6%, o que representa um erro de 0,82%.

Os resultados dos testes realizados em 5.1.1, 5.1.2 e 5.1.3 assim como a Figura 36 demonstram que o tomógrafo desenvolvido permite medir a massa específica global, o conteúdo da água no solo e visualizar a região umedecida das

seções transversais por meio da subtração das imagens do solo seco das imagens do solo úmido.

5.1.4 Infiltração: tomografias em posição fixa

A Figura 37 apresenta os perfis de massa específica, obtidos com o tomógrafo e com o analisador granulométrico, da amostra utilizada no experimento de infiltração. No analisador, as medidas de atenuação foram feitas em passos de 1mm e as tomografias foram feitas em passos de 5,5mm.

Com o tomógrafo posicionado a 93,5mm abaixo da superfície do solo, as 21 tomografias iniciaram-se juntamente com a infiltração. A Figura 38 mostra a variação da umidade ao longo do tempo. A Figura 39, ilustra com algumas imagens diferença, o processo de umedecimento da área da seção escolhida.

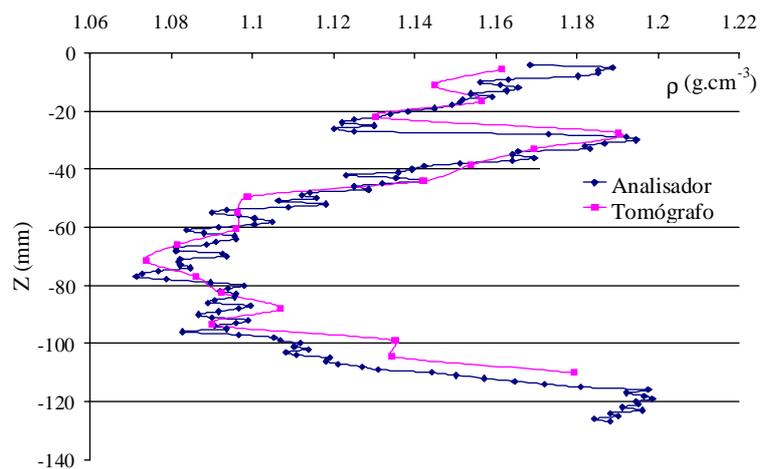


Figura 37 - Perfis de densidades da amostra obtidos com o tomógrafo e com o analisador granulométrico.

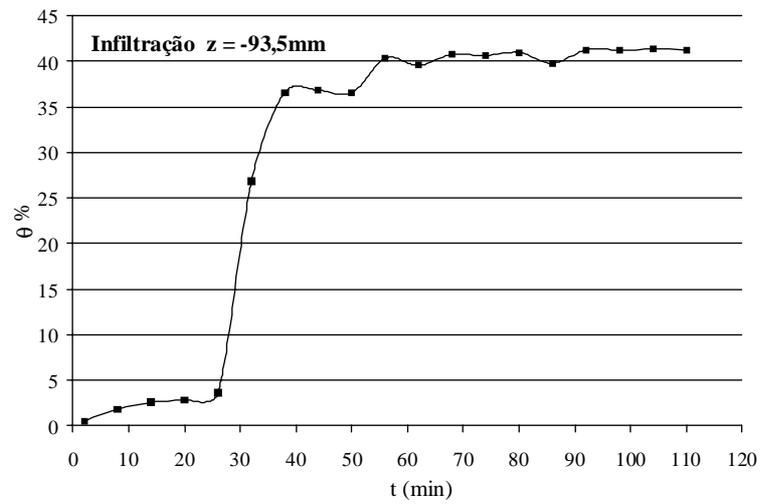


Figura 38 - Variação da umidade a 93,5mm abaixo da superfície durante a infiltração da água.

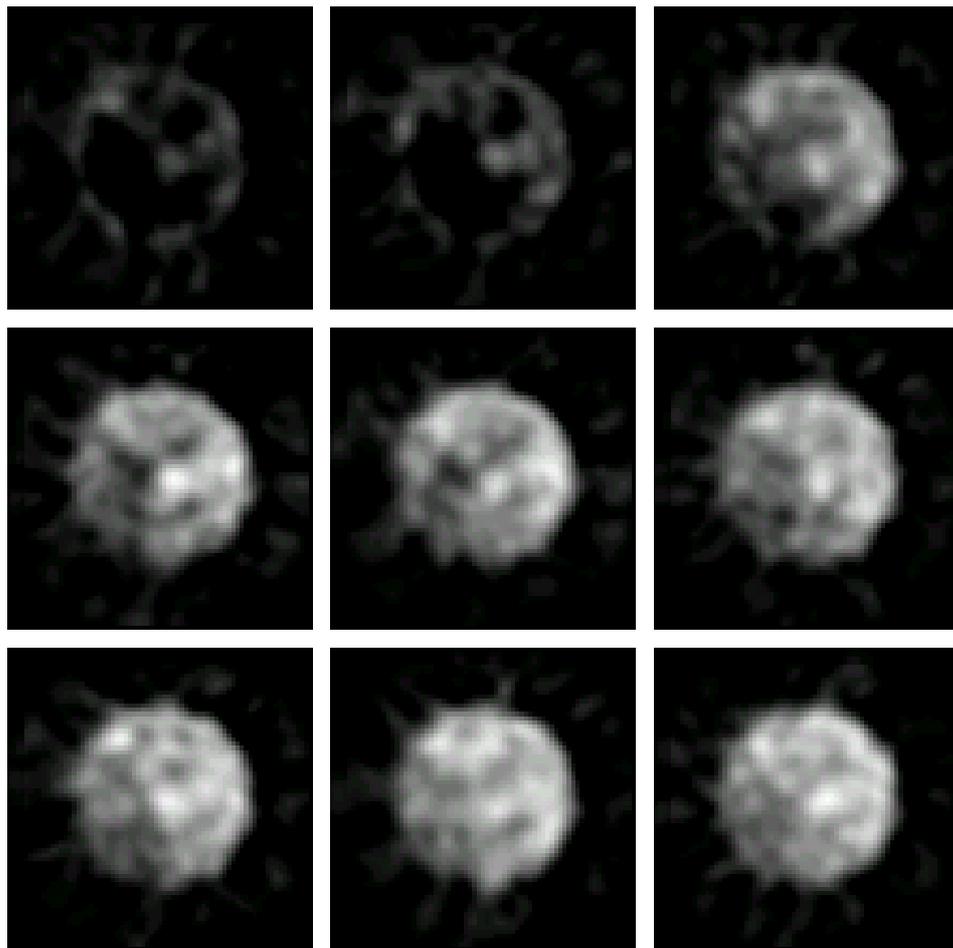


Figura 39 - Evolução do umedecimento da seção do solo situada a 93,5mm abaixo da superfície.

Os resultados apresentados na Figura 38 e na Figura 39 demonstram a viabilidade do tomógrafo desenvolvido para acompanhar a infiltração da água no solo de forma quantitativa e qualitativa. As imagens permitem distinguir diferentes níveis de umidades, as regiões mais claras representam teores de umidade mais elevados.

5.1.5 Infiltração: tomografias em diversas posições de uma amostra desestruturada

Durante a infiltração na amostra deformada de latossolo roxo, foram feitas 21 tomografias espaçadas em 6mm. Esta seqüência de tomografias foi efetuada três vezes.

A Figura 40 mostra o perfil de densidades (a) medido com a amostra seca e perfil de umidades (b) medido em intervalos de tempos espaçados em 4 minutos.

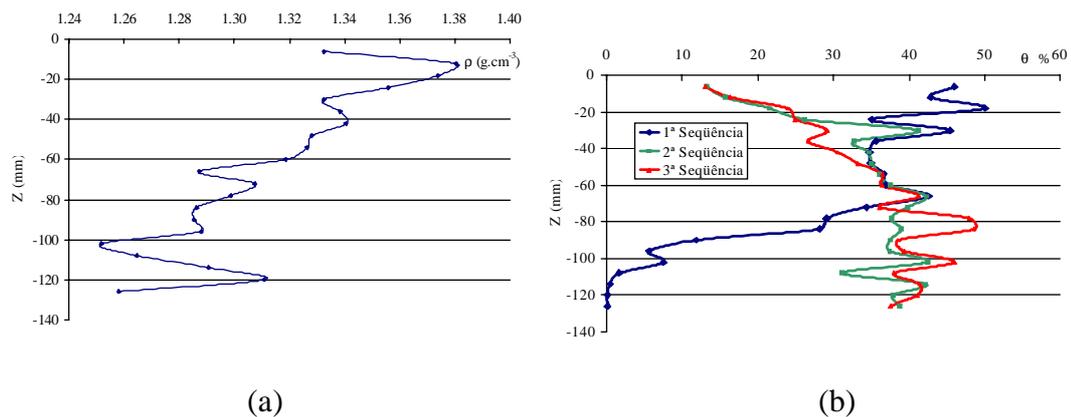


Figura 40 - (a) perfil de densidades e (b) perfil de umidades nas seqüências de medidas durante infiltração.

De posse dos valores médios de umidade de cada tomografia e dos valores de infiltração, foi executado o programa de ajuste dos parâmetros h_0 , λ e K_s através do algoritmo Marquardt. A Tabela 7 mostra os valores de entrada e saída do programa. Na tabela, vêm-se também os parâmetros do modelo Rossi & Nimmo (1994), calculados a partir dos resultados do programa. Os parâmetros de Rossi & Nimmo são utilizados para determinar a curva de retenção da água no solo, $k(\theta)$ e $D(\theta)$.

Tabela 7 - Parâmetros de entrada e saída do programa (algoritmo Marquardt) e parâmetros do modelo Rossi & Nimmo (1994). Amostra deformada.

Entrada		Saída – Marquardt			Rossi & Nimmo					
θ_s	h_D	h_0	λ	K_s	h_I	h_J	C	α	$\theta(h_I)$	$\theta(h_J)$
0,45	$5 \cdot 10^7$	51,47	0,1129	0,3633	83,71	7.116,26	0,0202	0,0647	0,4260	0,2579

Os valores de infiltração estimados pelo modelo e os valores medidos são mostrados na Figura 41. A Tabela 8 mostra a correlação entre estes valores, as equações de ajuste da infiltração e densidade de fluxo, e o R^2 e RMSE da curva de infiltração.

Tabela 8 - Correlação da curva de infiltração estimada com os valores medidos e equações de ajuste de I e q com os respectivos R^2 e RMSE.

Infiltração	R^2	I (cm)	R^2	RMSE	q (cm.h ⁻¹)
Medida	0,9968	$4,064 \cdot t^{0,5}$	0,9998	0,0186	$2,032 \cdot t^{0,5}$
Calculada		$3,800 \cdot t^{0,5}$	0,9971	0,0869	$1,900 \cdot t^{0,5}$

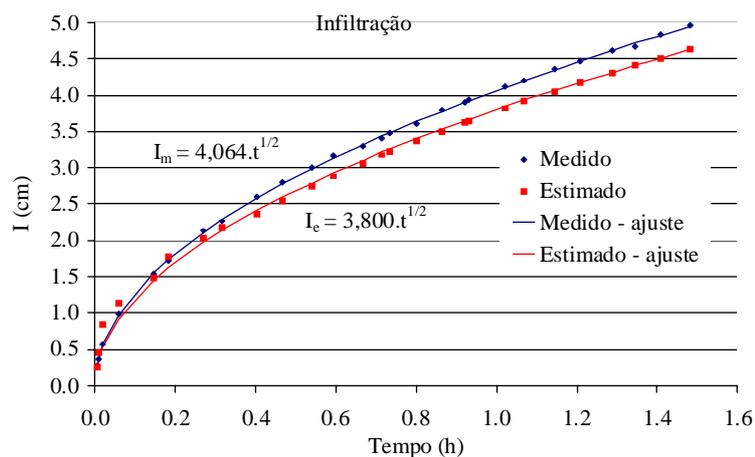


Figura 41 - Curvas de infiltração, medida e estimada, do LRD deformado.

Na Figura 42a, apresenta-se a comparação entre os valores medidos e calculados do perfil de umidade da amostra, obtidos durante a primeira seqüência de tomografias. Geralmente, a curva dos valores simulados apresenta queda mais acentuada que a medida devido a dois possíveis motivos: os modelos que utilizam a equação de Richards não consideram os fluxos preferenciais, causados pelo processo de preparação da amostra, que podem ocorrer na coluna; o segundo motivo pode ser variações na massa específica global ao longo da coluna. A diminuição da massa específica no sentido descendente provoca um ligeiro aumento da condutividade

hidráulica e retenção de água nas seções próximas à base da coluna. Inclusive, esta pode ser a razão da infiltração acumulada medida ser maior que a estimada.

A correspondência entre os dados medidos da retenção da água e da curva de retenção calculada com os parâmetros do modelo de Rossi-Nimmo é mostrada na Figura 42b. Os dados experimentais da curva de retenção para este solo foram obtidos por Primavesi et al. (1999), através do método da panela de Richards. A boa correspondência indica que o números de seções medidas e os tempos envolvidos no experimento, produziram informações suficientes sobre a forma de frente de molhamento que por sua vez, indica a forma da curva de retenção.

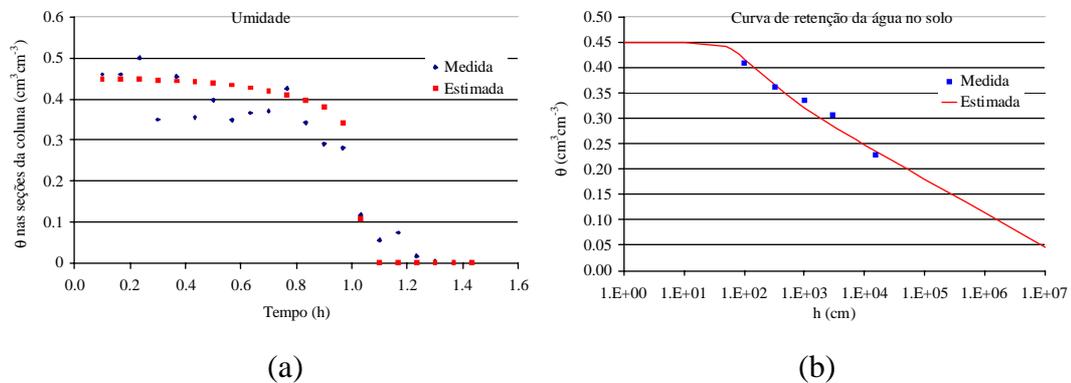


Figura 42 - Perfil de umidade durante infiltração (a) e curva de retenção da água no solo (b).

Adicionalmente, utilizando-se as equações (67), (68) e (69), o modelo permite determinar a função condutividade hidráulica (Figura 43a). Determinada esta função, calcula-se a difusividade hidráulica em função da umidade (Figura 43b), por meio da eq.(14). Da curva de retenção obtém-se $\partial h/\partial \theta$.

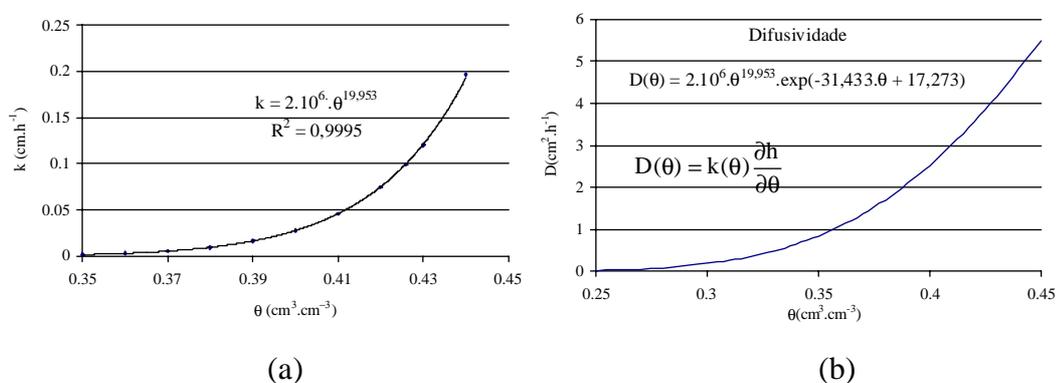


Figura 43 - Condutividade hidráulica e difusividade em função da umidade do solo.

5.2 Resultados dos experimentos com amostras de solo estruturado em laboratório e em campo

Observando-se a Tabela 8, podem-se comparar os dados de densidade, umidade e infiltração obtidos em experimentos no laboratório, com 15 amostras sob 3 diferentes tratamentos, e no campo, na área de plantio convencional. Apesar do plantio direto apresentar densidade global pouco menor que o plantio convencional, a condutividade hidráulica é significativamente maior na área de plantio direto. Isto se justifica pela maior presença de macroporos deixados por minhocas e matéria orgânica decomposta, bem como pela manutenção de sua conectividade.

Os gráficos apresentados a seguir, da Figura 44 até a Figura 120, mostram os perfis de densidades, a umidade durante as seqüências de infiltração e a curva do volume infiltrado para o experimento em campo (PC) e as 15 amostras analisadas em laboratório. O gráfico do volume infiltrado (Q) apresenta o R^2 entre o valor experimental (Q_{exp}) e o valor calculado na regressão (Q_{reg}). Além destes resultados diretos das medidas tomográficas, são apresentados, para cada uma das amostras, a curva de infiltração da água, a curva de retenção da água no solo e as funções condutividade e difusividade hidráulica. Da mesma forma que foram apresentados os resultados do modelo de Rossi & Nimmo no item 5.1.5, apresenta-se os parâmetros de entrada e saída do modelo. As equações de ajuste da infiltração e densidade de fluxo são apresentadas da Tabela 10 até a Tabela 39, juntamente com os gráficos da infiltração, umidade, curva de retenção da água no solo, condutividade hidráulica e difusividade.

Densidade média e umidade média das colunas de solo analisadas em campo e em laboratório.

PC - plantio convencional, PD - plantio direto e M - mata. Volume infiltrado $Q = \lambda.t^{1/2}$. A primeira linha (PC campo) refere-se às tomografias efetuadas no campo e as demais no laboratório.

Amostra	ρ (g.cm ⁻³)	C.V. %	θ (%) 1ª Seq.	C.V. %	z (mm)	θ (%) 2ª Seq.	C.V. %	θ (%) 3ª Seq.	C.V. %	θ (%) 4ª Seq.	C.V. %	θ (%) 5ª Seq.	C.V. %	θ (%) 6ª Seq.	C.V. %	λ
PC Campo	1,54	3,7	18,4	37,9	150	25,9	35,5	31,0	33,3							
PC1	1,53	7,1	26,3	41,1	145	30,6	34,4	29,0	34,9	29,7	37,3					2,63
PC2	1,48	2,7	16,5	73,1	100	33,7	18,3	38,4	15,4	38,1	19,0	37,8	20,2			3,55
PC3	1,68	3,4	9,13	163,0	40	27,3	55,8	30,1	32,9	27,2	41,8	26,9	43,3			2,25
PC4	1,71	3,7	12,5	124,0	65	28,5	63,8	24,3	48,3	19,1	52,8	15,7	57,5			2,31
PC5	1,57	4,9	9,9	109,0	80	31,8	16,5	35,3	17,3	34,4	14,0	36,7	17,3	36,3	12,9	3,24
PD1	1,46	3,8	41,1	12,1	150	43,2	16,8	42,2	13,8	42,5	18,0					5,73
PD2	1,54	4,8	41,9	15,3	150	41,4	16,9	40,0	10,9	40,4	15,5	39,7	11,4			2,82
PD3	1,38	4,7	16,1	80,0	110	39,0	17,0	40,9	15,0	43,1	12,7	42,5	12,4			3,96
PD4	1,54	3,0	25,2	18,7	150	34,3	19,2	35,6	14,4	38,3	16,2	37,6	15,5			6,24
PD5	1,57	2,4	34,7	37,6	150	51,2	24,9	46,4	26,4	44,9	28,4	43,3	31,5	41,7	27,8	2,88
M1	1,45	3,7	3,1	151,4	50	23,0	40,1	31,1	17,5	31,4	22,8	35,6	20,5	34,5	23,9	2,45
M2	1,43	3,6	33,3	15,3	150	35,3	22,9	34,1	25,3	30,3	27,6	36,4	37,3			4,63
M3	1,46	3,5	24,8	60,8	145	41,3	16,0	38,8	15,2	38,1	20,9	38,9	15,3	41,6	18,0	4,84
M4	1,43	3,6	19,7	35,8	150	27,9	18,1	31,2	16,6	29,7	14,9	31,1	15,4	32,2	15,8	5,10
M5	1,47	3,6	25,0	24,7	150	30,2	29,2	29,7	26,2	26,5	29,6	27,1	34,7			5,20

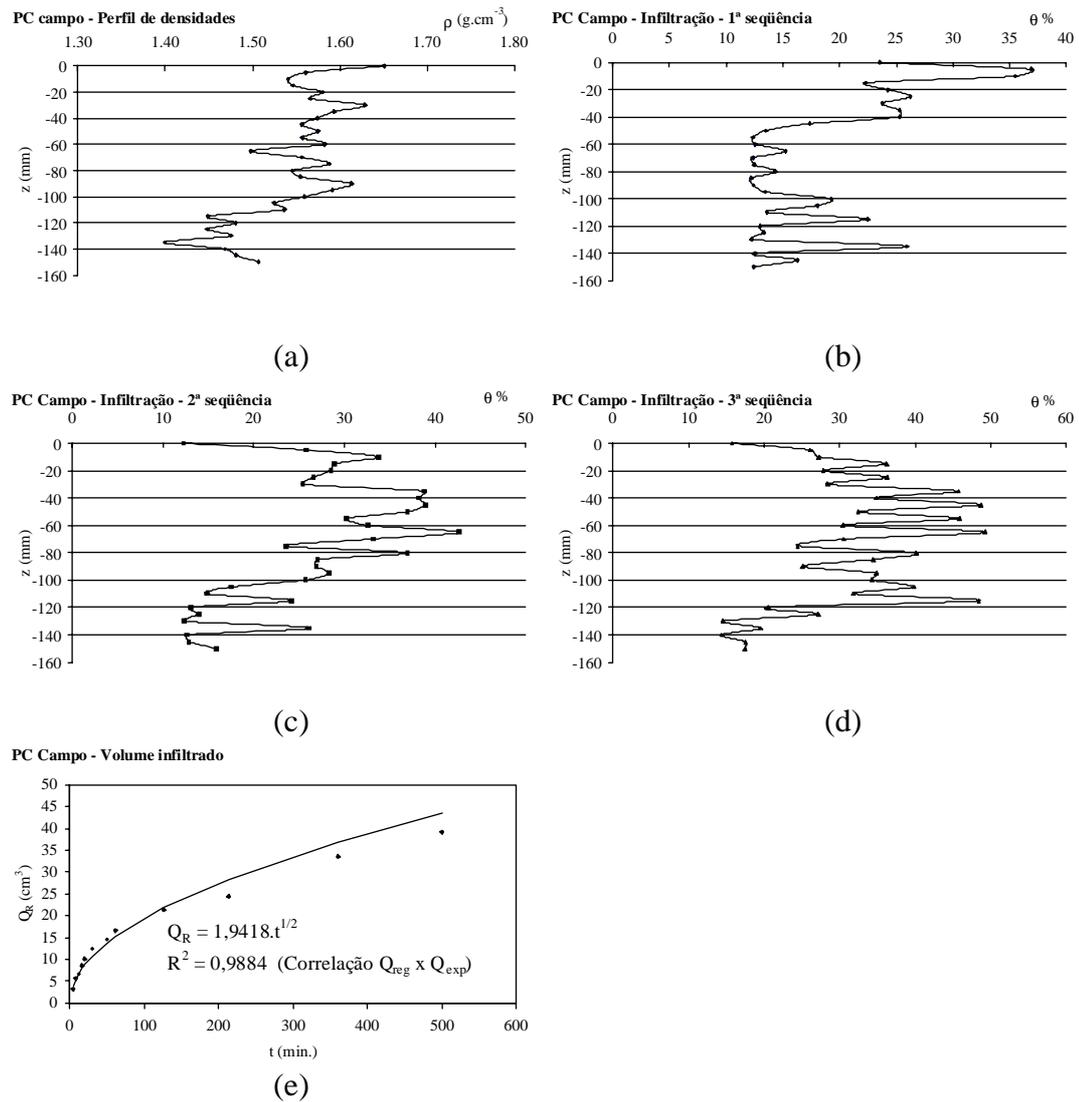


Figura 44 - Gráficos do perfil de densidades do solo seco (a), da umidade durante a infiltração (b, c e d) e do volume infiltrado (e), para a medida em campo na área do plantio convencional.

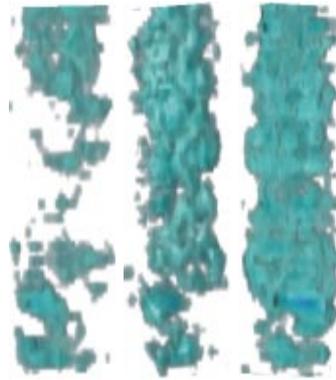


Figura 45 - Reconstrução 3-D de 3 seqüências de varreduras obtidas durante a infiltração da água, no experimento em campo na área de plantio convencional.

Tabela 10 - Parâmetros de entrada e saída do programa (algoritmo Marquardt) e parâmetros do modelo Rossi & Nimmo (1994). Medida em campo. θ em $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ e h em cm.

Entrada		Saída - Marquardt			Rossi & Nimmo					
θ_s	h_D	h_0	λ	K_s	h_I	h_{II}	C	α	$\theta(h_I)$	$\theta(h_{II})$
0,45	5.10^7	2,19	0,119	0,405	3,559	11205.6	0,0213	0,0431	0,4247	0,1629

Tabela 11 - Amostra PC em campo. Correlação da curva de infiltração estimada com os valores medidos e equações de ajuste de I e q com os respectivos R^2 e RMSE.

Infiltração	R^2	I (cm)	R^2	RMSE	q (cm.h^{-1})
Medida	0,9916	$1,190.t^{0,5}$	1	0,00724	$0,595.t^{0,5}$
Calculada		$0,850.t^{0,5}$	0,9916	0,06148	$0,425.t^{0,5}$

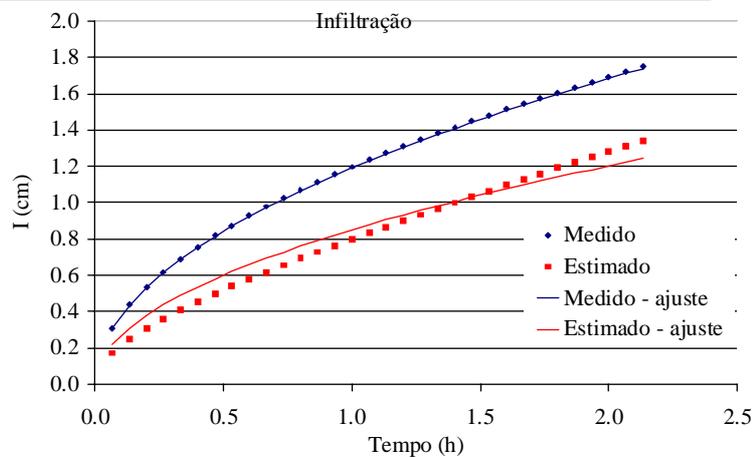
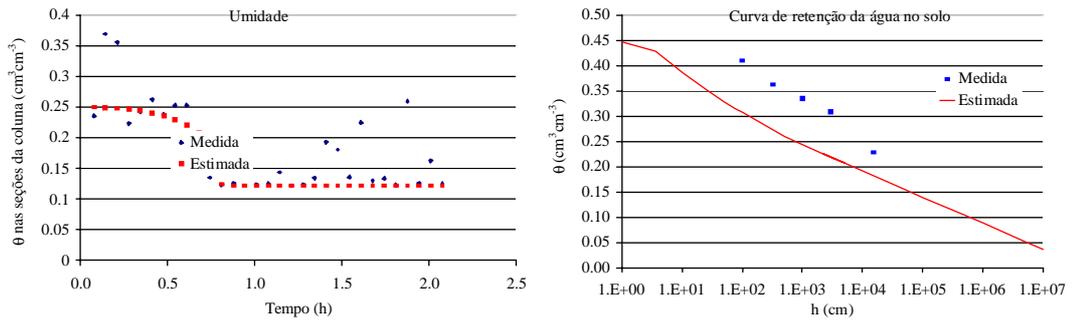


Figura 46 - Curvas de infiltração, medida e estimada, da amostra PC em campo.



(a)

(b)

Figura 47 - Amostra PC em campo. Perfil de umidade durante infiltração (a) e curva de retenção da água no solo (b).

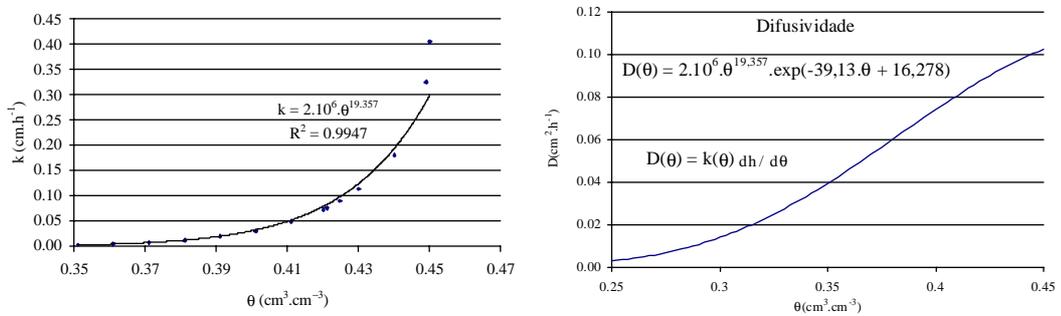
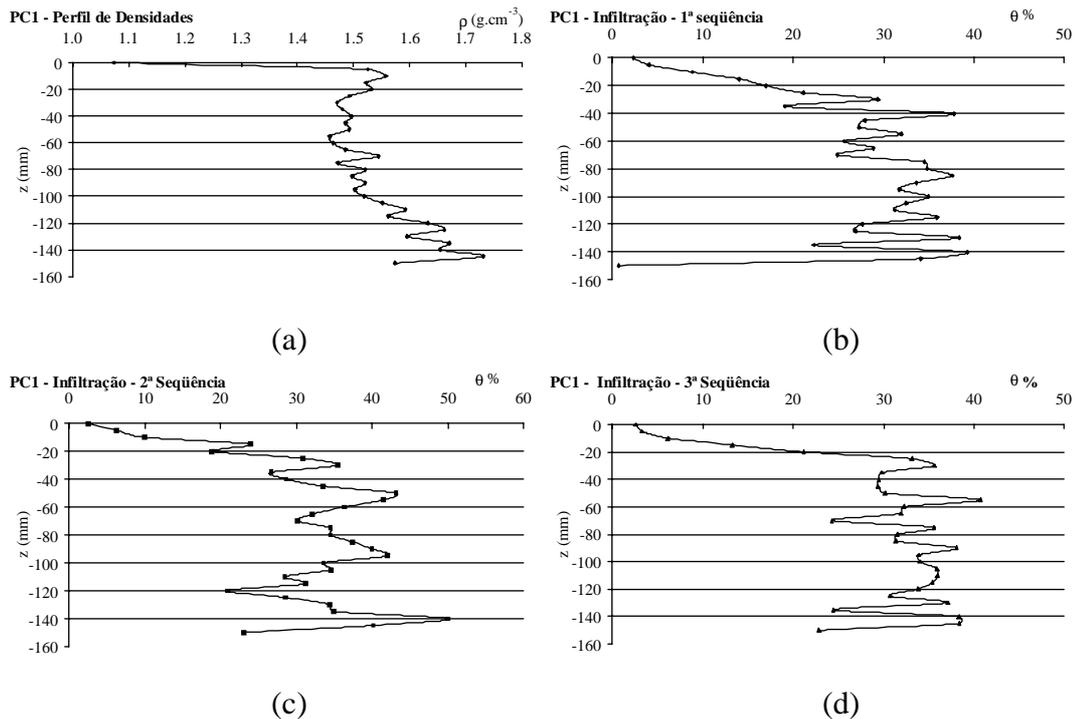


Figura 48 - Condutividade hidráulica e difusividade em função da umidade do solo. Amostra PC em campo.



(a)

(b)

(c)

(d)

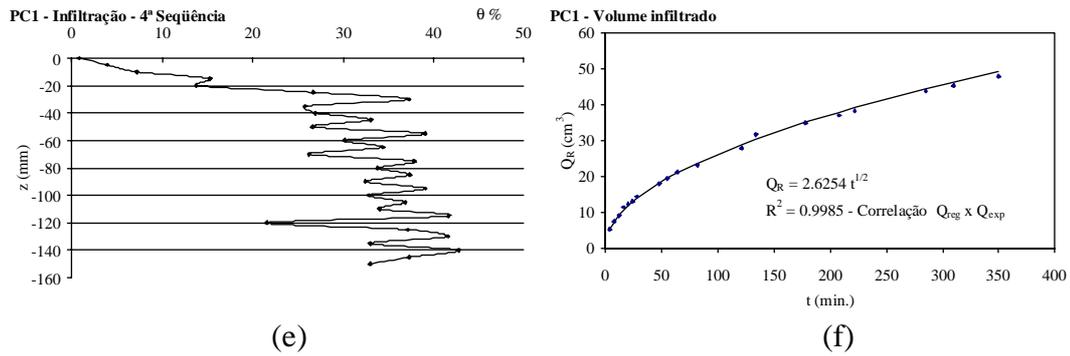


Figura 49 - Gráficos do perfil de densidades do solo seco, da umidade durante a infiltração e do volume infiltrado para a medida em laboratório da amostra PC1.

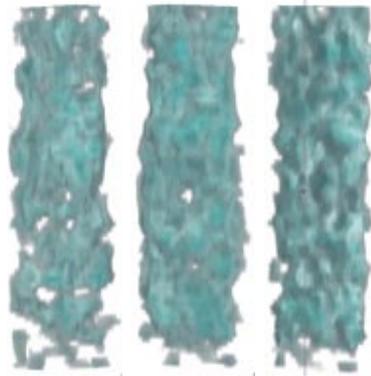


Figura 50 - Reconstrução 3-D de 3 seqüências de varreduras obtidas durante a infiltração da água na amostra PC1.

Tabela 12 - Parâmetros de entrada e saída do programa (algoritmo Marquardt) e parâmetros do modelo Rossi & Nimmo (1994). Amostra PC1. θ em $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ e h em cm.

Entrada		Saída – Marquardt			Rossi & Nimmo					
θ_s	h_D	h_0	λ	K_s	h_I	h_I	C	α	$\theta(h_I)$	$\theta(h_I)$
0,45	$5 \cdot 10^7$	22,7	0,113	0,307	36,92	7172,26	0,0202	0,0590	0,4259	0,2348

Tabela 13 - Amostra PC1. Correlação da curva de infiltração estimada com os valores medidos e equações de ajuste de I e q com os respectivos R^2 e RMSE.

Infiltração	R^2	I (cm)	R^2	RMSE	q ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$)
Medida	1	$1,620 \cdot t^{0,5}$	1	0,0018	$1,310 \cdot t^{0,5}$
Calculada		$2,120 \cdot t^{0,5}$	0,9985	0,0839	$1,060 \cdot t^{0,5}$

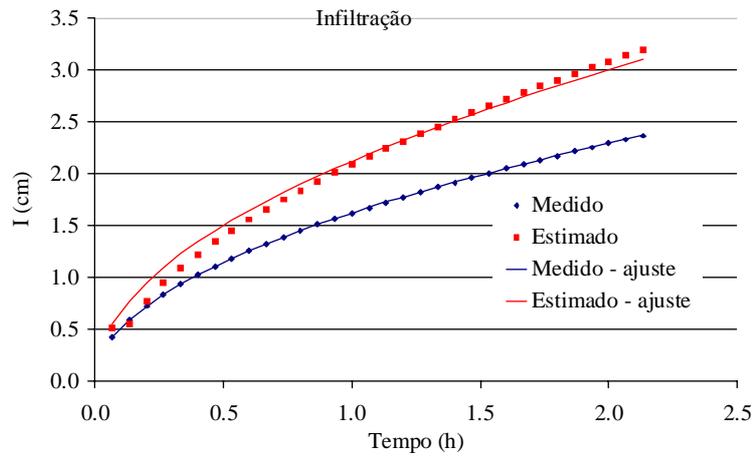


Figura 51 - Curvas de infiltração, medida e estimada, da amostra PC1.

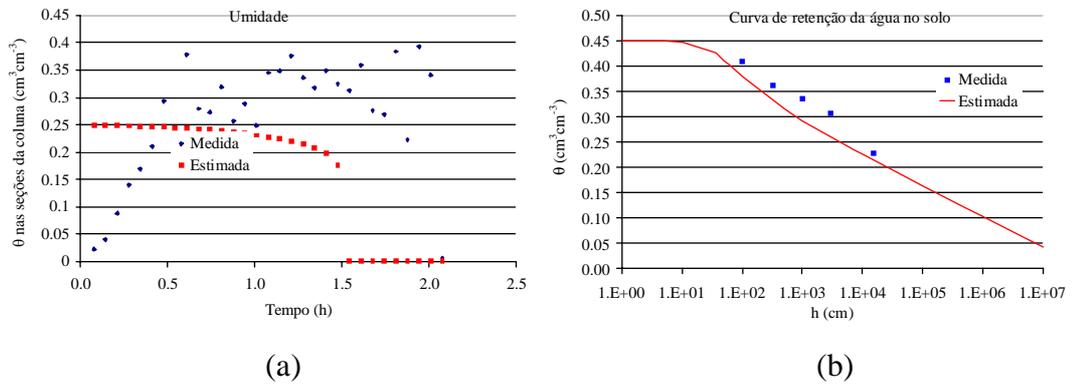


Figura 52 - Amostra PC1. Perfil de umidade durante infiltração (a) e curva de retenção da água no solo (b).

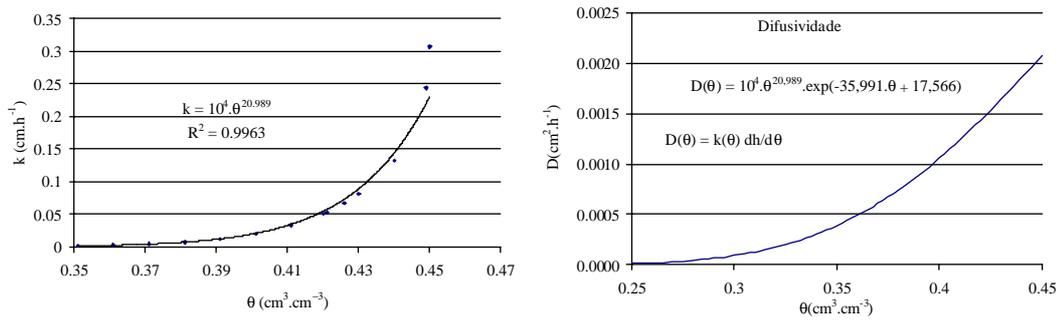


Figura 53 - Condutividade hidráulica e difusividade em função da umidade do solo. Amostra PC1.

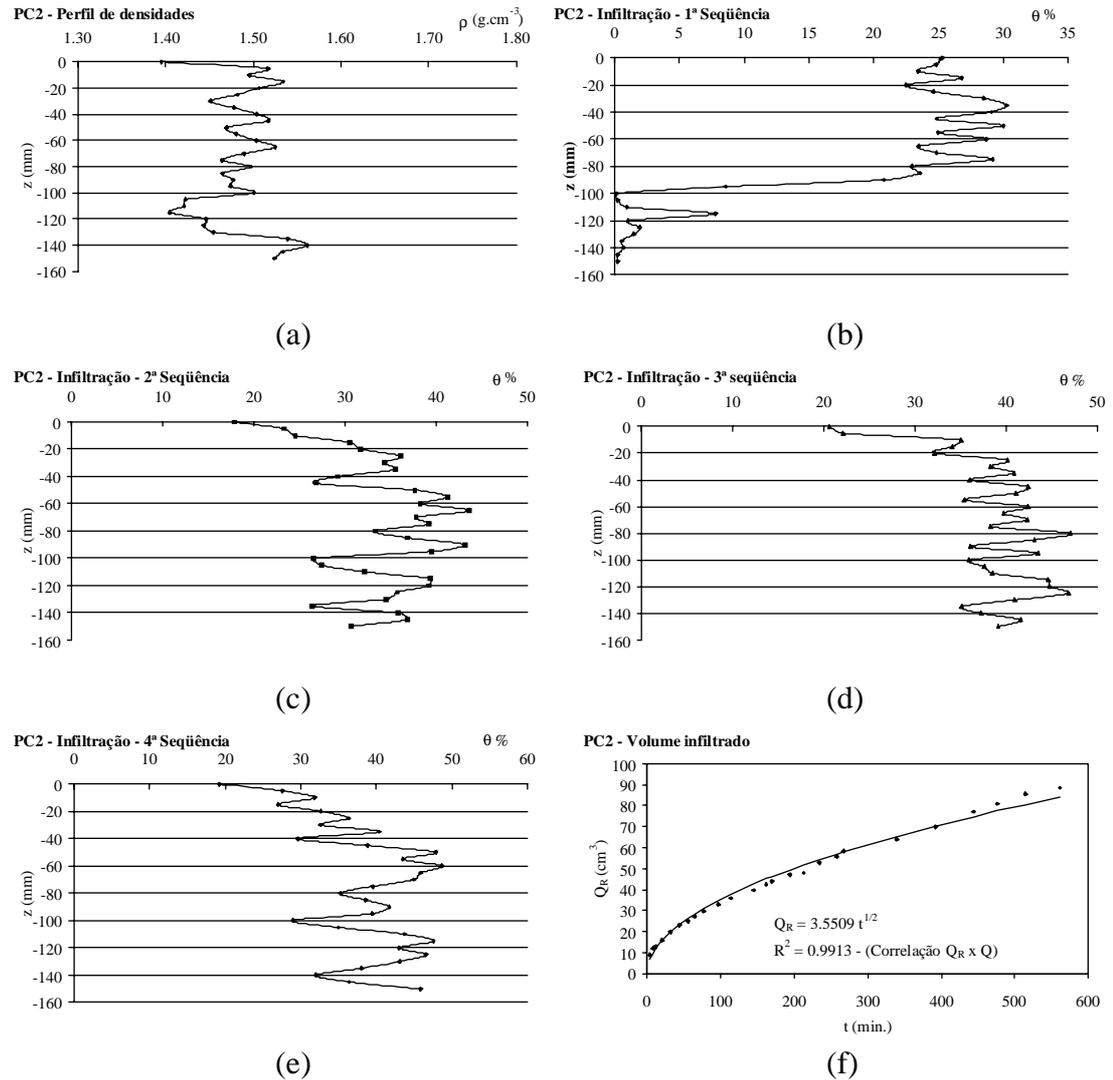


Figura 54 - Gráficos do perfil de densidades do solo seco, da umidade durante a infiltração e do volume infiltrado para a medida em laboratório da amostra PC2.

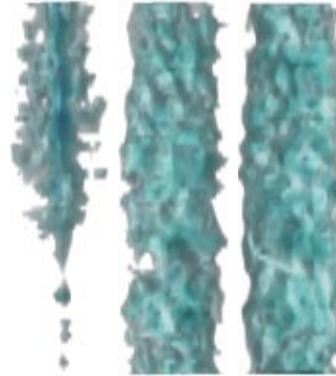


Figura 55 - Reconstrução 3-D de 3 seqüências de varreduras obtidas durante a infiltração da água na amostra PC2.

Tabela 14 - Parâmetros de entrada e saída do programa (algoritmo Marquardt) e parâmetros do modelo Rossi & Nimmo (1994). Amostra PC2. θ em $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ e h em cm.

Entrada		Saída - Marquardt			Rossi & Nimmo					
θ_s	h_D	h_0	λ	K_s	h_f	h_f	C	α	$\theta(h_f)$	$\theta(h_f)$
0,45	$5 \cdot 10^7$	42,42	0,1015	0,1572	69,09	2631,52	0,0182	0,0668	0,4283	0,2960

Tabela 15 - Amostra PC2. Correlação da curva de infiltração estimada com os valores medidos e equações de ajuste de I e q com os respectivos R^2 e RMSE.

Infiltração	R^2	I (cm)	R^2	RMSE	q ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$)
Medida	0,999	$2,190 \cdot t^{0,5}$	1	0,0013	$1,095 \cdot t^{-0,5}$
Calculada		$2,040 \cdot t^{0,5}$	1	0,0248	$1,020 \cdot t^{-0,5}$

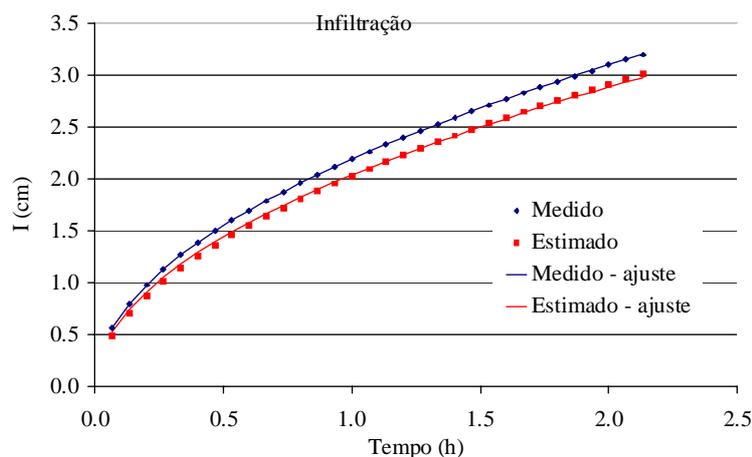


Figura 56 - Curvas de infiltração, medida e estimada, da amostra PC2.

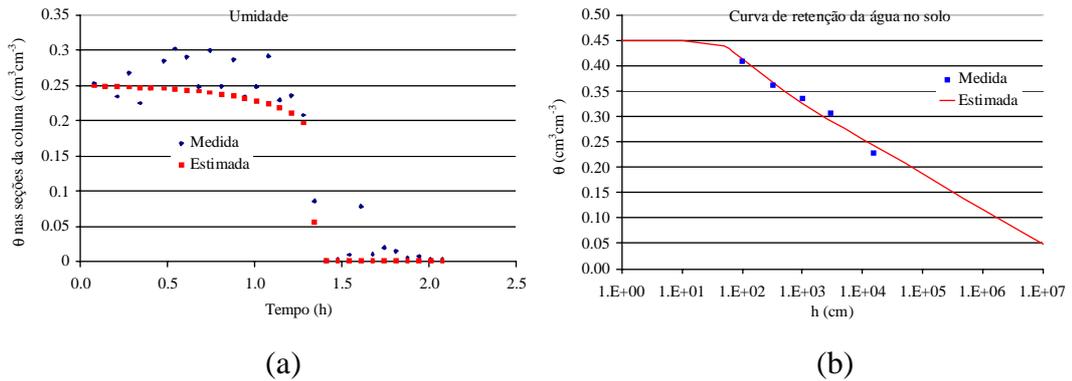


Figura 57 - Amostra PC2. Perfil de umidade durante infiltração (a) e curva de retenção da água no solo (b).

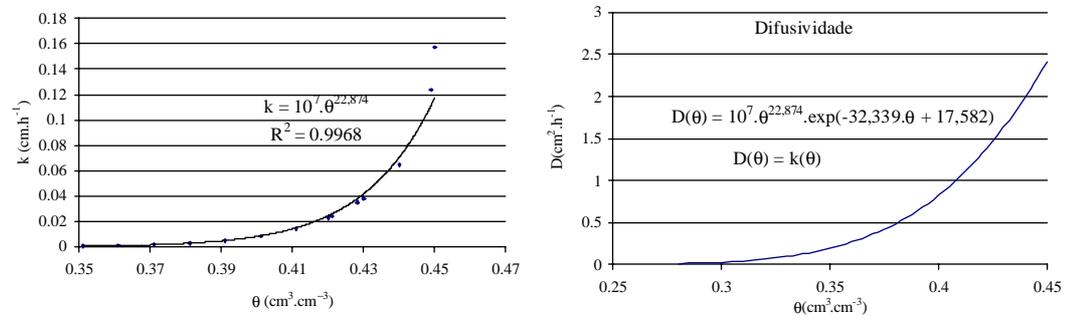
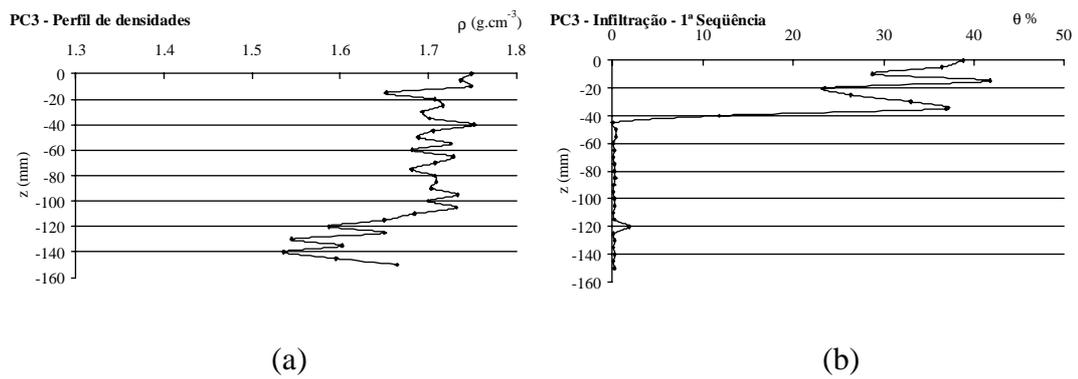


Figura 58 - Condutividade hidráulica e difusividade em função da umidade do solo. Amostra PC2.



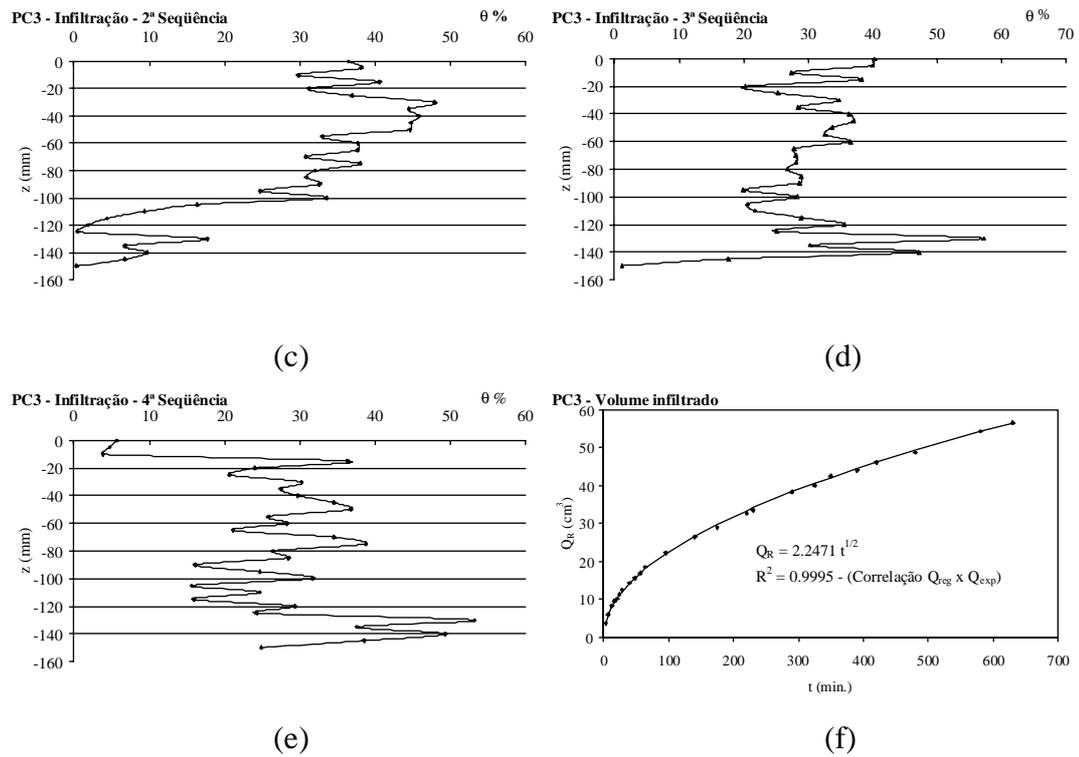


Figura 59 - Gráficos do perfil de densidades do solo seco, da umidade durante a infiltração e do volume infiltrado para a medida em laboratório da amostra PC3.



Figura 60 - Reconstrução 3-D de 3 seqüências de varreduras obtidas durante a infiltração da água na amostra PC3.

Tabela 16 - Parâmetros de entrada e saída do programa (algoritmo Marquardt) e parâmetros do modelo Rossi & Nimmo (1994). Amostra PC3. θ em $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ e h em cm.

Entrada		Saída – Marquardt			Rossi & Nimmo					
θ_s	h_D	h_0	λ	K_s	h_I	h_{II}	C	α	$\theta(h_I)$	$\theta(h_{II})$
0,45	$5 \cdot 10^{-7}$	9,99	0,1000	0,29	16,27	2270,00	0,0179	0,0581	0,4286	0,2616

Tabela 17 - Amostra PC3. Correlação da curva de infiltração estimada com os valores medidos e equações de ajuste de I e q com os respectivos R^2 e RMSE.

Infiltração	R^2	I (cm)	R^2	RMSE	q ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$)
Medida	0,999	$1,390 \cdot t^{0,5}$	1	0,0518	$0,695 \cdot t^{0,5}$
Calculada		$1,470 \cdot t^{0,5}$	0,999	0,0357	$0,735 \cdot t^{0,5}$

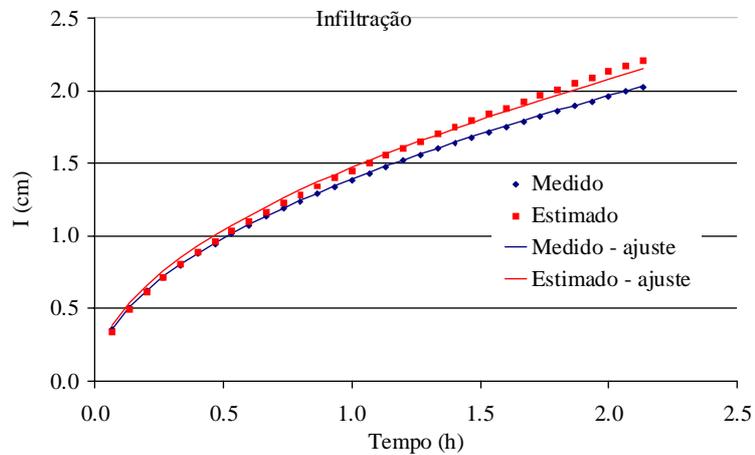
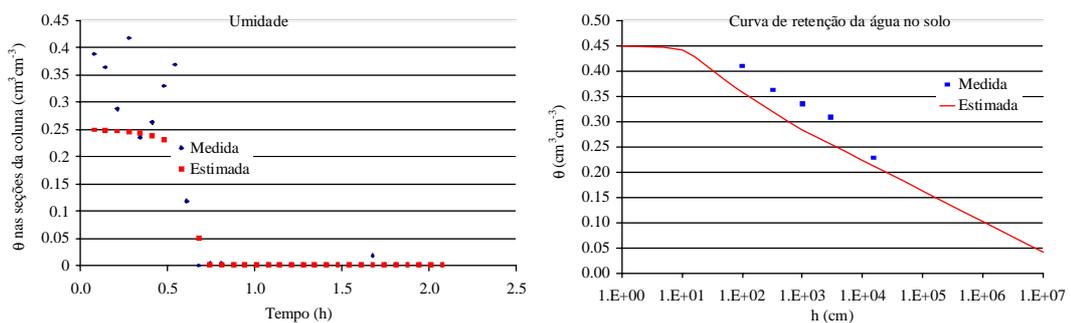


Figura 61 - Curvas de infiltração, medida e estimada, da amostra PC3.



(a)

(b)

Figura 62 - Amostra PC3. Perfil de umidade durante infiltração (a) e curva de retenção da água no solo (b).

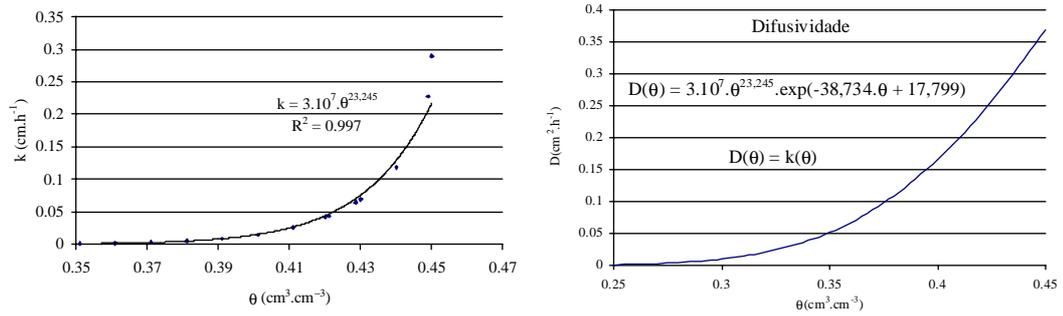
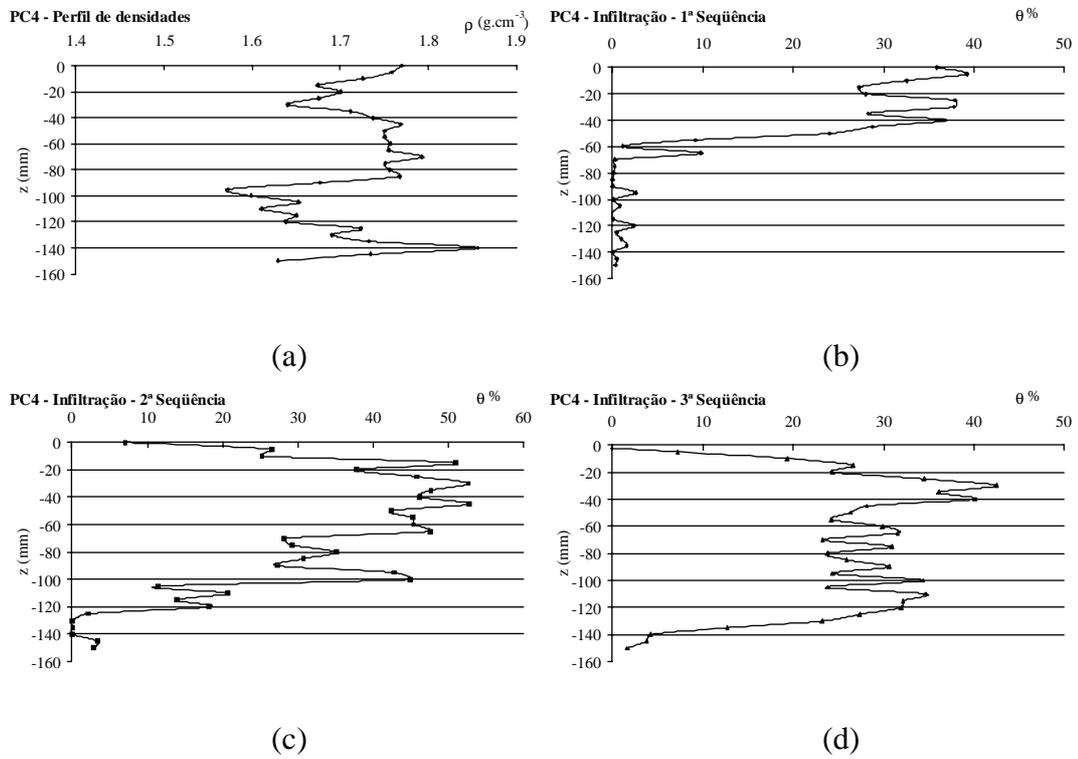


Figura 63 - Condutividade hidráulica e difusividade em função da umidade do solo. Amostra PC3.



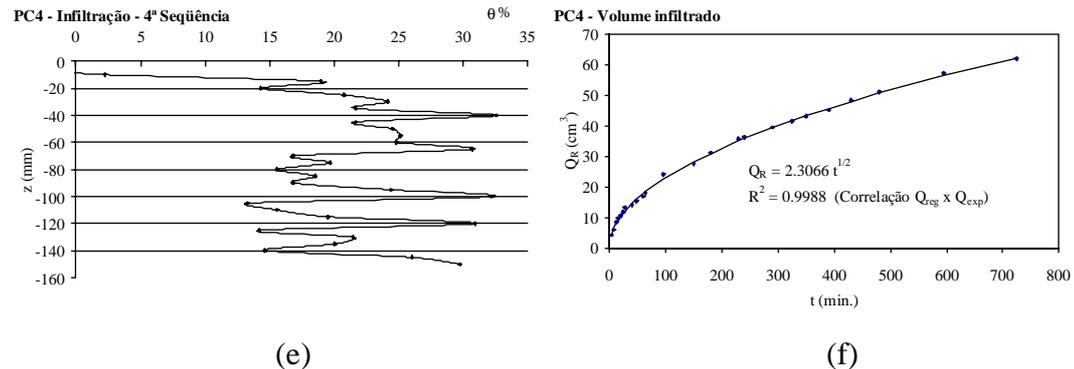


Figura 64 - Gráficos do perfil de densidades do solo seco, da umidade durante a infiltração e do volume infiltrado para a medida em laboratório da amostra PC4.

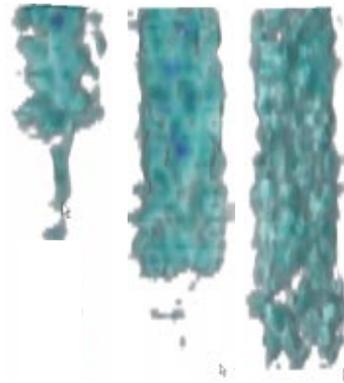


Figura 65 - Reconstrução 3-D de 3 seqüências de varreduras obtidas durante a infiltração da água na amostra PC4.

Tabela 18 - Parâmetros de entrada e saída do programa (algoritmo Marquardt) e parâmetros do modelo Rossi & Nimmo (1994). Amostra PC4. θ em $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ e h em cm.

Entrada		Saída – Marquardt			Rossi & Nimmo					
θ_s	h_D	h_0	λ	K_s	h_I	h_J	C	α	$\theta(h_I)$	$\theta(h_J)$
0,45	$5 \cdot 10^7$	12,10	0,1000	0,281	19,71	2270,00	0,0179	0,0592	0,4286	0,2666

Tabela 19 - Amostra PC4. Correlação da curva de infiltração estimada com os valores medidos e equações de ajuste de I e q com os respectivos R^2 e RMSE.

Infiltração	R^2	I (cm)	R^2	RMSE	q ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$)
Medida	0,999	$1,420 \cdot t^{0,5}$	1	0,00205	$0,710 \cdot t^{-0,5}$
Calculada		$1,570 \cdot t^{0,5}$	0,999	0,03499	$0,785 \cdot t^{-0,5}$

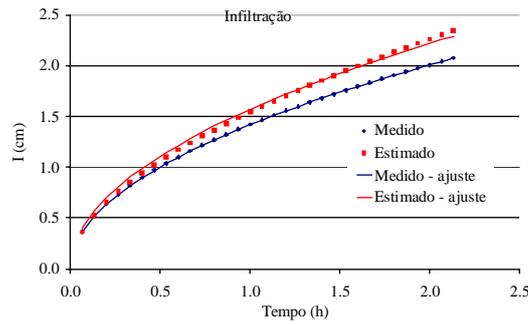
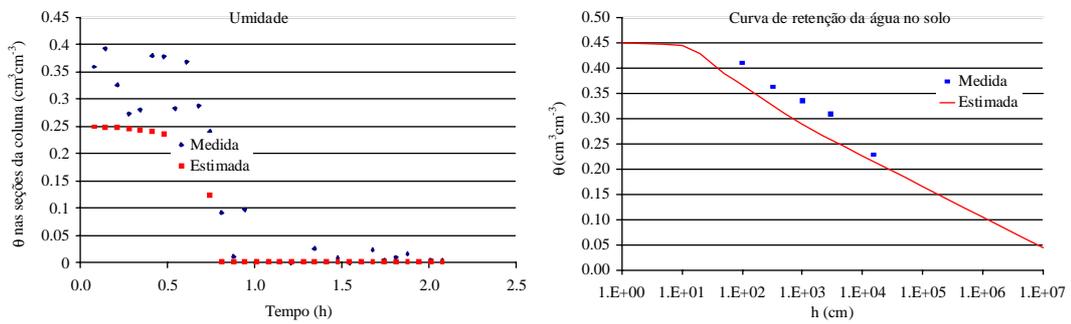


Figura 66 - Curvas de infiltração, medida e estimada, da amostra PC4.



(a)

(b)

Figura 67 - Amostra PC4. Perfil de umidade durante infiltração (a) e curva de retenção da água no solo (b).

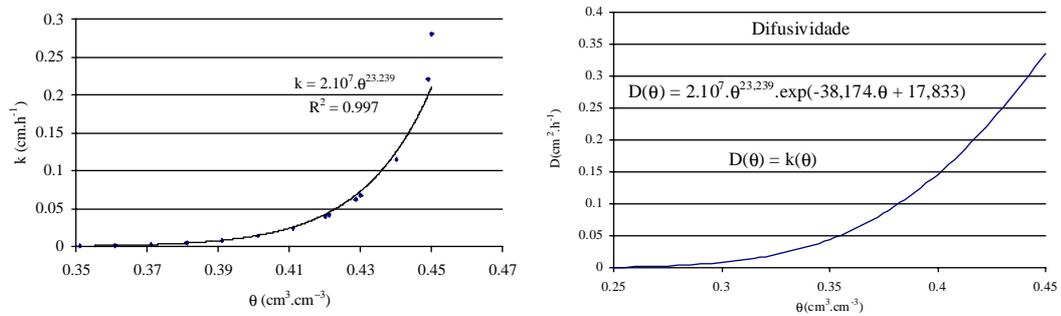


Figura 68 - Condutividade hidráulica e difusividade em função da umidade do solo. Amostra PC4.

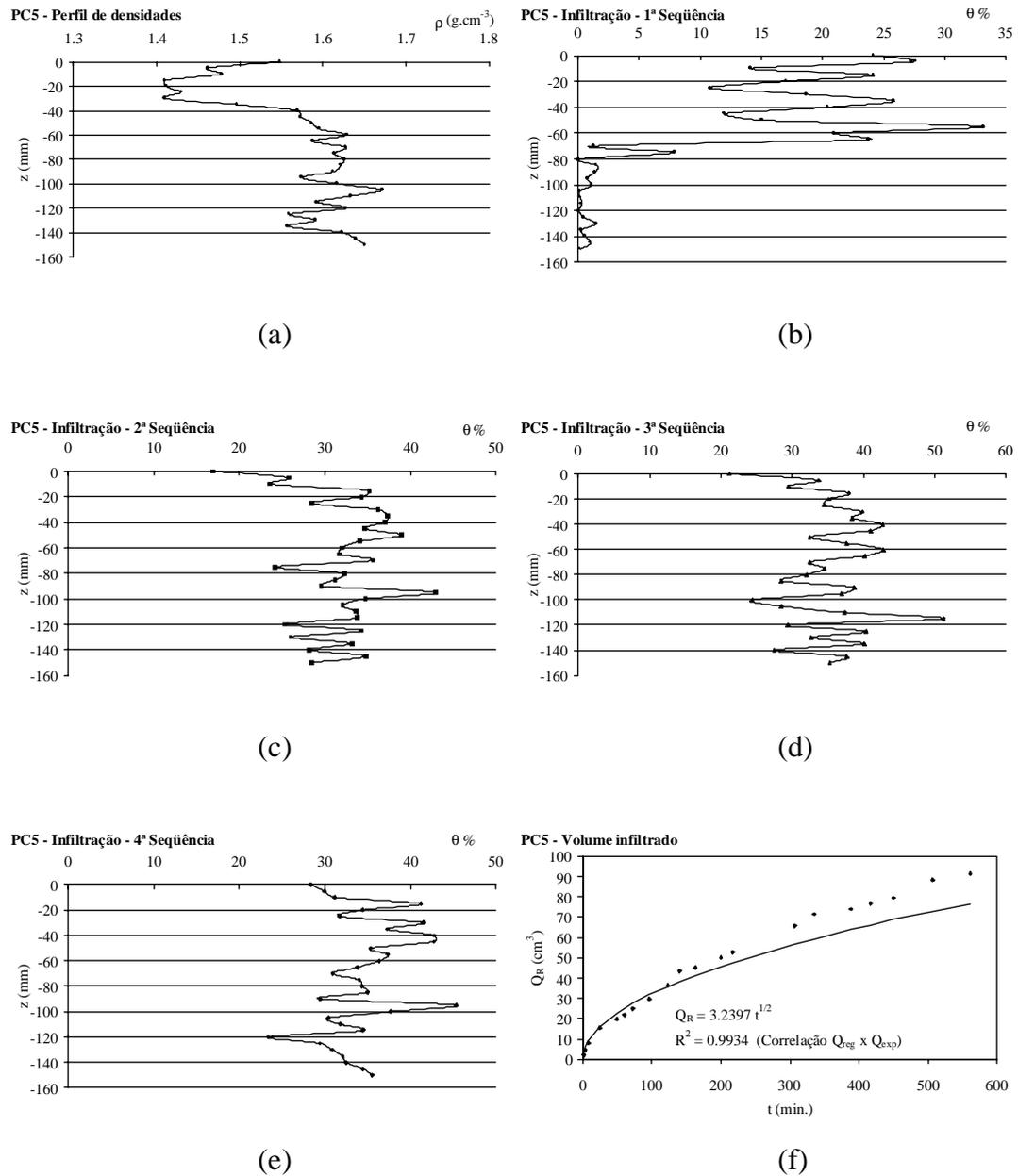


Figura 69 - Gráficos do perfil de densidades do solo seco, da umidade durante a infiltração e do volume infiltrado para a medida em laboratório da amostra PC5.

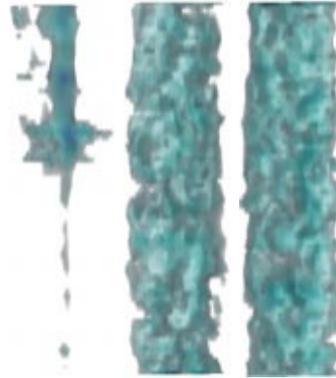


Figura 70 - Reconstrução 3-D de 3 seqüências de varreduras obtidas durante a infiltração da água na amostra PC5.

Tabela 20 - Parâmetros de entrada e saída do programa (algoritmo Marquardt) e parâmetros do modelo Rossi & Nimmo (1994). Amostra PC5. θ em $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ e h em cm.

Entrada		Saída – Marquardt			Rossi & Nimmo					
θ_s	h_D	h_0	λ	K_s	h_I	h_J	C	α	$\theta(h_I)$	$\theta(h_J)$
0,45	$5 \cdot 10^7$	10,60	0,2120	0,408	17,05	447106	0,0370	0,02217	0,4069	0,0471

Tabela 21 - Amostra PC5. Correlação da curva de infiltração estimada com os valores medidos e equações de ajuste de I e q com os respectivos R^2 e RMSE.

Infiltração	R^2	I (cm)	R^2	RMSE	q ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$)
Medida	0,9989	$1,99 \cdot t^{0,5}$	1	0,00736	$0,995 \cdot t^{-0,5}$
Calculada		$1,760 \cdot t^{0,5}$	0,9991	0,05012	$0,880 \cdot t^{-0,5}$

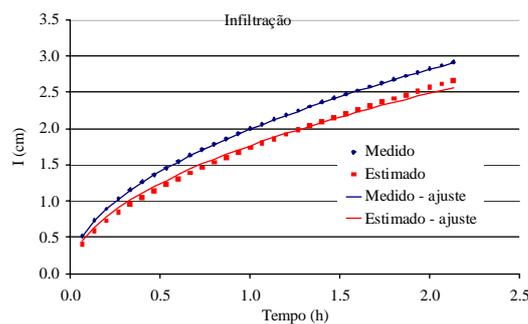


Figura 71 - Curvas de infiltração, medida e estimada, da amostra PC5.

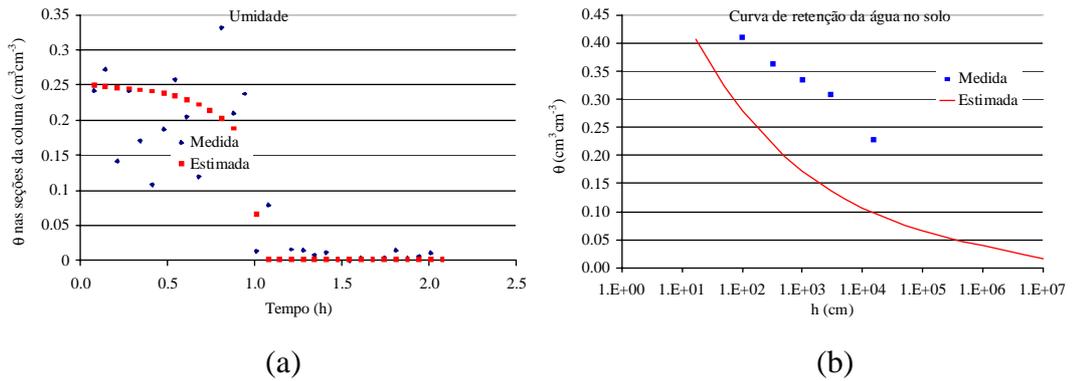


Figura 72 - Amostra PC5. Perfil de umidade durante infiltração (a) e curva de retenção da água no solo (b).

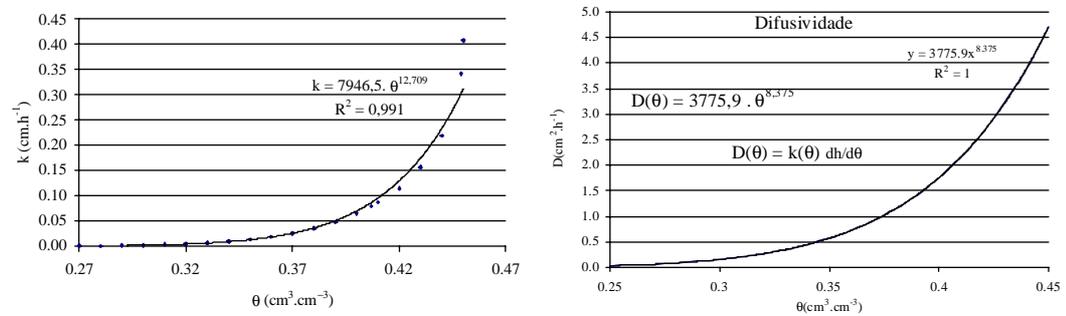
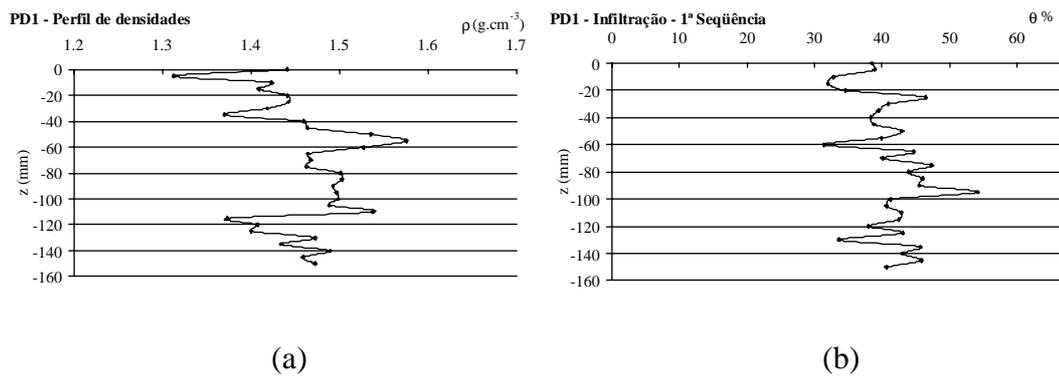


Figura 73 - Condutividade hidráulica e difusividade em função da umidade do solo. Amostra PC5.



(a)

(b)

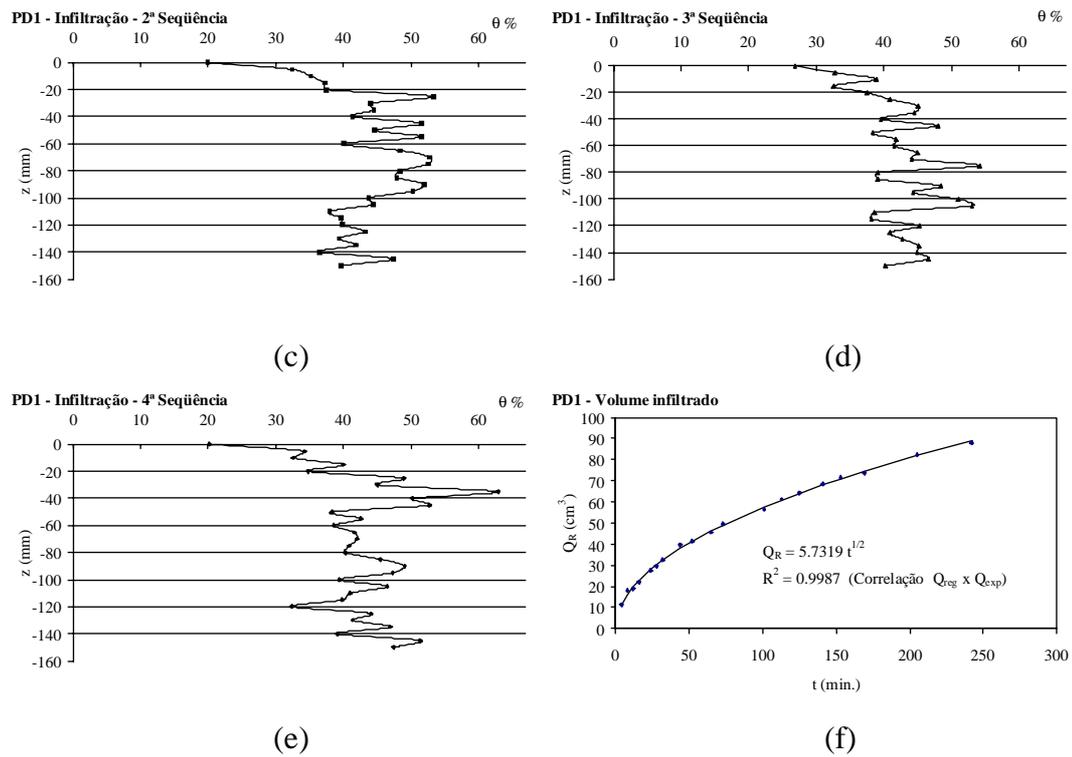


Figura 74 - Gráficos do perfil de densidades do solo seco, da umidade durante a infiltração e do volume infiltrado para a medida em laboratório da amostra PD1.



Figura 75 - Reconstrução 3-D de 3 seqüências de varreduras obtidas durante a infiltração da água na amostra PD1.

Tabela 22 - Parâmetros de entrada e saída do programa (algoritmo Marquardt) e parâmetros do modelo Rossi & Nimmo (1994). Amostra PD1. θ em $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ e h em cm.

Entrada		Saída – Marquardt			Rossi & Nimmo					
θ_s	h_D	h_0	λ	K_s	h_I	h_{II}	C	α	$\theta(h_I)$	$\theta(h_{II})$
0,45	$5 \cdot 10^{-7}$	17,0	0,1000	0,469	27,69	2269,99	0,0179	0,06130	0,4286	0,2758

Tabela 23 - Amostra PD1. Correlação da curva de infiltração estimada com os valores medidos e equações de ajuste de I e q com os respectivos R^2 e RMSE.

Infiltração	R^2	I (cm)	R^2	RMSE	q ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$)
Medida	0,9993	$3,53 \cdot t^{0,5}$	1	0,00337	$1,765 \cdot t^{-0,5}$
Calculada		$2,40 \cdot t^{0,5}$	0,9994	0,05805	$1,200 \cdot t^{-0,5}$

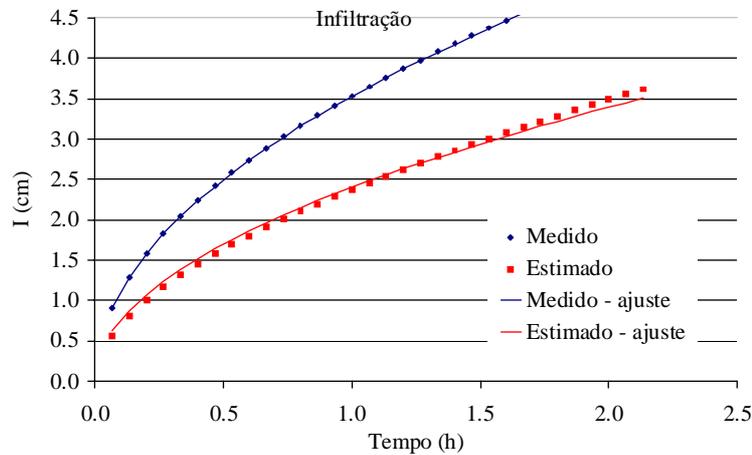


Figura 76 - Curvas de infiltração, medida e estimada, da amostra PD1.

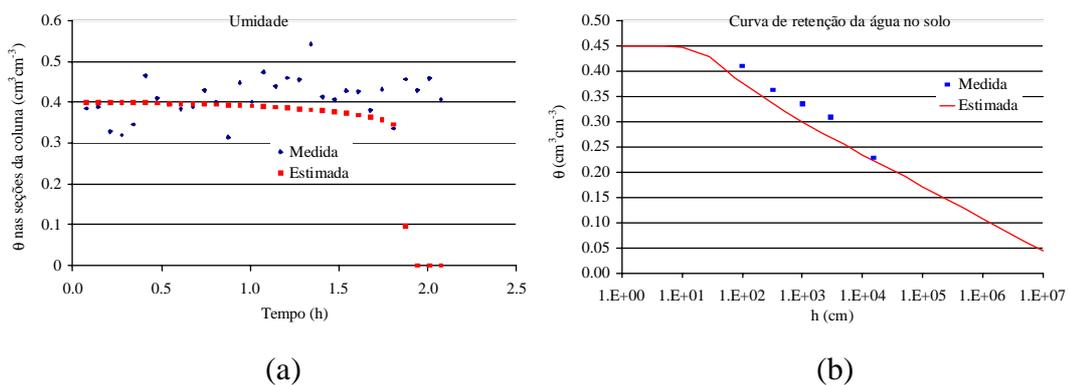


Figura 77 - Amostra PD1. Perfil de umidade durante infiltração (a) e curva de retenção da água no solo (b).

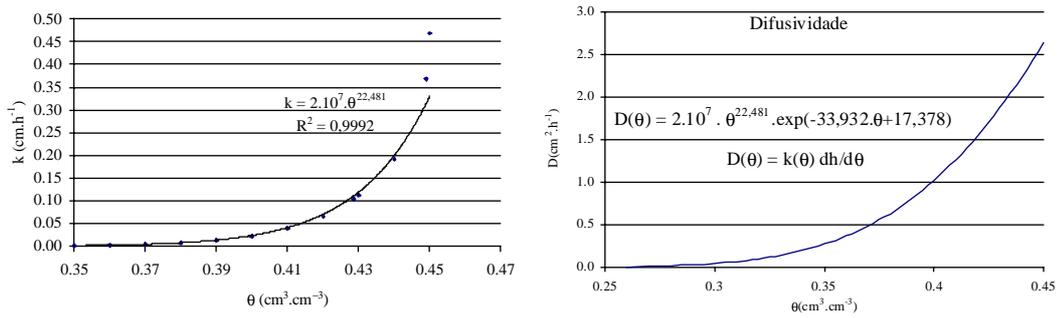
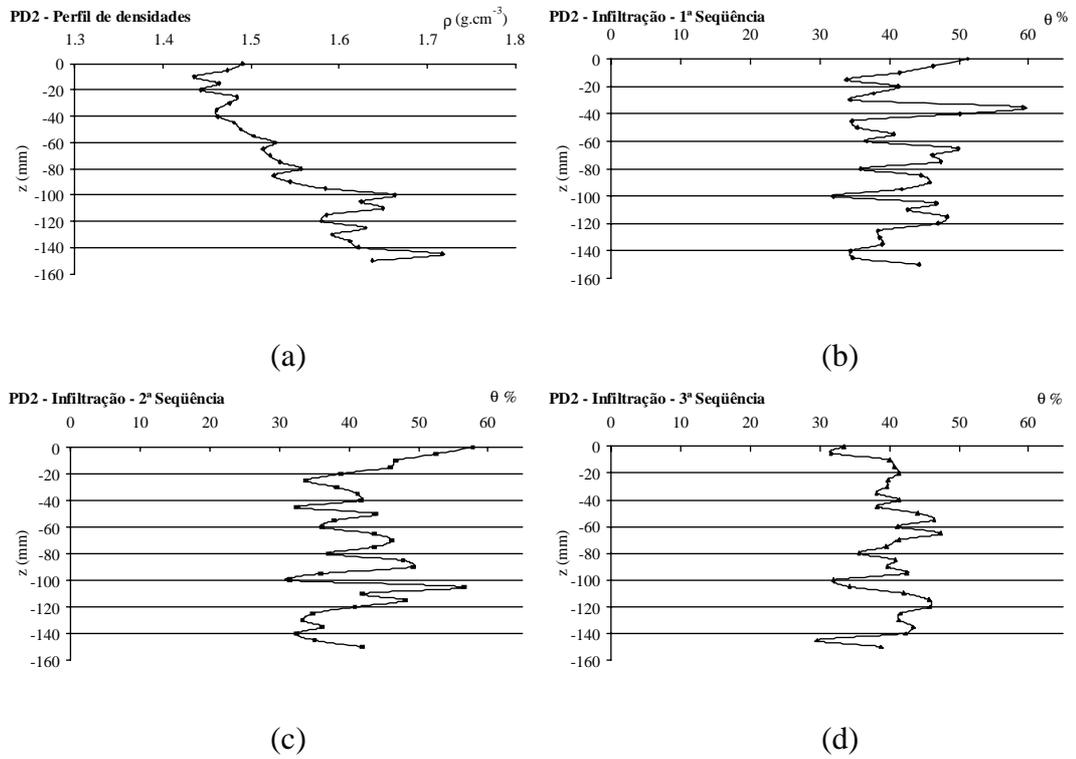


Figura 78 - Condutividade hidráulica e difusividade em função da umidade do solo. Amostra PD1.



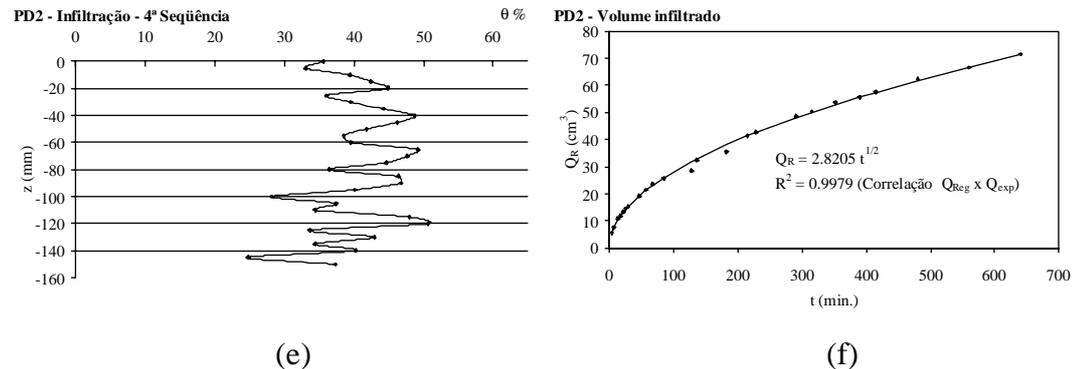


Figura 79 - Gráficos do perfil de densidades do solo seco, da umidade durante a infiltração e do volume infiltrado para a medida em laboratório da amostra PD2.



Figura 80 - Reconstrução 3-D de 3 seqüências de varreduras obtidas durante a infiltração da água na amostra PD2.

Tabela 24 - Parâmetros de entrada e saída do programa (algoritmo Marquardt) e parâmetros do modelo Rossi & Nimmo (1994). Amostra PD2. θ em $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ e h em cm.

Entrada		Saída – Marquardt			Rossi & Nimmo					
θ_s	h_D	h_0	λ	K_s	h_i	h_j	C	α	$\theta(h_i)$	$\theta(h_j)$
0,45	$5 \cdot 10^7$	15,1	0,1000	0,452	24,59	2269,99	0,0179	0,06057	0,4286	0,2758

Tabela 25 - Amostra PD2. Correlação da curva de infiltração estimada com os valores medidos e equações de ajuste de I e q com os respectivos R^2 e RMSE.

Infiltração	R^2	I (cm)	R^2	RMSE	q ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$)
Medida	0,9992	$1,74 \cdot t^{0,5}$	1	0,00142	$0,87 \cdot t^{-0,5}$
Calculada		$2,25 \cdot t^{0,5}$	0,9993	0,05455	$1,125 \cdot t^{-0,5}$

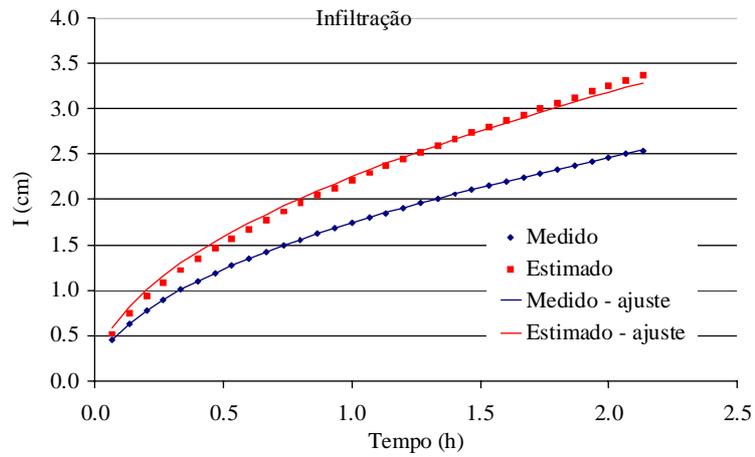


Figura 81 - Curvas de infiltração, medida e estimada, da amostra PD2.

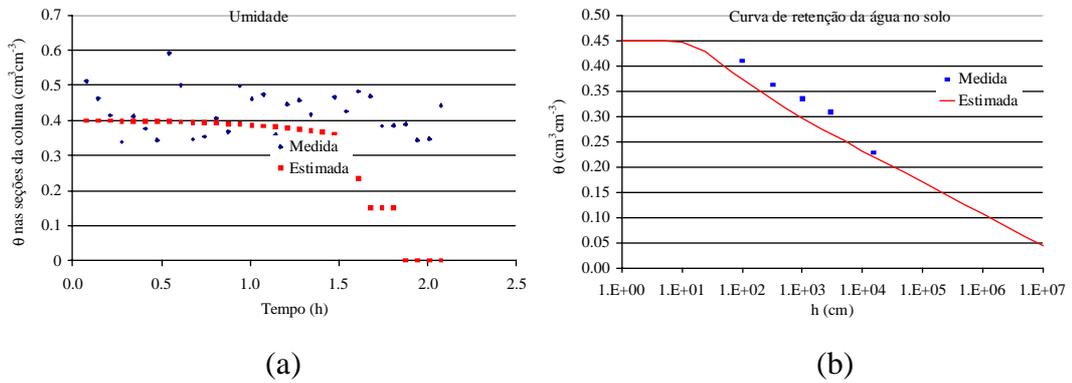


Figura 82 - Amostra PD2. Perfil de umidade durante infiltração (a) e curva de retenção da água no solo (b).

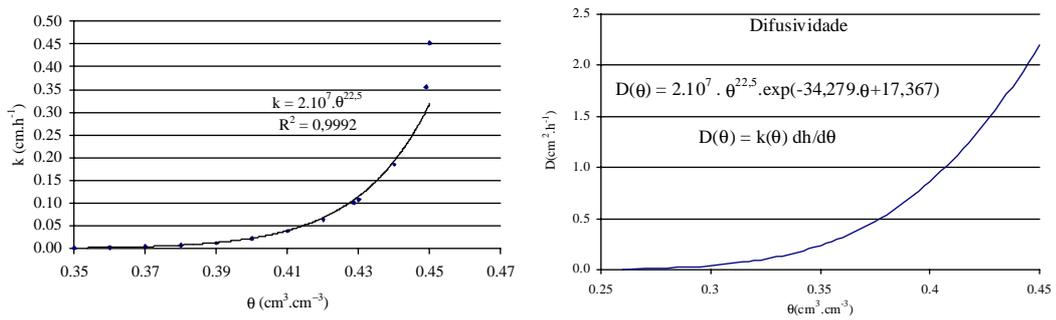


Figura 83 - Condutividade hidráulica e difusividade em função da umidade do solo. Amostra PD2.

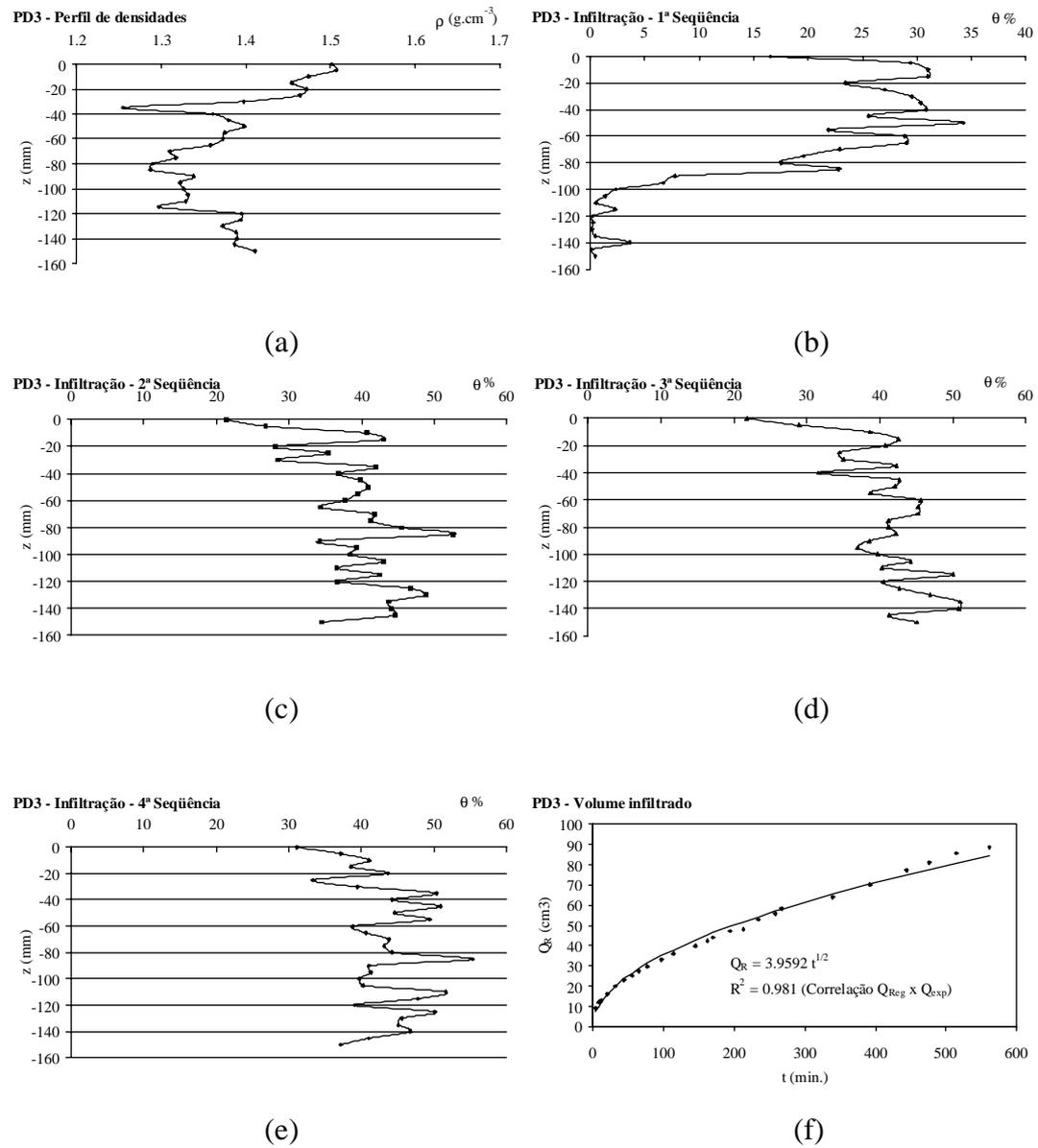


Figura 84 - Gráficos do perfil de densidades do solo seco, da umidade durante a infiltração e do volume infiltrado para a medida em laboratório da amostra PD3.



Figura 85 - Reconstrução 3-D de 3 seqüências de varreduras obtidas durante a infiltração da água na amostra PD3.

Tabela 26 - Parâmetros de entrada e saída do programa (algoritmo Marquardt) e parâmetros do modelo Rossi & Nimmo (1994). Amostra PD3. θ em $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ e h em cm.

Entrada		Saída – Marquardt			Rossi & Nimmo					
θ_s	h_D	h_0	λ	K_s	h_I	h_J	C	α	$\theta(h_I)$	$\theta(h_J)$
0,45	$5 \cdot 10^7$	6,99	0,156	0,685	11,31	82230	0,0276	0,03615	0,4174	0,1043

Tabela 27 - Amostra PD3. Correlação da curva de infiltração estimada com os valores medidos e equações de ajuste de I e q com os respectivos R^2 e RMSE.

Infiltração	R^2	I (cm)	R^2	RMSE	q ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$)
Medida	0,9972	$2,44 \cdot t^{0,5}$	1	0,00058	$1,22 \cdot t^{-0,5}$
Calculada		$2,08 \cdot t^{0,5}$	0,9972	0,08652	$1,04 \cdot t^{-0,5}$

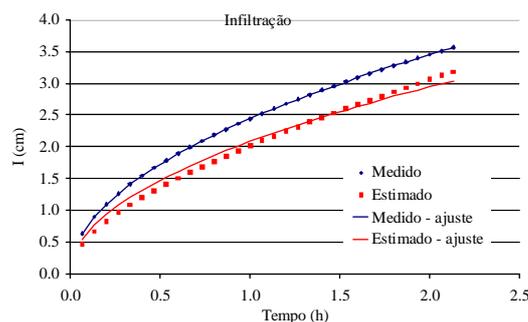


Figura 86 - Curvas de infiltração, medida e estimada, da amostra PD3.

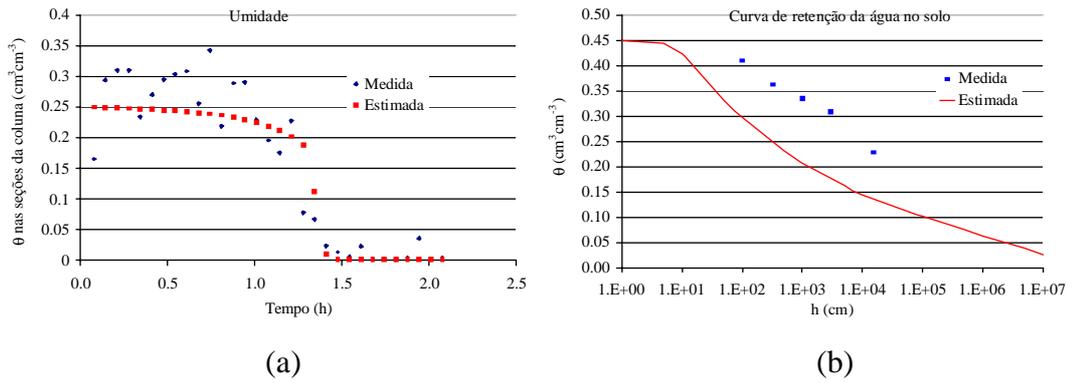


Figura 87 - Amostra PD3. Perfil de umidade durante infiltração (a) e curva de retenção da água no solo (b).

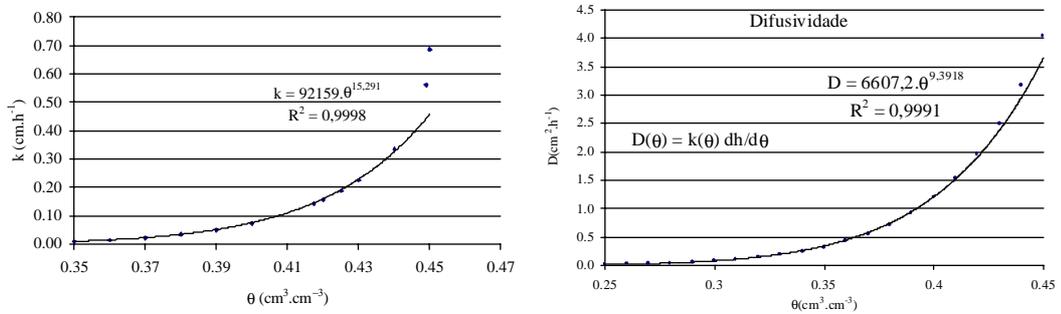
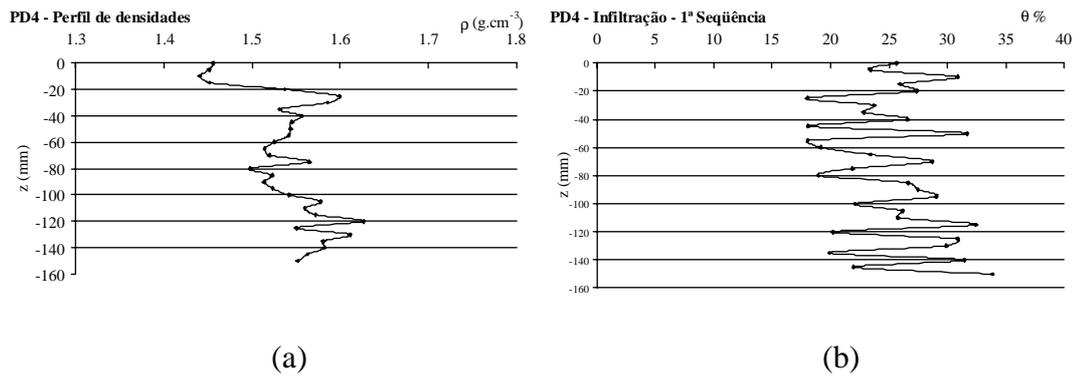


Figura 88 - Condutividade hidráulica e difusividade em função da umidade do solo. Amostra PD3.



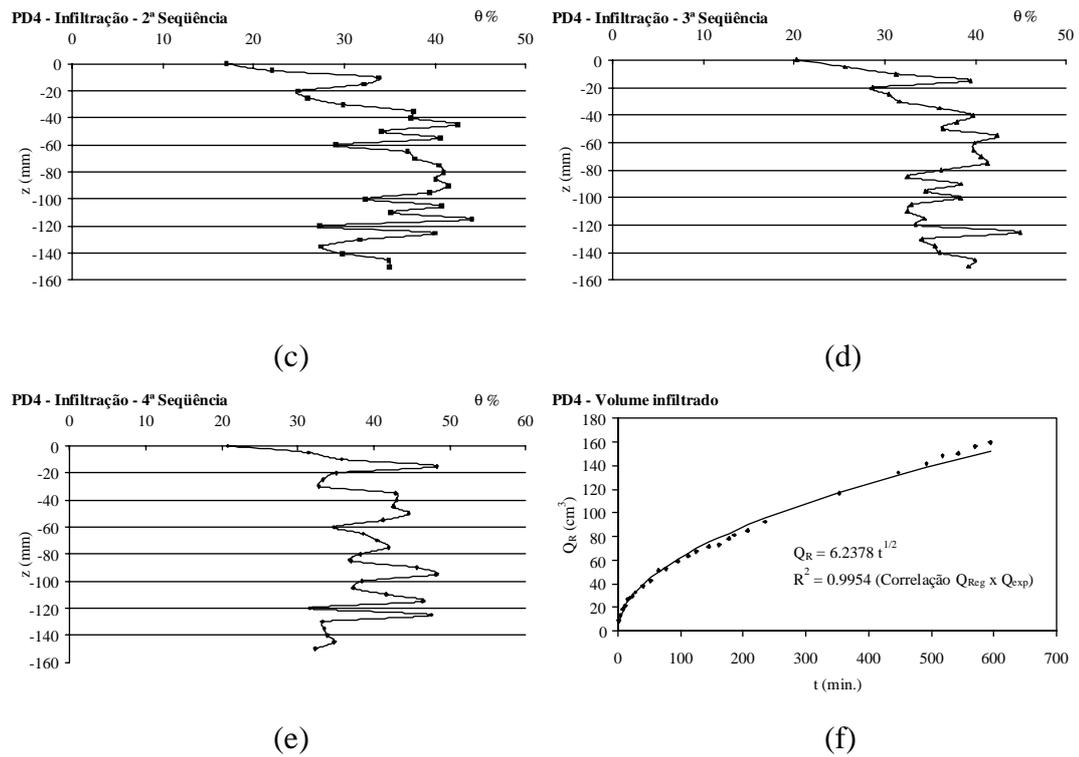


Figura 89 - Gráficos do perfil de densidades do solo seco, da umidade durante a infiltração e do volume infiltrado para a medida em laboratório da amostra PD4.

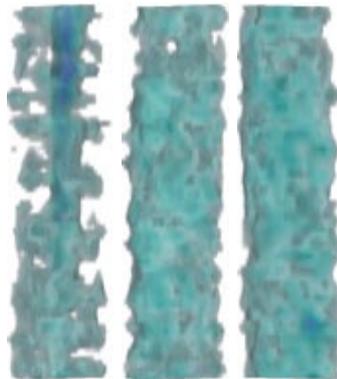


Figura 90 - Reconstrução 3-D de 3 seqüências de varreduras obtidas durante a infiltração da água na amostra PD4.

Tabela 28 - Parâmetros de entrada e saída do programa (algoritmo Marquardt) e parâmetros do modelo Rossi & Nimmo (1994). Amostra PD4. θ em $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ e h em cm.

Entrada		Saída – Marquardt			Rossi & Nimmo					
θ_s	h_D	h_0	λ	K_s	h_I	h_J	C	α	$\theta(h_I)$	$\theta(h_J)$
0,45	$5 \cdot 10^{-7}$	16	0,107	0,469	26,04	4366,60	0,0192	0,05871	0,427	0,0587

Tabela 29 - Amostra PD4. Correlação da curva de infiltração estimada com os valores medidos e equações de ajuste de I e q com os respectivos R^2 e RMSE.

Infiltração	R^2	I (cm)	R^2	RMSE	q ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$)
Medida	0,9993	$3,85 \cdot t^{0,5}$	1	0,00520	$1,925 \cdot t^{-0,5}$
Calculada		$2,36 \cdot t^{0,5}$	0,9993	0,05832	$1,18 \cdot t^{-0,5}$

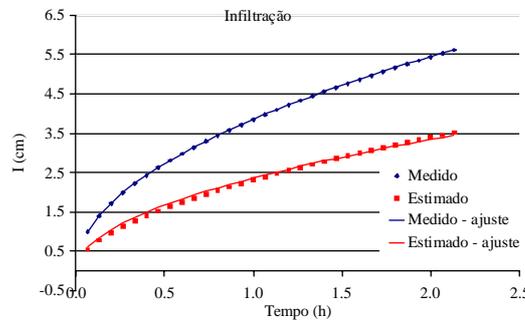


Figura 91 - Curvas de infiltração, medida e estimada, da amostra PD4.

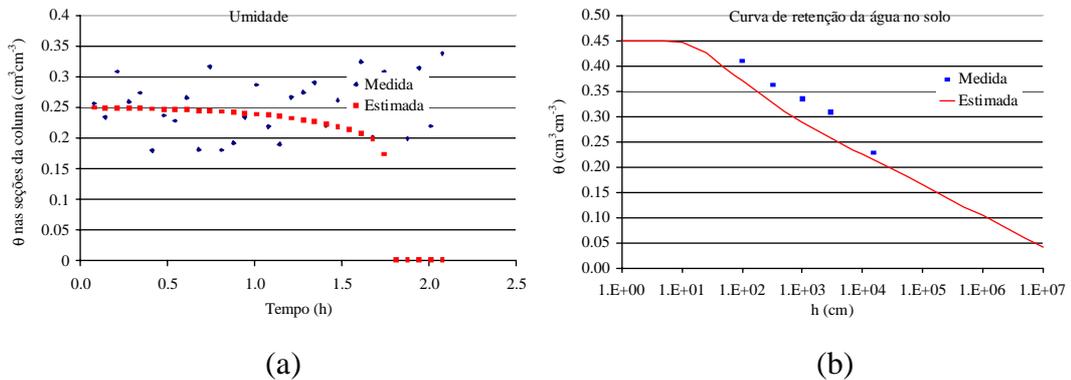


Figura 92 - Amostra PD4. Perfil de umidade durante infiltração (a) e curva de retenção da água no solo (b).

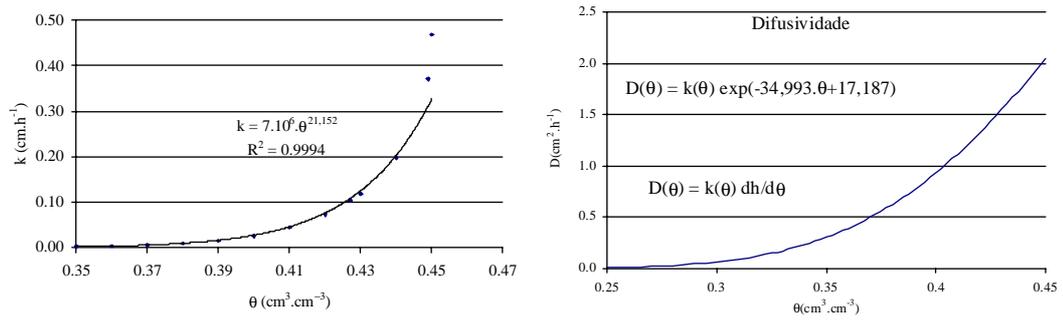
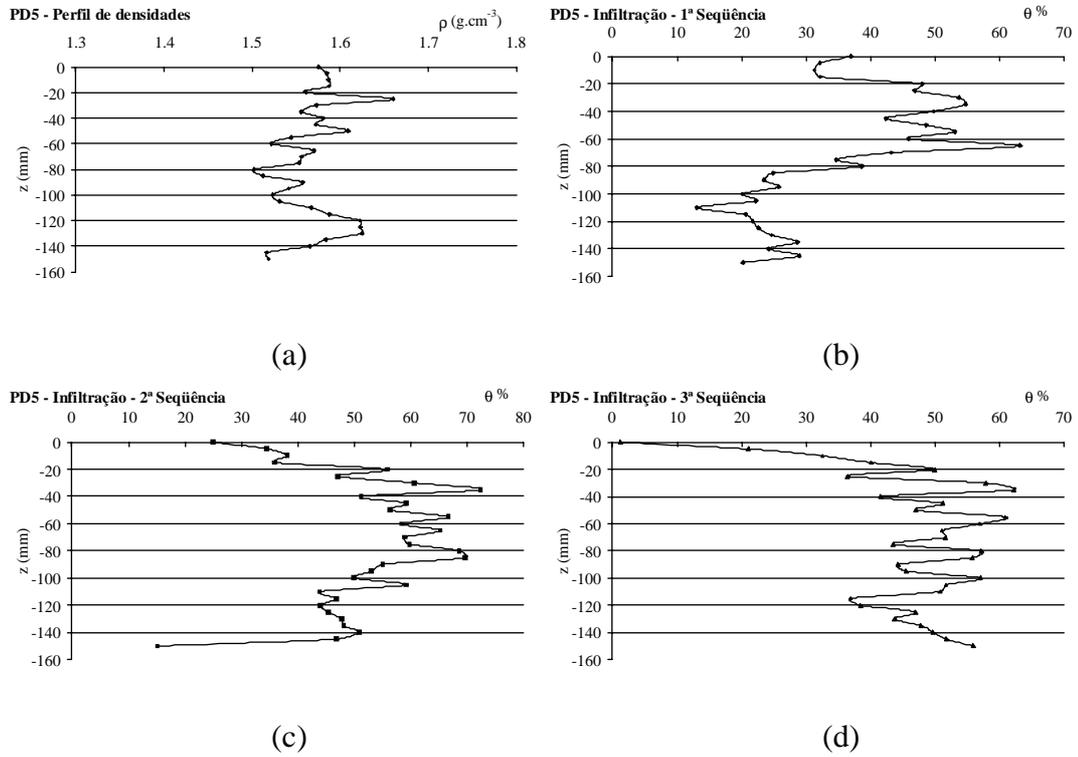


Figura 93 - Condutividade hidráulica e difusividade em função da umidade do solo. Amostra PD4.



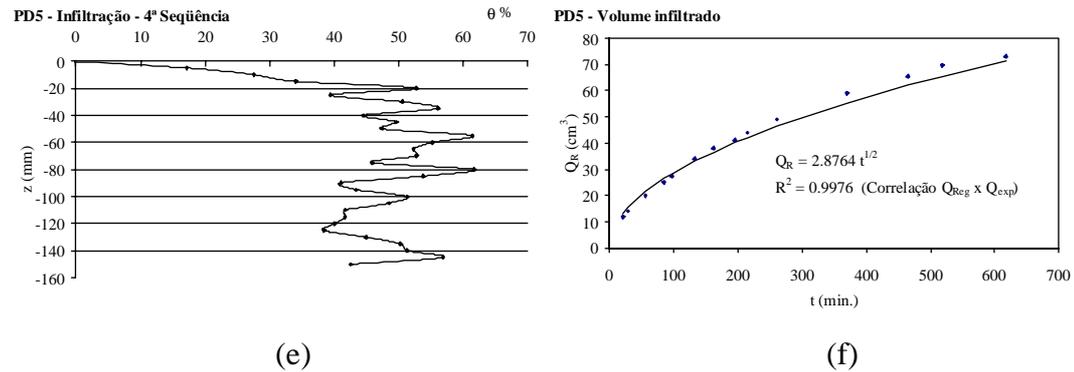


Figura 94 - Gráficos do perfil de densidades do solo seco, da umidade durante a infiltração e do volume infiltrado para a medida em laboratório da amostra PD5.



Figura 95 - Reconstrução 3-D de 3 seqüências de varreduras obtidas durante a infiltração da água na amostra PD5.

Tabela 30 - Parâmetros de entrada e saída do programa (algoritmo Marquardt) e parâmetros do modelo Rossi & Nimmo (1994). Amostra PD5. θ em $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ e h em cm.

Entrada		Saída – Marquardt			Rossi & Nimmo					
θ_s	h_D	h_0	λ	K_s	h_I	h_J	C	α	$\theta(h_I)$	$\theta(h_J)$
0,45	$5 \cdot 10^7$	19,4	0,107	0,457	31,57	4366,60	0,0192	0,05994	0,4271	0,2521

Tabela 31 - Amostra PD5. Correlação da curva de infiltração estimada com os valores medidos e equações de ajuste de I e q com os respectivos R^2 e RMSE.

Infiltração	R^2	I (cm)	R^2	RMSE	q ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$)
Medida	0,9982	$1,77 \cdot t^{0,5}$	1	0,00313	$0,885 \cdot t^{0,5}$
Calculada		$2,45 \cdot t^{0,5}$	0,9982	0,10632	$1,225 \cdot t^{0,5}$

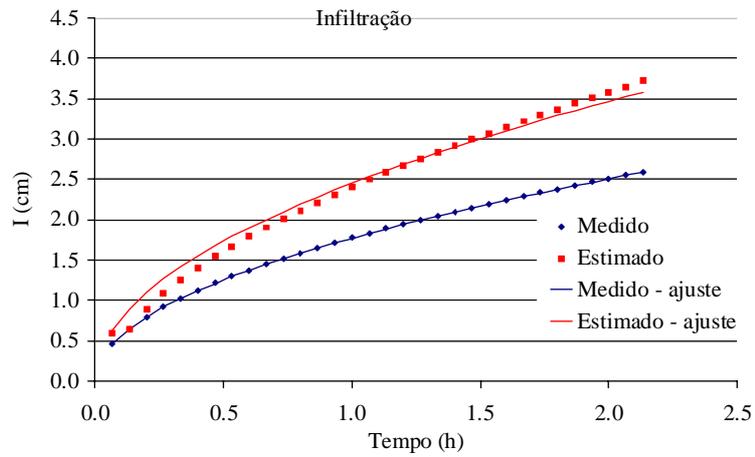


Figura 96 - Curvas de infiltração, medida e estimada, da amostra PD5.

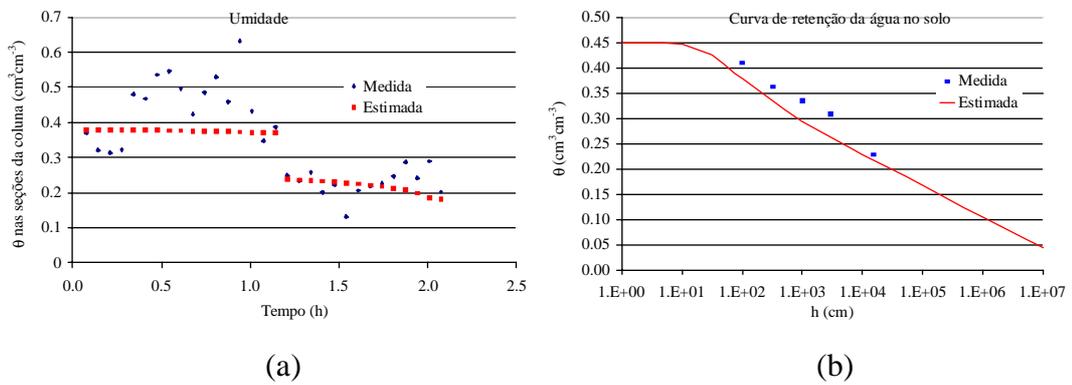


Figura 97 - Amostra PD5. Perfil de umidade durante infiltração (a) e curva de retenção da água no solo (b).

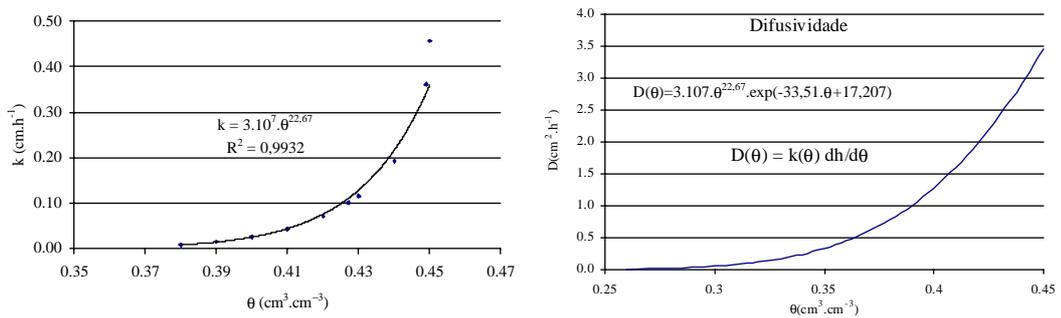


Figura 98 - Condutividade hidráulica e difusividade em função da umidade do solo. Amostra PD5.

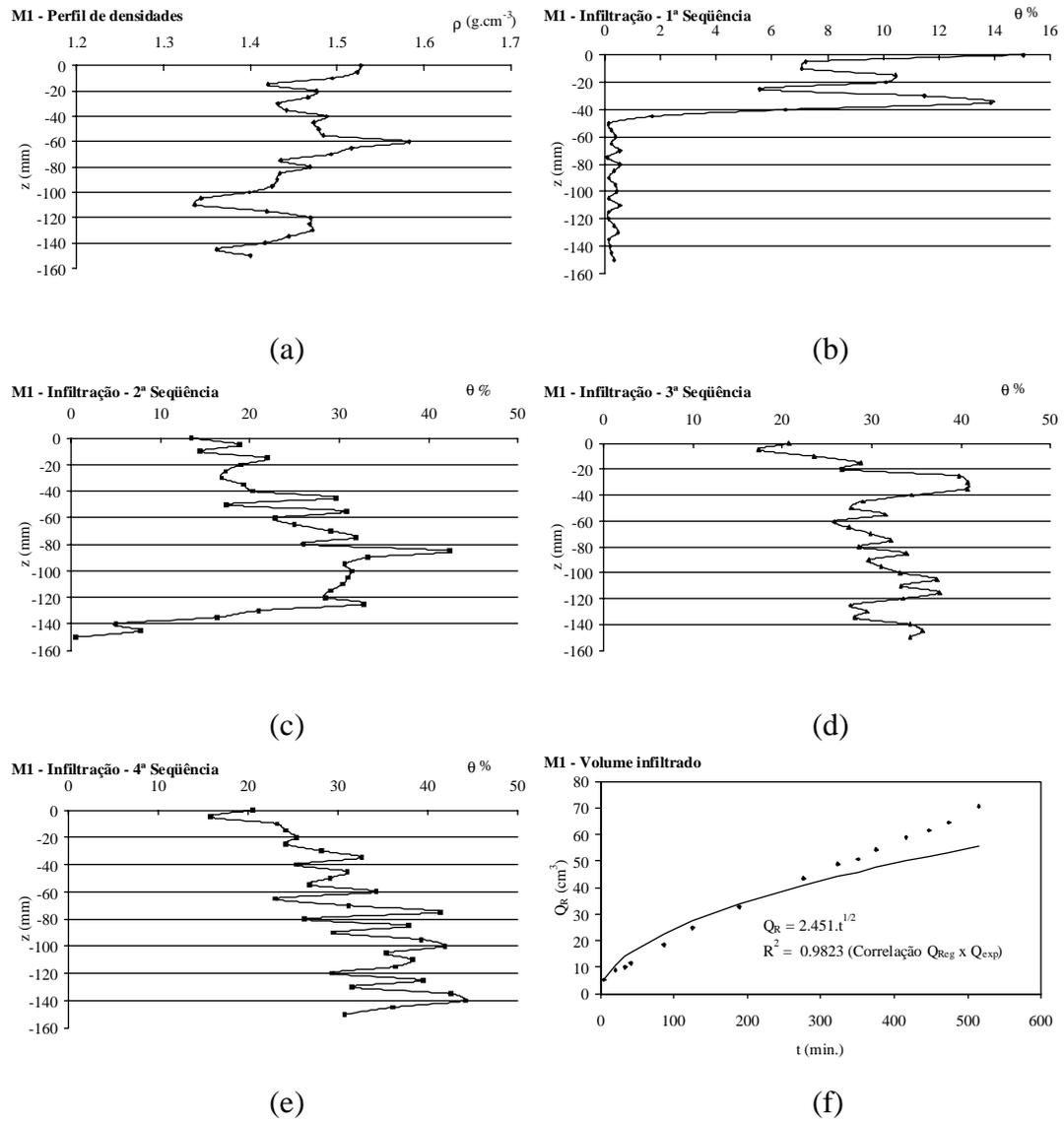


Figura 99 - Gráficos do perfil de densidades do solo seco, da umidade durante a infiltração e do volume infiltrado para a medida em laboratório da amostra M1.

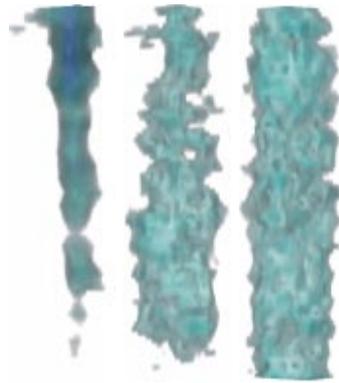
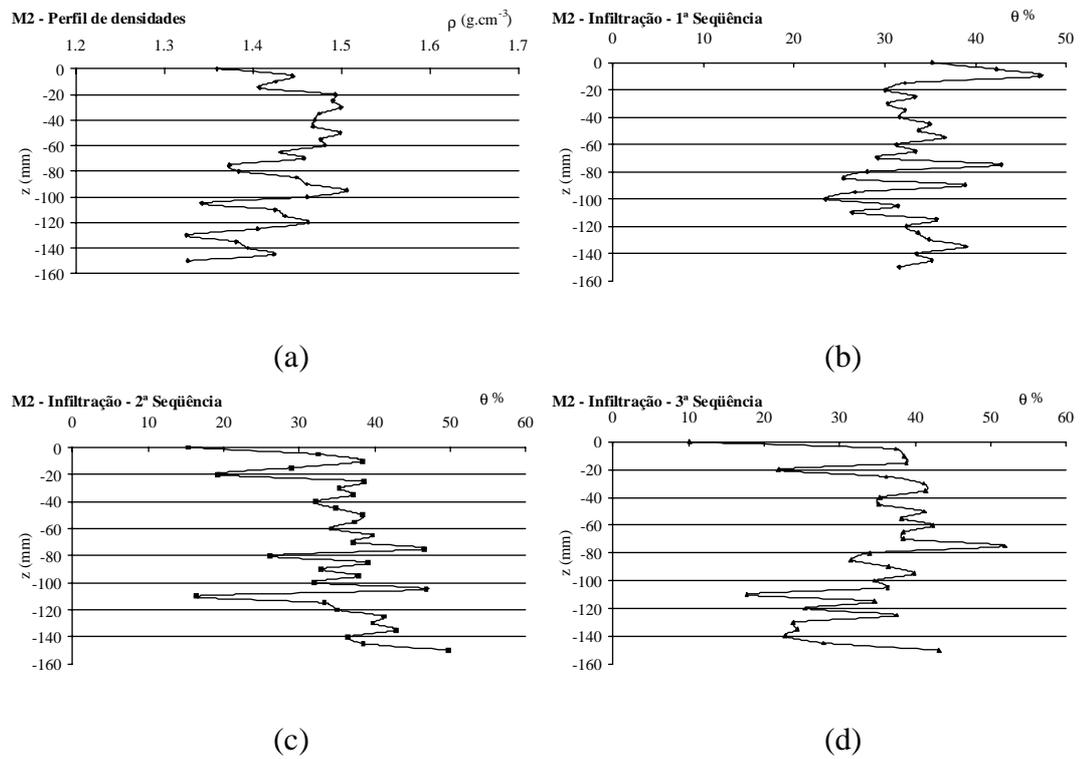


Figura 100 - Reconstrução 3-D de 3 seqüências de varreduras obtidas durante a infiltração da água na amostra M1.



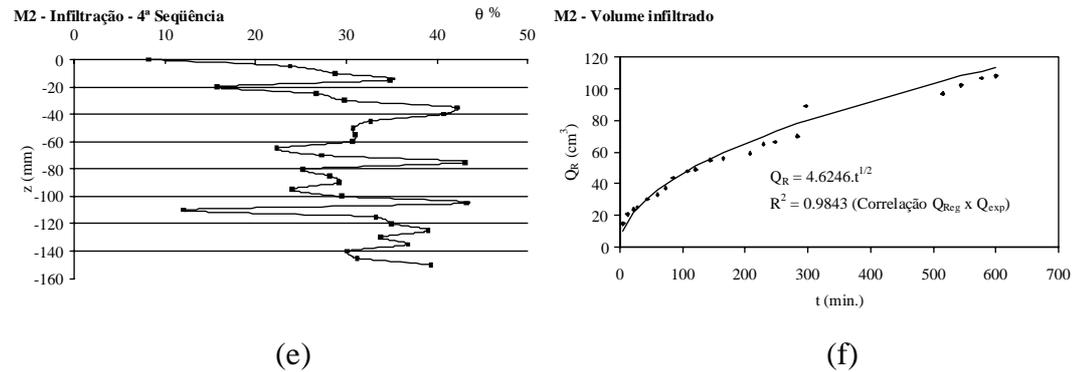


Figura 101 - Gráficos do perfil de densidades do solo seco, da umidade durante a infiltração e do volume infiltrado para a medida em laboratório da amostra M2.

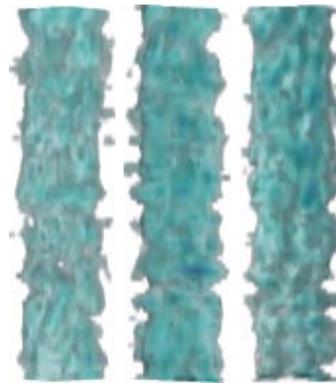


Figura 102 - Reconstrução 3-D de 3 seqüências de varreduras obtidas durante a infiltração da água na amostra M2.

Tabela 32 - Parâmetros de entrada e saída do programa (algoritmo Marquardt) e parâmetros do modelo Rossi & Nimmo (1994). Amostra M2. θ em $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ e h em cm.

Entrada		Saída – Marquardt			Rossi & Nimmo					
θ_s	h_D	h_0	λ	K_s	h_I	h_J	C	α	$\theta(h_I)$	$\theta(h_J)$
0,45	$5 \cdot 10^7$	16,1	0,177	0,387	25,99	175925	0,0312	0,03413	0,4134	0,0868

Tabela 33 - Amostra M2. Correlação da curva de infiltração estimada com os valores medidos e equações de ajuste de I e q com os respectivos R^2 e RMSE.

Infiltração	R^2	I (cm)	R^2	RMSE	q ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$)
Medida	0,994	$2,19 \cdot t^{0,5}$	1	0,00130	$1,095 \cdot t^{0,5}$
Calculada		$2,07 \cdot t^{0,5}$	0,9994	0,04665	$1,035 \cdot t^{0,5}$

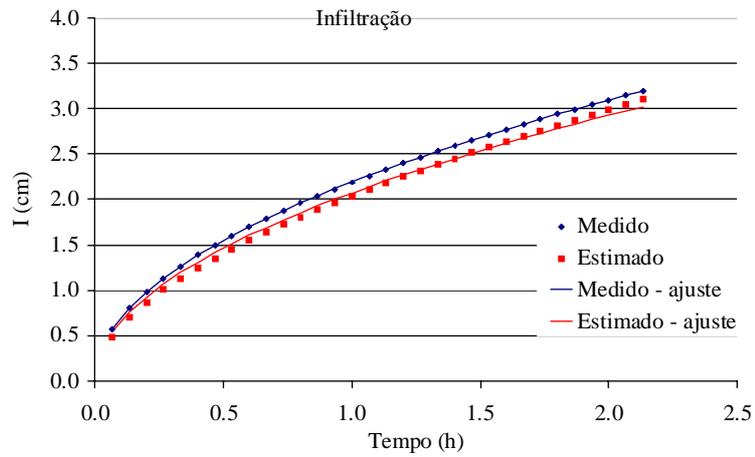


Figura 103 - Curvas de infiltração, medida e estimada, da amostra M2.

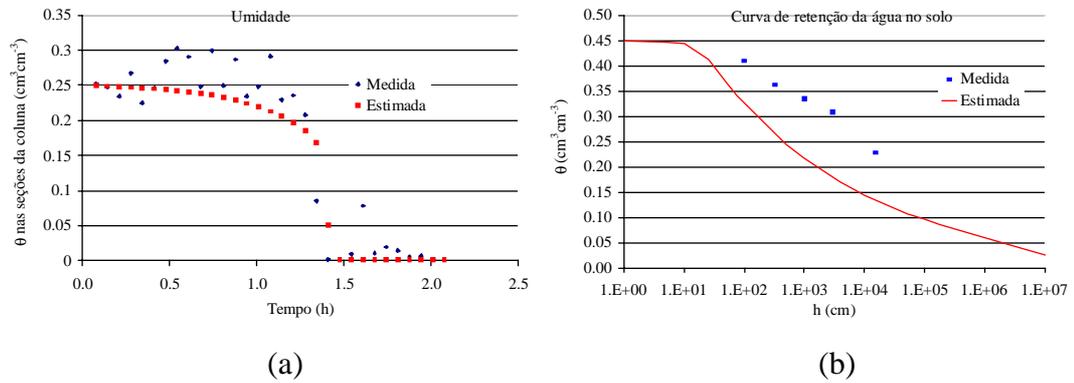


Figura 104 - Amostra M2. Perfil de umidade durante infiltração (a) e curva de retenção da água no solo (b).

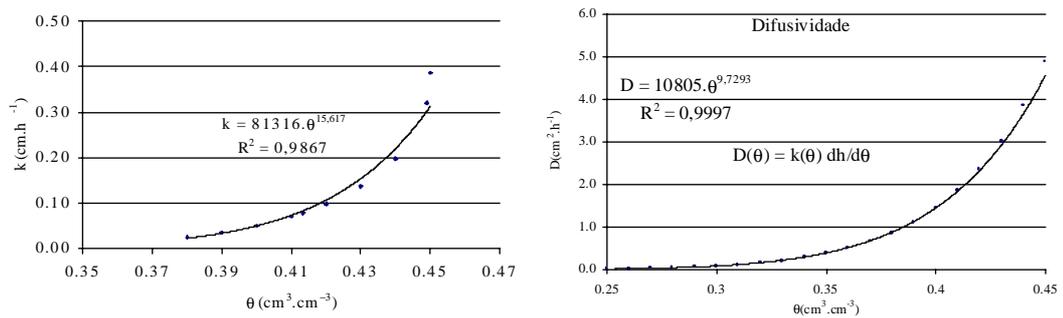


Figura 105 - Condutividade hidráulica e difusividade em função da umidade do solo. Amostra M2.

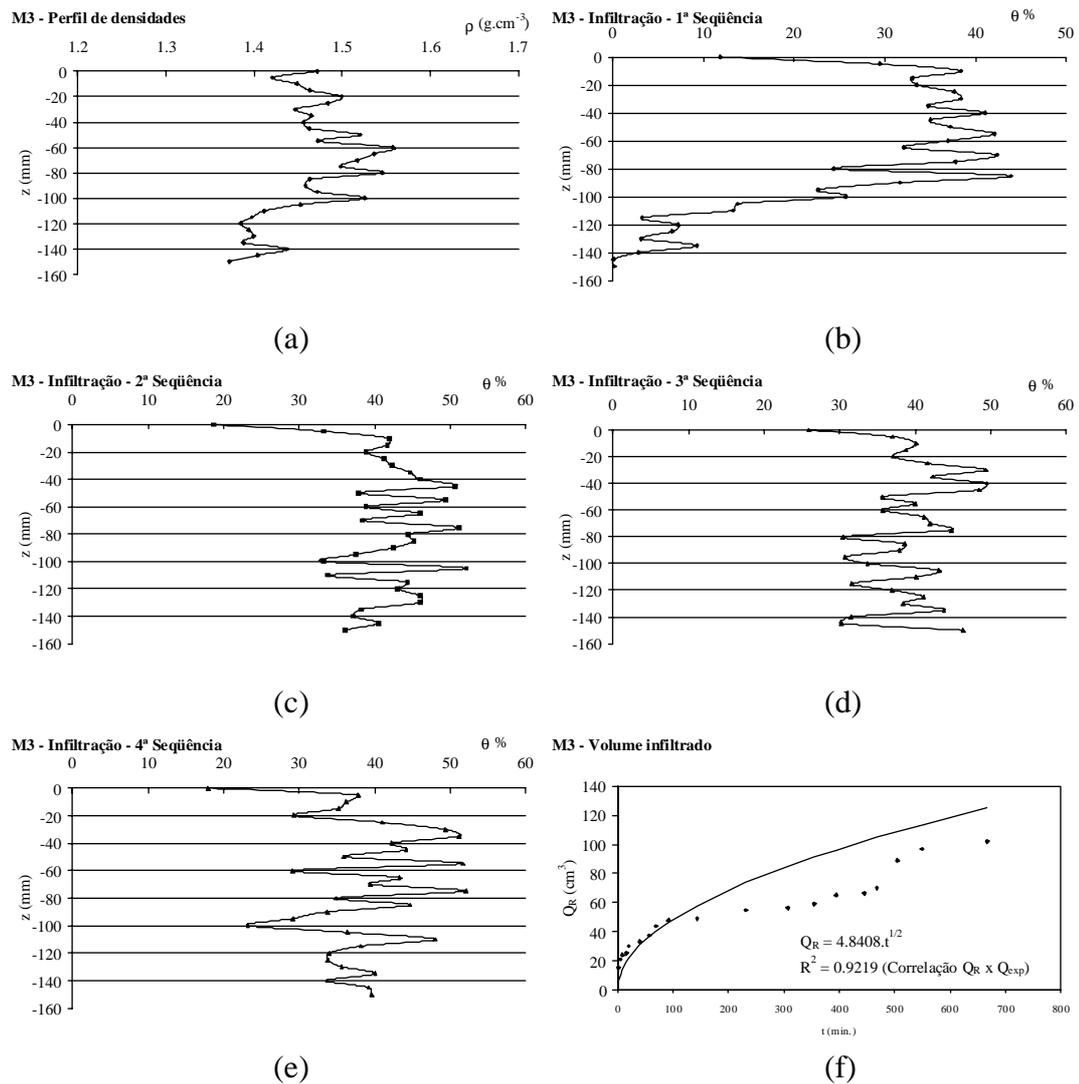


Figura 106 - Gráficos do perfil de densidades do solo seco, da umidade durante a infiltração e do volume infiltrado para a medida em laboratório da amostra M3.

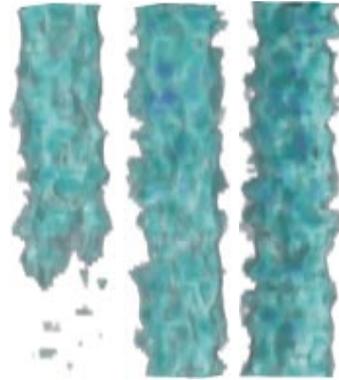


Figura 107 - Reconstrução 3-D de 3 seqüências de varreduras obtidas durante a infiltração da água na amostra M3.

Tabela 34 - Parâmetros de entrada e saída do programa (algoritmo Marquardt) e parâmetros do modelo Rossi & Nimmo (1994). Amostra M3. θ em $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ e h em cm.

Entrada		Saída – Marquardt			Rossi & Nimmo					
θ_s	h_D	h_0	λ	K_s	h_f	h_f	C	α	$\theta(h_f)$	$\theta(h_f)$
0,45	$5 \cdot 10^7$	17,2	0,1030	0,6030	28,01	3037,52	0,0185	0,06045	0,4279	0,2641

Tabela 35 - Amostra M3. Correlação da curva de infiltração estimada com os valores medidos e equações de ajuste de I e q com os respectivos R^2 e RMSE.

Infiltração	R^2	I (cm)	R^2	RMSE	q ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$)
Medida	0,9958	$2,97 \cdot t^{0,5}$	1	0,01461	$1,485 \cdot t^{0,5}$
Calculada		$2,77 \cdot t^{0,5}$	0,9958	0,07436	$1,385 \cdot t^{0,5}$

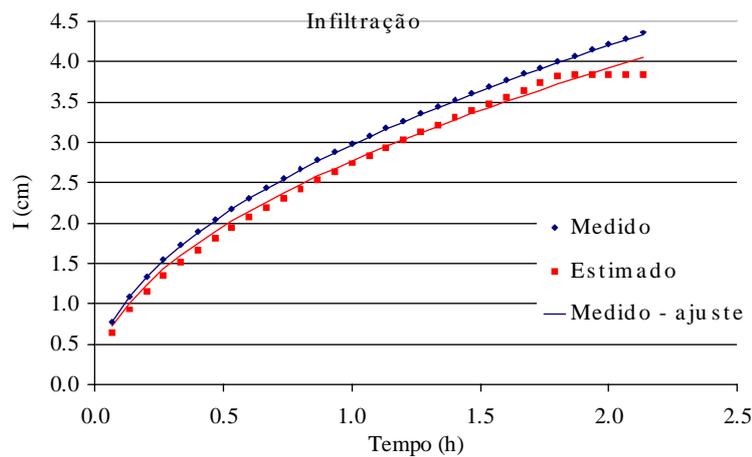
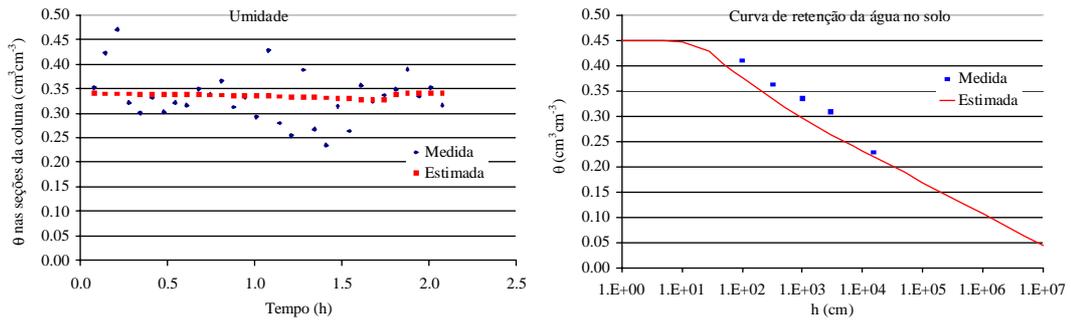


Figura 108 - Curvas de infiltração, medida e estimada, da amostra M3.



(a) (b)
 Figura 109 - Amostra M3. Perfil de umidade durante infiltração (a) e curva de retenção da água no solo (b).

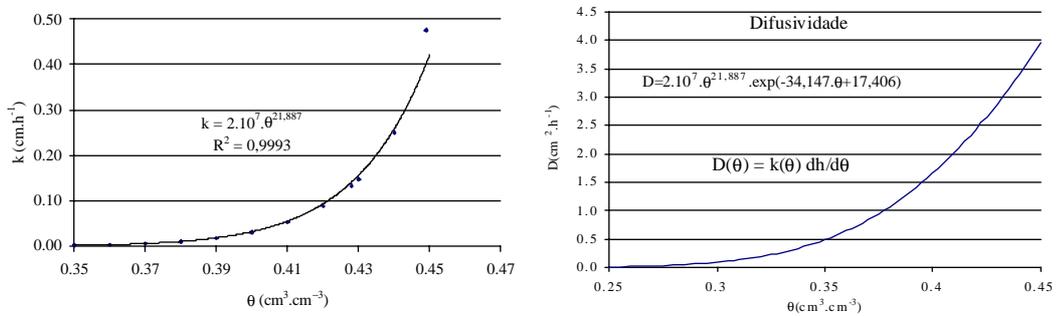
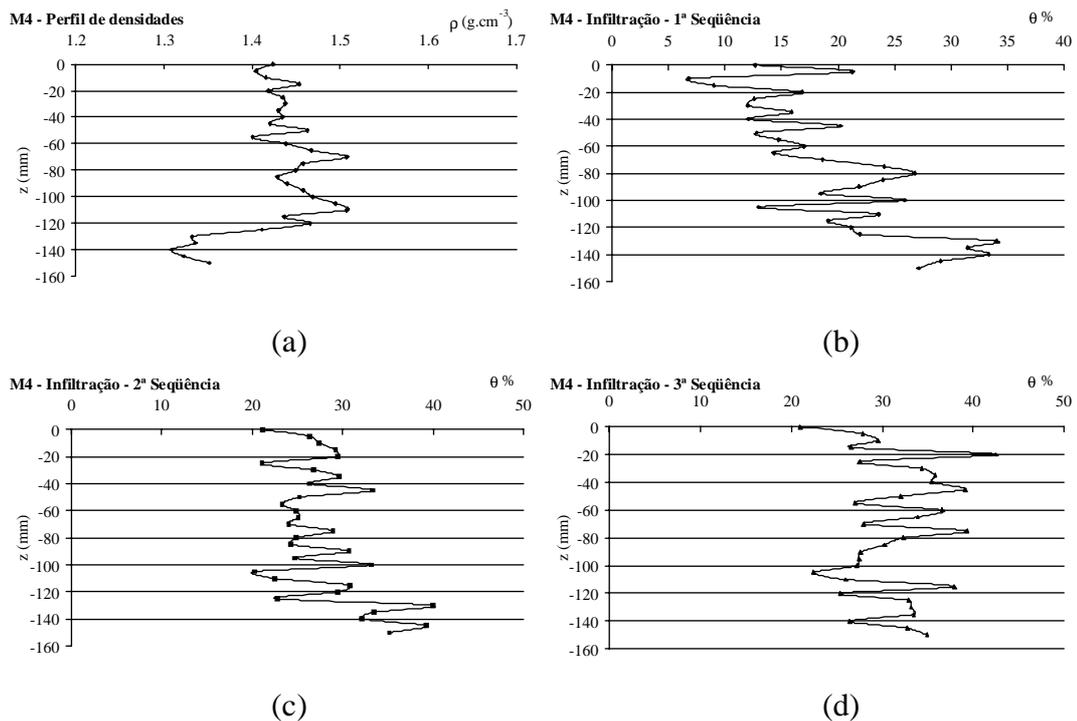
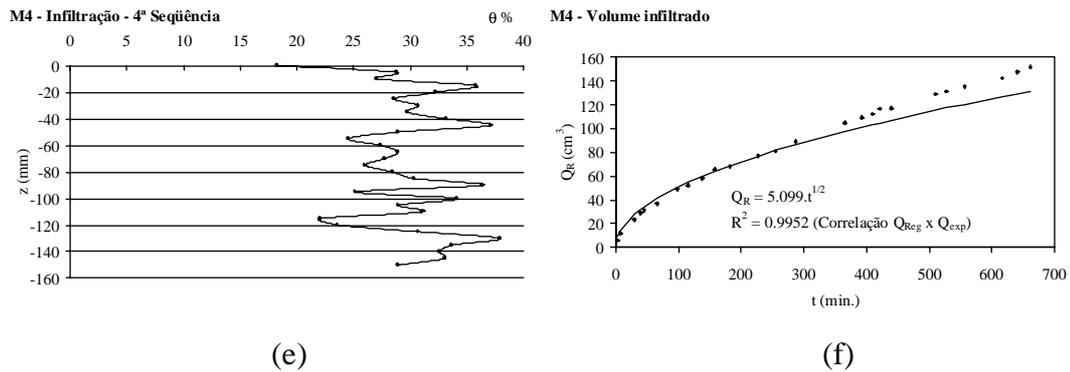


Figura 110 - Condutividade hidráulica e difusividade em função da umidade do solo. Amostra M3.



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



(e) (f)
 Figura 111 - Gráficos do perfil de densidades do solo seco, da umidade durante a infiltração e do volume infiltrado para a medida em laboratório da amostra M4.

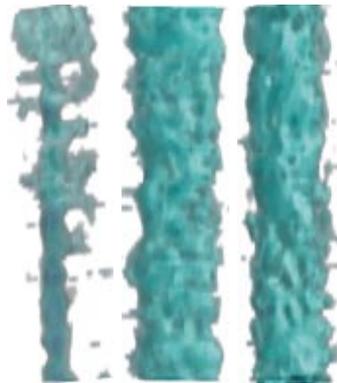


Figura 112 - Reconstrução 3-D de 3 seqüências de varreduras obtidas durante a infiltração da água na amostra M4.

Tabela 36 - Parâmetros de entrada e saída do programa (algoritmo Marquardt) e parâmetros do modelo Rossi & Nimmo (1994). Amostra M4. θ em $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ e h em cm.

Entrada		Saída – Marquardt			Rossi & Nimmo					
θ_s	h_D	h_0	λ	K_s	h_I	h_J	C	α	$\theta(h_I)$	$\theta(h_J)$
0,45	$5 \cdot 10^7$	17,0	0,1060	0,462	27,67	3998,09	0,0190	0,0594	0,4274	0,2523

Tabela 37 - Amostra M4. Correlação da curva de infiltração estimada com os valores medidos e equações de ajuste de I e q com os respectivos R^2 e RMSE.

Infiltração	R^2	I (cm)	R^2	RMSE	q ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$)
Medida	0,9993	$3,10 \cdot t^{0,5}$	1	0,00412	$1,550 \cdot t^{0,5}$
Calculada		$2,41 \cdot t^{0,5}$	0,9993	0,04873	$1,205 \cdot t^{0,5}$

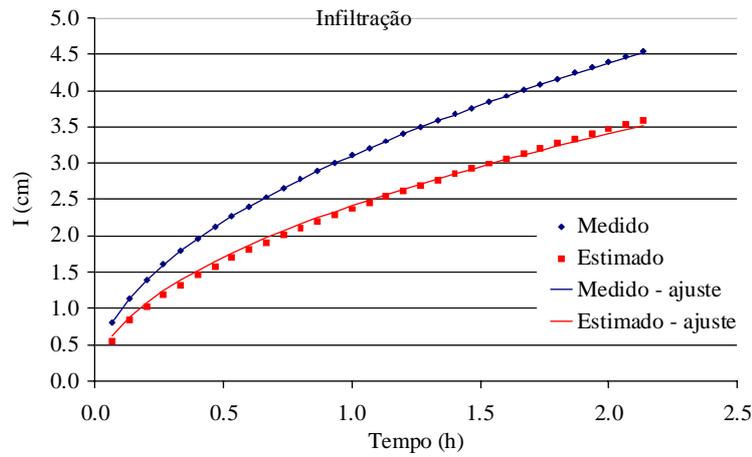


Figura 113 - Curvas de infiltração, medida e estimada, da amostra M4.

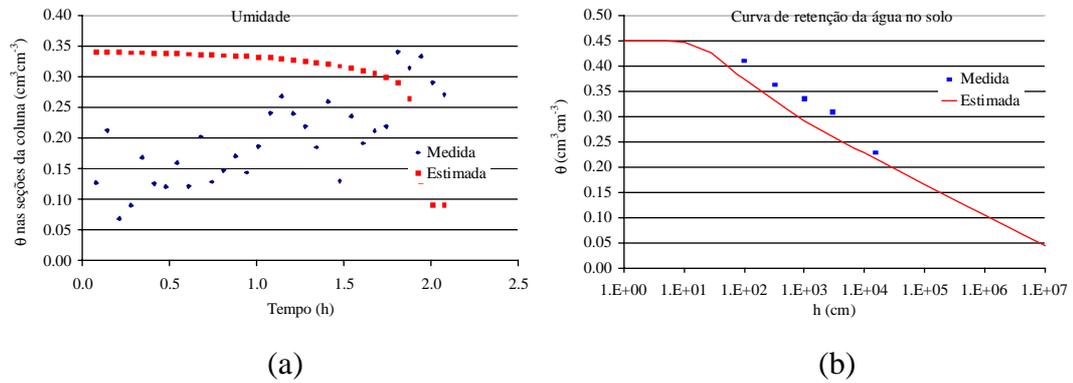


Figura 114 - Amostra M4. Perfil de umidade durante infiltração (a) e curva de retenção da água no solo (b).

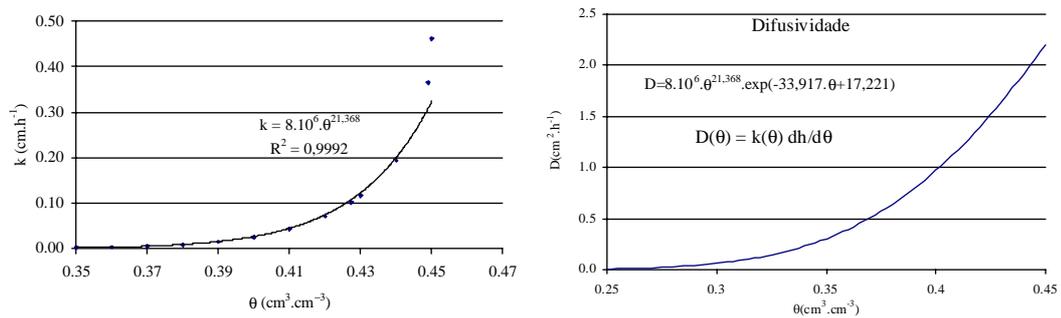


Figura 115 - Condutividade hidráulica e difusividade em função da umidade do solo. Amostra M4.

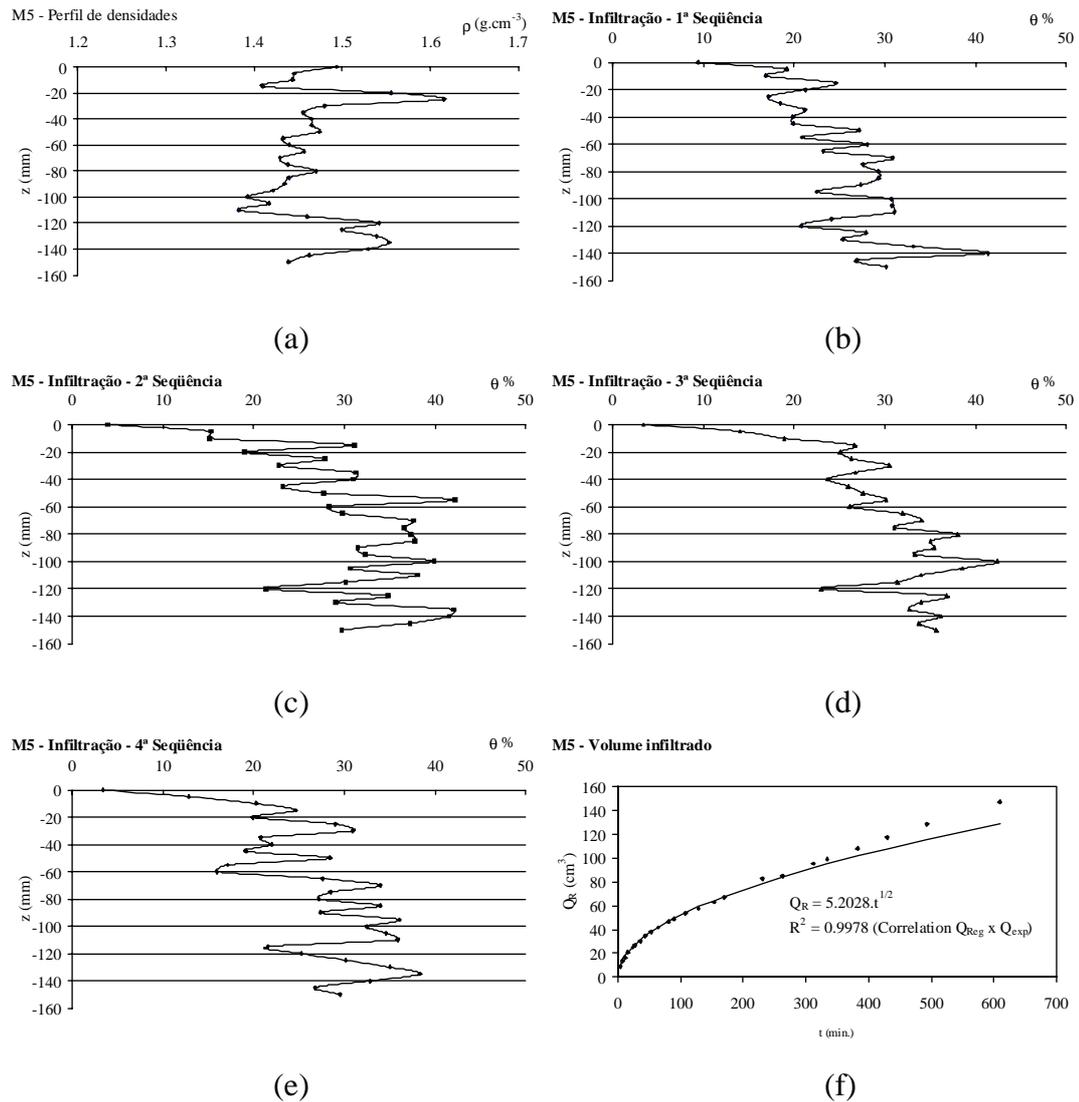


Figura 116 - Gráficos do perfil de densidades do solo seco, da umidade durante a infiltração e do volume infiltrado para a medida em laboratório da amostra M5.

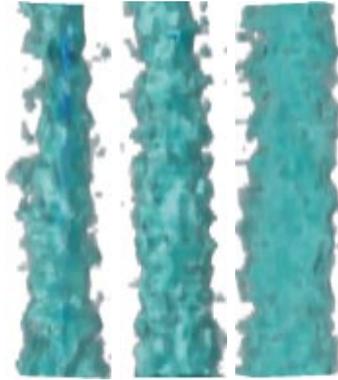


Figura 117 - Reconstrução 3-D de 3 seqüências de varreduras obtidas durante a infiltração da água na amostra M5.

Tabela 38 - Parâmetros de entrada e saída do programa (algoritmo Marquardt) e parâmetros do modelo Rossi & Nimmo (1994). Amostra M5. θ em $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$ e h em cm.

Entrada		Saída – Marquardt			Rossi & Nimmo					
θ_s	h_D	h_0	λ	K_s	h_I	h_J	C	α	$\theta(h_I)$	$\theta(h_J)$
0,45	$5 \cdot 10^7$	16,4	0,1000	0,462	27,71	2269,99	0,0179	0,06108	0,4286	0,2748

Tabela 39 - Amostra M5. Correlação da curva de infiltração estimada com os valores medidos e equações de ajuste de I e q com os respectivos R^2 e RMSE.

Infiltração	R^2	I (cm)	R^2	RMSE	q ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$)
Medida	0,9993	$3,21 \cdot t^{0,5}$	1	0,00342	$1,605 \cdot t^{0,5}$
Calculada		$2,35 \cdot t^{0,5}$	0,9993	0,05553	$1,175 \cdot t^{0,5}$

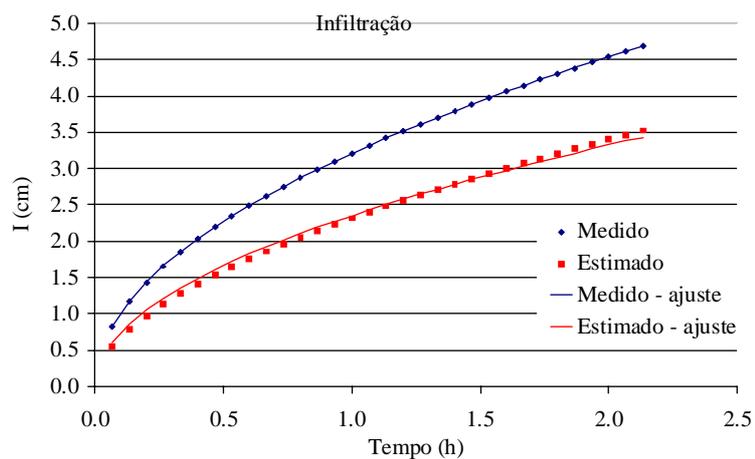


Figura 118 - Curvas de infiltração, medida e estimada, da amostra M5.

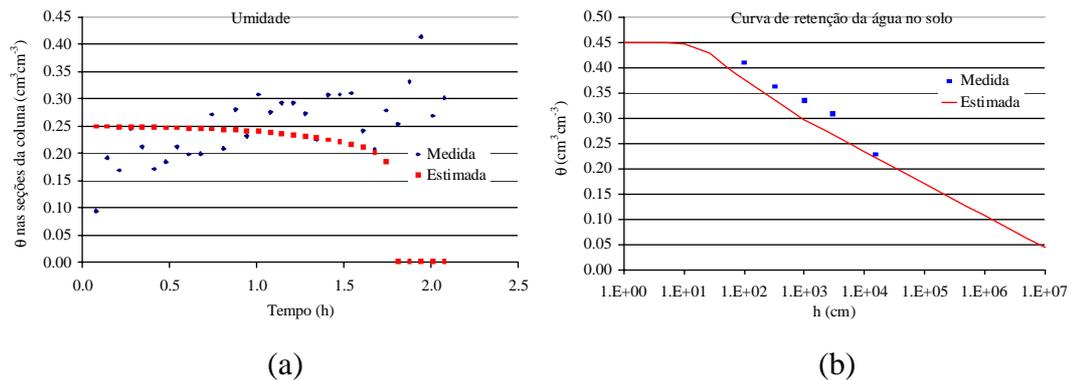


Figura 119 - Amostra M5. Perfil de umidade durante infiltração (a) e curva de retenção da água no solo (b).

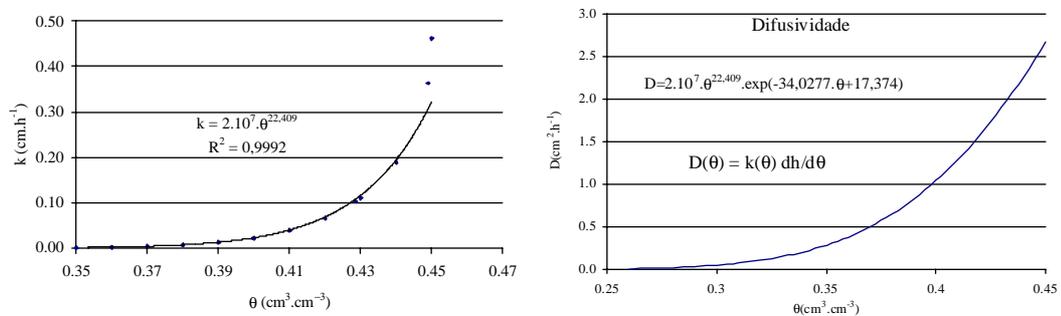


Figura 120 - Condutividade hidráulica e difusividade em função da umidade do solo. Amostra M5.

5.3 Discussão dos resultados e conclusões

Desde o trabalho pioneiro de Crestana (1985a), reconhece-se o potencial da técnica tomográfica para o estudo da física da água no solo de forma qualitativa. A contribuição da metodologia apresentada nesta tese viabiliza a análise quantitativa das medidas tomográficas, tanto em laboratório como em campo, de forma dinâmica. Mostrou-se que além da observação qualitativa das imagens, podem-se determinar a curva de retenção da água no solo e parâmetros como a sortividade, a condutividade hidráulica e a difusividade hidráulica. A solução numérica da equação de Richards e o emprego do modelo de Rossi & Nimmo são eficientes mesmo sendo as medidas de umidade obtidas em diferentes profundidades e em diferentes instantes.

As medidas dos parâmetros da infiltração são tradicionalmente feitas em laboratório com amostras desestruturadas ou em amostras estruturadas, mas sempre

submetidas a instrumentos de medida que causam perturbações e só permitem obter medidas médias da região onde estão inseridos, enquanto a tomografia permite ao investigador a seleção de uma área ou volume de interesse para trabalhar com valores mais representativos de sua medida. Além das medidas de infiltração, o tomógrafo deste trabalho é uma ferramenta eficaz, aliado às técnicas de reconstrução tridimensional, para o estudo de compactação de solos submetidos a diversos tipos de manejo, uma vez que é possível obter a distribuição detalhada da densidade nas três dimensões.

O tomógrafo construído neste trabalho mostrou-se viável para a medida de umidade e infiltração em solos de textura argilosa ou de baixa condutividade hidráulica, isto porque o tempo de varredura é limitado em 4 minutos. No caso de solos arenosos ou de maior condutividade hidráulica, não é possível fazer estudo com este equipamento. Tecnicamente, é plenamente possível construir um equipamento capaz de realizar tomografias em tempos abaixo de 30 segundos. Existem, disponíveis no mercado, detectores e fontes que possibilitam considerável redução do tempo de aquisição mas seu custo é da ordem de 70 vezes o daqueles utilizados neste trabalho. Portanto, a limitação está apenas no custo do equipamento que desejamos construir, que para o tomógrafo aqui desenvolvido foi de 15 mil dólares em componentes.

A resolução espacial do tomógrafo é de 6mm porque, apesar dos fotodiodos medirem 0,4mm de largura, o feixe de radiação parte de uma fonte com 15mm de diâmetro. Isto faz com que fótons que partem de diferentes posições da fonte sejam atenuados por um mesmo ponto da amostra. Desse modo, a projeção deste ponto torna-se “borrada” sobre o arranjo de detectores. Em outras palavras, em uma dada projeção, um maior número de detectores é sensibilizado, a retroprojeção produzirá um ponto maior do que é na realidade e sua forma será indefinida. Se no tomógrafo fosse utilizada uma fonte puntual, tal como um aparelho de raios X microfoco (Lopes, 1997), sua resolução espacial do equipamento seria de até 0,4mm, o que permitiria a caracterização detalhada de macroporos como o trabalho de Perret et al. (2000).

Apesar das restrições do atual equipamento, demonstrou-se, de forma inédita, o potencial da metodologia desenvolvida com o auxílio da tomografia para o estudo da infiltração da água na região não saturada do solo em laboratório e em campo.

5.4 Trabalhos futuros

A utilização da técnica de reconstrução 3-D por modelo de malhas, a partir de imagens tomográficas segmentadas, permite o corte de fatias longitudinais do volume da imagem reconstruída. Isto permite visualizar a frente de molhamento em diversos planos ao longo da amostra, a partir dos dados obtidos com o tomógrafo desta tese.

Uma grande oportunidade de aplicação da técnica tomográfica de 3ª geração em campo é o estudo do comportamento de plantas sob diferentes condições de estresse hídrico. No estudo de seringueiras, pode-se acompanhar o fluxo do látex dentro da árvore, durante a sangria.

Nos últimos 4 anos, tem ocorrido uma rápida e significativa evolução tecnológica dos sistemas de detecção baseados no acoplamento de cintiladores de alta eficiência (CsI), com arranjos bidimensionais de fotodiodos (CCD). Além da redução do preço, mais de 50% nos dois últimos anos, a dimensão destes detectores têm aumentado consideravelmente. Hoje, encontram-se painéis de detecção de radiação que medem $120 \times 120 \text{mm}^2$ capazes de capturar até 30 projeções por segundo com resolução de $50 \mu\text{m}$ a um custo de 3000 dólares. Este fato oferece uma excelente oportunidade para construir um tomógrafo que opere com feixe em forma de cone. Assim, podem-se obter imagens tridimensionais varrendo-se todos os planos de uma única vez. Esta característica amplia de forma fantástica a viabilidade da técnica tomográfica para trabalhar com todos tipos de solos. Como o acompanhamento da frente de molhamento é em tempo real, a simplificação do modelo para determinação dos parâmetros de infiltração é uma consequência direta.

A resolução micrométrica dos novos detectores oferece a oportunidade de estudo da porosidade do solo em várias escalas diretamente no campo. Além deste novo detector, tal equipamento requer o emprego de um equipamento de raio X microfoco. Atualmente, estão no mercado equipamentos com foco de $5 \mu\text{m}$ custando

em torno de 30.000 dólares. Este custo ainda é um sério limitante para a viabilidade deste equipamento.

ANEXO A

O tensiômetro (Reichardt, 1996) é constituído de uma cápsula porosa cheia de água conectada a um manômetro de mercúrio (Figura 121) ou a um transdutor de pressão. Antes da cápsula ser introduzida no solo, a água em seu interior está sob pressão atmosférica. A partir do momento em que a cápsula entra em contato com o solo não saturado, cuja pressão da água é sub-atmosférica, a água da cápsula é sugada através dos poros. A cápsula é permeável a água e sais mas não para o ar e os colóides do solo. Desse modo, o potencial osmótico da solução de solo não tem efeito sobre a medida.

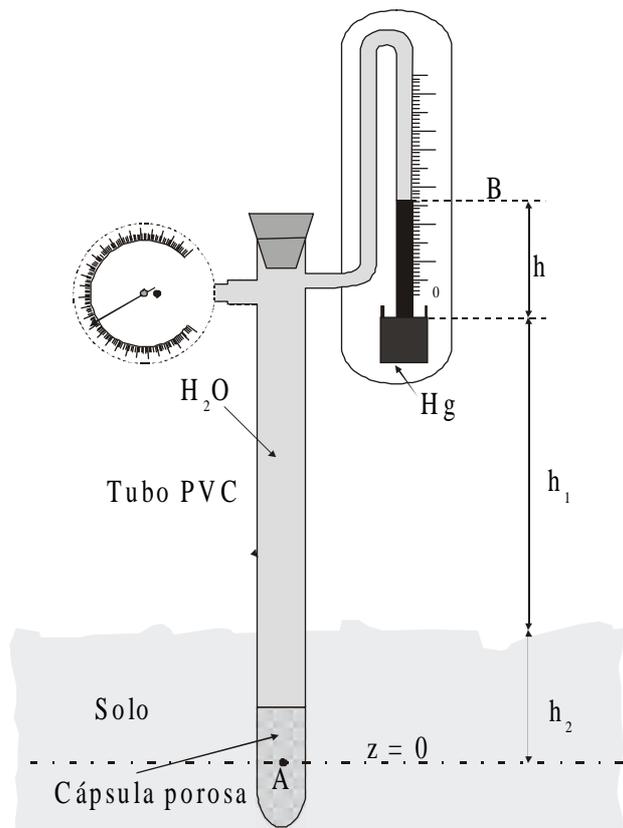


Figura 121 - Esquema de um tensiômetro acoplado a um manômetro de mercúrio ou a um vacuômetro.

O fluxo de água da cápsula para o solo provoca queda de pressão dentro do tensiômetro. No equilíbrio, o fluxo cessa, então o potencial da água dentro instrumento é igual ao potencial da água no solo. Para o manômetro de mercúrio, a pressão indicada ($-h$ cm de Hg), corresponde ao potencial no ponto B. Para calcular no potencial no ponto A é preciso descontar a carga positiva da coluna de água entre A e B. O potencial matricial no ponto A, em unidade de carga hidráulica, é dado por:

$$\psi_m(A) = -13,5.h + h + h_1 + h_2 = -12,5.h + h_1 + h_2$$

onde: h = leitura em cm de Hg;

h_1 = altura do manômetro em relação à superfície do solo e

h_2 = profundidade da cápsula porosa em relação à superfície do solo.

A densidade do mercúrio é igual a $13,456 \text{ g.cm}^{-3}$ a 20°C . A unidade de pressão comumente utilizada é o Pascal¹³.

O tensiômetro é limitado na faixa de valores que ele pode medir. O medidor de pressão indica o vácuo parcial em relação à pressão atmosférica. Portanto, a maior leitura teoricamente possível é aquela equivalente à uma atmosfera. Na prática, o limite está em torno de 80% deste valor.

¹³ $1 \text{ atm} = 75 \text{ cm Hg} = 1.033 \text{ cm H}_2\text{O} = 101.325 \text{ Pa}$ ou $1 \text{ cm H}_2\text{O} = 98,088 \text{ Pa}$

ANEXO B

Na varredura de 1ª geração (feixes paralelos), é necessário medir as projeções num intervalo de 180°, porque apesar de as funções projeções $P_\theta(t)$ terem período 2π , elas são simétricas em $\pi \Rightarrow P_\theta(t) = P_{\theta+\pi}(-t)$ (Figura 122).

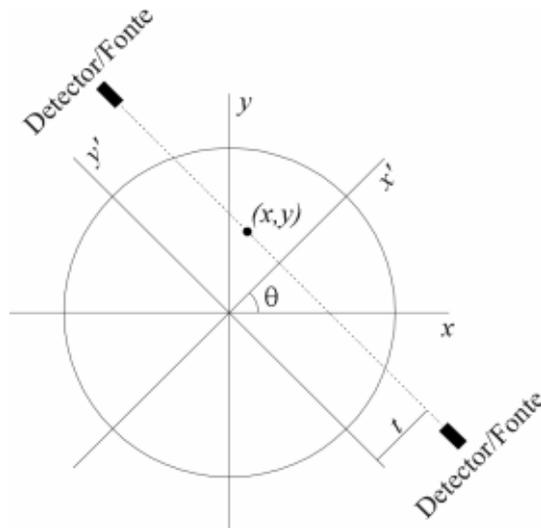


Figura 122 - Feixes paralelos: o raio-soma que passa pelo ponto (x,y) medido no ângulo θ é igual àquele medido no ângulo $\theta+\pi$, medidos na posição $|t|$.

Na varredura de 3ª geração (feixe em leque), é necessário medir as projeções em 360°, porque as funções projeções $R_\beta(s)$ têm período 2π e não apresentam simetria (Figura 123).

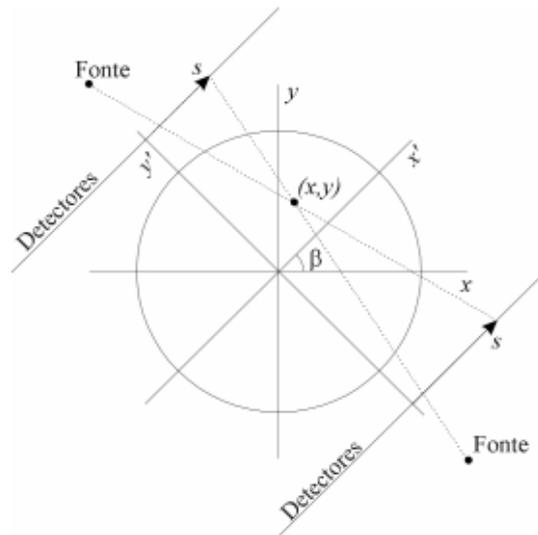


Figura 123 - Feixe em leque: nas posições angulares β e $\beta+\pi$ os raios-soma medidos têm caminhos diferentes e são obtidos por detectores em posições (s) diferentes.

ANEXO C

O teorema de Nyquist determina que a frequência de amostragem de um sinal periódico qualquer deve ser pelo menos 2 vezes maior que a maior frequência presente no sinal amostrado. No domínio do tempo, ou do espaço, o fenômeno *aliasing* pode ser ilustrado através do gráfico da Figura 124. Neste exemplo, o intervalo de amostragem a corresponde à 1/9 da frequência do sinal original, o sinal obtido na saída do conversor é uma falsa representação do sinal de entrada.

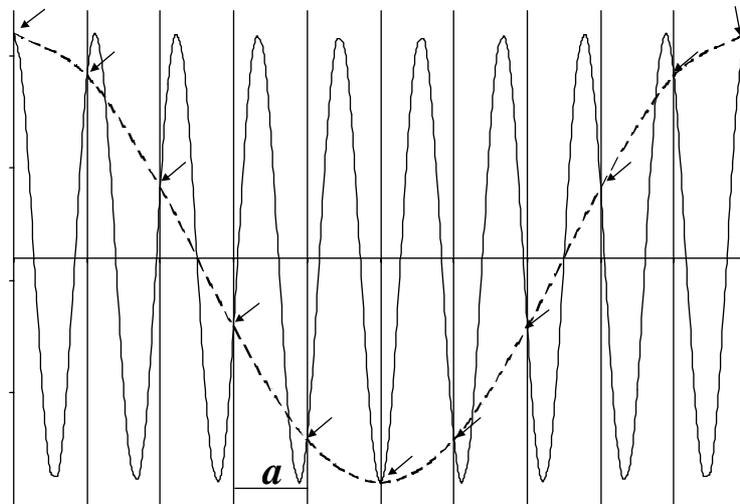


Figura 124 - *Aliasing* devido à baixa frequência de amostragem. A linha cheia representa o sinal de entrada e a linha tracejada representa o sinal obtido na conversão com intervalo de amostragem a .

Portanto, na ocorrência de *aliasing* temos uma conversão falsa. Em imagens, este efeito produz bordas recortadas ou efeito estrela e em sinais de áudio provoca zumbido.

ANEXO D

Fotodiodo é um dispositivo eletrônico de estado sólido fotossensível. Constitui-se de uma junção P-N recoberta por material transparente. Se iluminarmos uma junção P-N reversamente polarizada, a corrente varia quase linearmente com o fluxo luminoso. A tensão reversa, além de poucos décimos de volt, aplicada sobre a junção gera uma corrente quase constante (independente da magnitude da polarização reversa). Se um feixe de luz incide sobre a superfície, novos pares elétron-lacuna são gerados e portanto aumenta, proporcionalmente, a corrente resultante. O desenho da seção transversal do fotodiodo é mostrado na Figura 125.

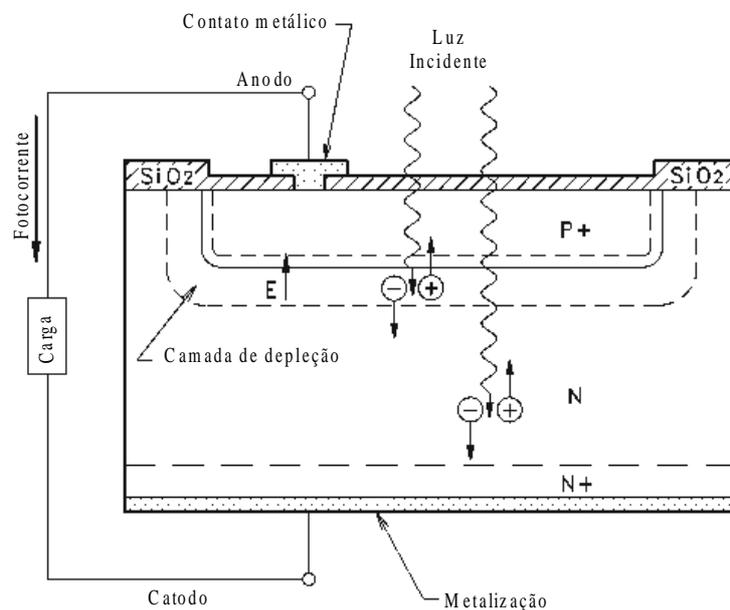


Figura 125 - Esquema de um fotodiodo de silício.

Quando a superfície superior é iluminada, fótons de luz penetram no silício até uma certa profundidade determinada pela energia do fóton e é absorvido pelo silício gerando pares elétron-lacuna. Estes pares ficam livre para percorrer todo o volume do fotodiodo até ocorrer recombinação. O período de tempo médio antes

da recombinação é chamado “tempo de vida dos portadores minoritários”. Na região próxima à junção, chamada de região de depleção, é gerado um forte campo elétrico. O campo é gerado pela diferença de potencial aplicada sobre a junção. Os portadores ao se aproximarem do campo elétrico atravessam a junção. Se uma conexão elétrica é feita entre ambos os lados da junção, uma corrente foto-induzida circulará enquanto houver exposição à luz. Além da fotocorrente, uma tensão é produzida através do diodo. Desse modo, o fotodiodo funciona exatamente como uma célula solar.

As curvas corrente/tensão (Figura 126) dos fotodiodos são muito similares àquelas dos diodos de sinal, exceto pela deslocamento das curvas ser dependente do nível de tensão incidente.

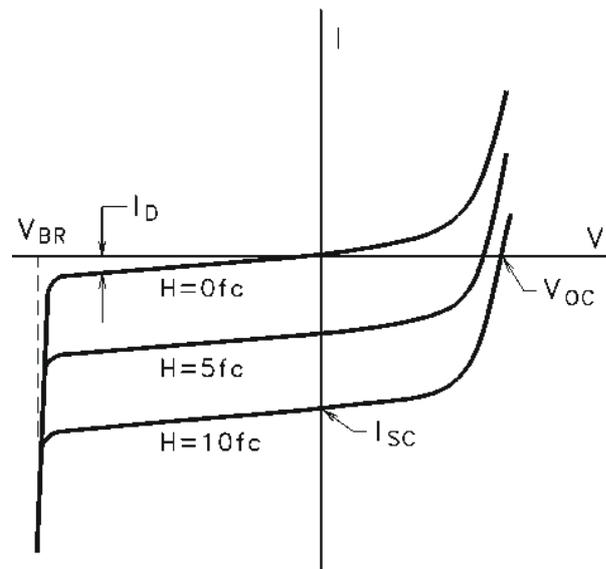


Figura 126 - Características corrente x tensão do fotodiodo.

ANEXO E

A seguinte descrição sucinta do latossolo vermelho-amarelo álico foi extraída do trabalho de Calderano Filho et al., 1998:

“Solos com horizonte B latossólico, não hidromórficos, ou seja, horizonte mineral subsuperficial em estágio avançado de intemperização, constituído por mistura com predomínio de óxidos (hidratados de ferro e/ou alumínio) ou de argilo-minerais 1:1, ou ambos em proporções variáveis, com altos teores em quartzo, quantidades muito pequenas de minerais primários menos resistentes ao intemperismo. Apresentam baixa relação silte/argila, menor do que 0,7; teores de ferro Fe_2O_3 , proveniente do ataque sulfúrico, variando de 60 a 90g.kg^{-1} ; baixa saturação por bases, e saturação por alumínio variável com valores baixos a altos. Apresentam textura média, fase cerradão tropical subcaducifólio, declividade 0 a 3%. Esta unidade é constituída por solos profundos, perfis com mais de 200cm de profundidade, com horizonte A espesso em torno de 30cm, subdividido em Ap e BA, e horizonte B latossólico subdividido em Bw2 e Bw3. A transição entre os horizontes é gradual e difusa, pouco se distinguindo a diferenciação do conjunto de propriedades físicas ao longo do perfil. O gradiente textural de A para B é gradual, e pouco nítida a diferenciação entre os subhorizontes do B.”

ANEXO F

Calderano Filho et al. (1998) descrevem a parcela de solo LRd2:

“Latossolo roxo distrófico, A moderado, textura argilosa, fase floresta tropical subcaducifólia, declives 3 a 8% e 8 a 15% C. Compreende solos minerais, não hidromórficos, com horizonte B latossólico, formados a partir de rochas eruptivas básicas (Diabásico). São predominantemente hematíticos, muito profundos, muito porosos, friáveis a muito friáveis, acentuadamente drenados e com elevados teores de sesquióxidos de ferro ($\text{Fe}_2\text{O}_3 > 180 \text{ g.kg}^{-1}$), alumínio e óxidos de titânio e manganês. Possuem seqüência de horizontes A, B e C, sendo as transições normalmente claras ou graduais entre o A e o B, e difusas entre os subhorizontes do B. Ocorrem cores avermelhadas no horizonte B, elevado grau de estabilidade dos agregados e baixo teor de argila natural (dispersível em água). O gradiente textural do horizonte B para o A (média do conteúdo de argila do horizonte B dividido pela média de argila do horizonte A) nunca chega a 1,7. Quanto ao teor de argila, variam de argilosos a muito argilosos. Apresentam argila de atividade baixa, sendo a fração argila constituída por minerais do tipo caulinita e óxidos de ferro e alumínio. Apresentam baixo conteúdo de minerais primários, exceto os mais resistentes ao intemperismo.

A espessura do solum (A+B) é quase sempre superior a 300cm, com o horizonte A tendo em média de 15 a 35cm. Característica marcante destes solos refere-se à sua alta suscetibilidade magnética, fazendo com que a massa do solo, seca e triturada, seja quase totalmente atraída por um ímã comum.

O LRd2 é definido de acordo com a seguinte combinação de características: baixa saturação por bases e alumínio trocável, horizonte superficial do tipo A moderado, textura argilosa ao longo do perfil e base floresta. Solos com estas características ocorrem em altitudes de 800 a 850m, nas classes de declive B e C. São solos profundos, acima de 200cm e com seqüência de horizontes A, Bw e C.

Estão situados em terço inferior a médio de vertentes longas e convexas de um relevo suave ondulado a ondulado. Apresentam coloração avermelhada. São desenvolvidos a partir do Diabásico, mas com influência do arenito, devido à posição que ocupam na paisagem.

O horizonte A é moderado, de coloração bruno-avermelhado-escura, matiz 2,5 YR; apresenta textura argilosa, contendo de 410 a 570 g.kg⁻¹ de argila. A estrutura é moderada a fraca pequena a média granular e blocos subangulares, muito porosa; a consistência quando seco é dura, quando úmido é friável e quando molhado é plástica e pegajosa. A transição para o horizonte B é plana e gradual.

Horizonte B, subdividido em Bw1, Bw2 e Bw3, é espesso(>150cm); a coloração é vermelho-escura, matizes 2,5 YR; textura argilosa (390 a 550 g.kg⁻¹); a estrutura é forte muito pequena granular, com aspecto de maciça porosa *in situ*, consistência é solta quando seco, muito friável quando úmido, muito plástica e pegajosa quando molhado, com transição plana e difusa entre os horizontes.”

A argila deste solo é composta de minerais do tipo 1:1, como a caulinita. Reichardt (1996) explica esta classificação do tipo de mineral:

“A argila, constituída de partículas de diâmetro menor que 2µm, compreende um grande grupo de minerais, alguns dos quais são amorfos, mas boa parte deles é constituída de micro-cristais de tamanho coloidal e estrutura definida. Ente estes cristais, ou minerais de argila, se encontram os aluminosilicatos.

Basicamente, estes se constituem de duas unidades estruturais: um tetraedro de átomos de oxigênio envolvendo um átomo de silício (Si⁺²) e um octaedro de átomos de oxigênio (ou grupo hidroxílico OH⁻) envolvendo um átomo de alumínio (Al⁺³). Os tetraedros e octaedros são unidos pelos seus vértices por meio de átomos de oxigênio que são compartilhados. Por esse motivo formam-se camadas de tetraedros e octaedros. Existem dois tipos principais de aluminosilicatos, dependendo da relação entre camadas de tetraedros e octaedros. Em **minerais 1:1**, como caulinita, uma camada de octaedros compartilha oxigênios de uma camada de tetraedros. Em minerais 2:1, como a montmorilonita, uma camada de octaedros compartilha oxigênios de duas camadas de tetraedros”.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBASPOUR, K.C.; SCHULIN, R.; VAN GENUCHTEN, M.TH. (2001). Estimating unsaturated soil hydraulic parameters using ant colony optimization. *Advances in Water Resources*. Amsterdam, v.24, p.827-41.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRONOMY (1982). *Methods of soil analysis*. 2.ed. Madison, C.A. Black, v.1.
- ANDEF – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE DEFESA VEGETAL. (2001). http://www.undef.com.br/dentro/banc_te3.htm (21 Jun).
- BOUMA, J.; HOOSBEEK, M.R. (1996). The contribution and importance of soil scientists in interdisciplinary studies dealing with land. In: WAGENET, R.J.; BOUMA, J. *The role of soil science in interdisciplinary research*. Madison, SSSA Special Publication n.45, Cap. 1.
- BRUCE, R.R.; KLUTE, A. (1956). The measurement of soil-water diffusivity. *Soil Science Society of America Proceedings*, v.20, p.458-62.
- BUCHTER, B.; HINZ, C.; WYDLER, H.; FLÜHLER, H. (1999). Evaluation of temperature and bypass flow sensitivity of tensiometers in a field soil. *Geoderma*, v.87, p.281-91.
- CALDERANO FILHO, B.; SANTOS, H.G. dos; FONSECA, O.O.M. da; SANTOS, R.D. dos; PRIMAVESI, O.; PRIMAVESI, A.C. (1998). Os solos da fazenda da fazenda Canchim, Centro de Pesquisa de Pecuária do Sudeste, São Carlos, SP: Levantamento semidetalhado, propriedades e potenciais. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPQ/São Carlos: Embrapa-CPPSE, 95p. (Embrapa-CNPQ. Boletim de Pesquisa, 7)(Embrapa-CPPSE. Boletim de Pesquisa, 2).
- CALIJURI, M.C.; OLIVEIRA, H.T. (2000). Manejo da qualidade da água: uma abordagem metodológica. In: CASTELLANO, E.G.; CHAUDHRY, F.Z. *Desenvolvimento sustentado: problemas e estratégias*. São Carlos: EESC-USP, Cap. 4.
- CESAREO, R.; GIANNINI, M. (1980). Elemental analysis by means of X-ray attenuation measurements. *Nuclear Instruments and Methods*, v.168, p.551-555.
- CHAUDRY, F.H. (2000). Aproveitamento de recursos hídricos. In: CASTELLANO, E.G.; CHAUDHRY, F.Z. *Desenvolvimento sustentado: problemas e estratégias*. São Carlos: EESC-USP, Cap. 3.
- CORMACK, A.M. (1963). Representation of a function by its line integrals, with some radiological applications. *Journal of Applied Physics*, v.34, p.2722-7.

- CRESTANA, S. (1985a). *A tomografia computadorizada como um novo método para estudos da física da água no solo*. São Carlos: 140p. Tese (Doutorado) - Instituto de Física de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S.; POZZI-MUCELLI, R.S. (1985b). Static and dynamic three-dimensional studies of water in soil using computed tomographic scanning. *Soil Science*, Baltimore, v.140, n.5, p.326-32.
- CRESTANA, S.; CESAREO, R.; MASCARENHAS, S. (1986). Using a computed tomograph miniscanner in soil science. *Soil Science*, Baltimore, v.142, n.1, p.56-61.
- CRESTANA, S.; CRUVINEL, P.E.; VAZ, C.M.P.; CESAREO, R.; MASCARENHAS, S.; REICHARDT, K. (1992). Calibração e uso de um tomógrafo computadorizado em ciência do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.16, n.2, p.161-167, maio/ago.
- CRESTANA, S., coord. (1995). *Relatório final de atividades do projeto temático "Transporte, previsão do destino e balanço de pesticidas no solo"*: terceiro período: agosto de 1993 a maio de 1995. São Carlos: EMBRAPA-CNPDIA. não paginado. Projeto temático FAPESP nº 90/3773-7.
- CRESTANA, S.; CRUVINEL, P.E.; MASCARENHAS, S.; VAZ, C.M.P.; NAIME, J.M.; CESAREO, R.; NIELSEN, D.R.; REICHARDT, K. (1996a). Tomografia reconstrutiva. In: CRESTANA, S.; CRUVINEL, P.E.; MASCARENHAS, S.; BISCEGLI, C.I.; MARTIN-NETO, L.; COLNAGO, L.A. *Instrumentação agropecuária: contribuições no limiar do novo século*. Brasília: EMBRAPA-SPI., Cap.4.
- CRESTANA, S. POSADAS, A.N. (1996b). Dinâmica da água e de solutos na região não-saturada do solo: modelagem da dinâmica da água e de solutos no solo. In: CRESTANA, S. et al. *Instrumentação agropecuária: contribuições no limiar do novo século*. Brasília: EMBRAPA-SPI., Cap. 7.
- CRESTANA, S. (1997). O papel da instrumentação na pesquisa e desenvolvimento agropecuário. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE INSTRUMENTAÇÃO AGROPECUÁRIA-SIAGRO, 1., São Carlos, 1996. *Anais*. São Carlos, EMBRAPA-CNPDIA, p.10-25.
- CRESTANA, S.; VAZ, C.M.P (1997). A instrumentação como uma ferramenta na pesquisa em conservação e manejo do solo (CD-ROM). In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 26, Rio de Janeiro-RJ, Jul. 25p. (artigo convidado).
- CRESTANA (2000). Harmonia e respeito entre homens e natureza: uma questão de vida – a contribuição da agricultura. In: CASTELLANO, E.G.; CHAUDHRY, F.Z. *Desenvolvimento sustentado: problemas e estratégias*. São Carlos: EESC-USP, Cap. 9.
- CRUVINEL, P.E. (1987). *Minitomógrafo de raios X e raios-gama computadorizado para aplicações multidisciplinares*. Campinas. 329p. Tese (Doutorado)- UNICAMP.

- CRUVINEL, P.E.; CESAREO, R.; CRESTANA, S.; MASCARENHAS, S. (1990). X-ray and gamma-ray computerized minitomograph scanner for soil science. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurements*, New York, v.39, n.5, p.745-50, Oct.
- DIRKSEN, C. (1999). *Soil physical measurements*. Reiskirchen, Catena Verlag.
- ECHING, S.O.; HOPMANS, J.W. (1993). Optimization of hydraulic functions from transient outflow and soil water pressure data. *Soil Science Society of America Journal*, v.57, p.1167-75.
- GIESKE, A.; DE VRIES, J.J. (1990). Note on the analysis of moisture-depth curves obtained by the hot-air method for the determination of soil moisture diffusivity. *Journal of Hydrology*, v.115, p.261-68.
- GÖTTLEIN, A.; HELL, U.; BLASEK, R. (1996). A system for microscale tensiometry and lysimetry. *Geoderma*, v.69, p.147-156.
- GREEN, W.H.; AMPT, G.A. (1911). Studies in soil physics. I. The flow of air and water through soils. *Journal of Agronomic Science*, v.4, p.1-24.
- HAINSWORTH, J.M.; AYLMORE, L.A.G. (1983). The use of computer assisted tomography to determine spatial distribution of soil water content. *Australian Journal of Soil Research*, Melbourne, v.21, p.1435.
- HARTEMINK, A.E.; MCBRATNEY, A.B.; CATTLE, J.A. (2001). Developments and trends in soil science: 100 volumes of *Geoderma* (1967-2001). *Geoderma*, v.100, p.217-68.
- HILLEL, D. (1982). *Introduction to soil physics*. Orlando, Academic Press, 364p.
- HERRMANN, P.S.P.; MASCARENHAS, S.; CRUVINEL, P.E.; CRESTANA, S. (1992). Medida da umidade em meios porosos utilizando um instrumento dedicado baseado na técnica de microondas. In: ENCONTRO SOBRE ESCOAMENTO EM MEIOS POROSOS-ENEMP, 20., out. 1992, São Carlos, SP. *Programação e resumos*. São Carlos, UFSCar, p.D3.
- HOUNSFIELD, G.N. (1968). *A method of and apparatus for examination of a body by radiation such as X ray or γ radiation*. British patent No 1283915. London: EMI, 1972. Application filed Aug. 1968.
- HOUNSFIELD, G.N. (1973). Computerized transverse axial scanning (tomography). Part 1: description of system. *British Journal of Radiology*, v.46, p.1016-22.
- HUBBEL, J.H. (1969). *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, 85p.
- HUISMAN, J.A.; SPERL, C.; BOUTEN, W.; VERSTRATEN, J.M. (2001). Soil water content measurements at different scales: accuracy of time domain reflectometry and ground-penetrating radar. *Journal of Hydrology*, v.245, p.48-58.
- JOFFE, J.S. (1949). *Pedology*. New Brunswick, Pedology Publications.

- JURY, W.A.; ROTH, K. (1990). *Transfer functions and solute movement through soil: theory and applications*. Basel, Birkhäuser Verlag.
- KAK, A.C.; SLANEY, M. (1987). *Principles of computerized tomographic imaging*. New York, IEEE Press. 329p.
- KEENEY, D. (2000). Soil science in the last 100 years: introductory comments. *Soil Science, An Interdisciplinary Approach to Soils Research*, v.165, p.3-4.
- KLUTE, A. (1986). *Methods of soil analysis: part I. physical and mineralogical methods*. 2. ed. Agronomy Monograph, v.9, Madison, American Society of Agronomy.
- KNOLL, G.F. (1989). *Radiation detection and measurement*. New York, John Wiley.
- KOSTIAKOV, A.N. (1932). On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and the necessity of studying it from a dynamic view for the purposes of amelioration, In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 6th, *Proceedings...* part A:17-21.
- KUNZE, R.J.; NIELSEN D.R. (1982). Finite-difference solutions of the infiltration equation. *Soil Science*, v.134, p.81-8.
- KUTÍLEK, M.; NIELSEN, D.R. (1994). *Soil hydrology*. Cremlingen-Dested, Catena Verlag, 370p.
- LEMOS, R.C.; DOS SANTOS R.D. (1996). *Manual de descrição e coleta de solo no campo*. 3.ed. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.
- LOPES, R.T. (1988). *Tomografia computadorizada em testes não destrutivos*. Rio de Janeiro. 148p. Tese (Doutorado) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- LOPES, R.T.; RODRIGUES, J.L.; DE ASSIS, J.T.; DE JESUS, E.F.O.; OLIVEIRA, L.F. (1997). Evaluation of a microtomography system with an X-ray microfocuss tube. *Applied radiation and isotopes*. v.48, 1437-42.
- LUXMOORE, R.J.; JARDINE, P.M.; WILSON, G.V.; JONES, J.R.; ZELAZNY, L.W. (1990). Physical and chemical controls of preferred path flow through a forested hillslope. *Geoderma*, v.46, p.139-54.
- MACEDO, A.S. (1997). *Construção e uso de um tomógrafo com resolução micrométrica para aplicações em ciência do solo e meio ambiente*. São Carlos. 129p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Paulo (CRHEA). Universidade de São Paulo.
- MACEDO, A.; CRESTANA, S.; VAZ, C.M.P. (1998). X-ray microtomography to investigate thin layers of soil clod. *Soil & Tillage Research*, v.49, p.249-253.
- MATSON, P.A.; PARTON, W.J.; POWER, A.G.; SWIFT, M.J. (1997). Agricultural intensification and ecosystem properties. *Science*, v.277, p.504-9.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E DO ABASTECIMENTO. (2001). <http://www.agricultura.gov.br/Estatisticas/345.htm> (21 Jun).

- MOHRATH, D.; BRUCKLER, L.; BERTUZZI, P.; GAUDU, J.C.; BOURLET, M. (1997). Error analysis of an evaporation method for determining hydrodynamic properties in unsaturated soil. *Soil Science Society of America Journal*, v.61, p.725-35.
- NAIME, J. M. (1994). *Projeto e construção de um tomógrafo portátil para estudos de Ciência do Solo e plantas, em campo*. São Carlos. 87p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- NAIME, J. M.; VAZ, C.M.P.; MACEDO, A. (2001). Automated soil particle size analyzer based on gamma-ray attenuation. *Computers and Electronics in Agriculture*, Amsterdam, v.31, n.3, p.295-304.
- NOBORIO, K. (2001). Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. *Computers and Electronics in Agriculture*, v.31, p.213-37.
- ONODY, R.N.; POSADAS, D.A.; CRESTANA, S. (1995). Experimental studies of the fingering phenomena in two dimensions and simulation using a modified invasion percolation model. *Journal of Applied Physics*, New York, v.78, n.5, p.2970-6.
- PACHEPSKY, Y.A.; SHCHERBAKOV, R.A. (1984). Hydraulic conductivity of soils: dependence of suction. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v.69, p.286-95.
- PERRET, J.; PRASHER, S.O.; KANTZAS A.; LANGFORD, C. (1997). 3-D visualization of soil macroporosity using x-ray CAT scanning. *Canadian Agricultural Engineering*, v.39, n.4, p.249-61.
- PERRET, J.; PRASHER, S.O.; KANTZAS A.; LANGFORD, C. (1999). Three dimensional quantification of macropore networks in undisturbed soil cores. *Soil Science Society of America Journal*, v.63, p.1530-43.
- PERRET, J.; PRASHER, S.O.; KANTZAS A.; LANGFORD, C. (2000a). A two-domain approach using CAT scanning to model solute transport in soil. *Journal of Environmental Quality*, v.29, p.995-1010.
- PERRET, J.; PRASHER, S.O.; KANTZAS A.; HAMILTON, K.; LANGFORD, C. (2000b). Preferential solute flow in intact soil columns measured by SPECT scanning. *Soil Science Society of America Journal*, v.64, p.469-77.
- PHILIP, J.R. (1957). The theory of infiltration: 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. *Soil Science* n.84, p.329-39.
- POSTEL, S.L. (2000). Entering an era of water scarcity: the challenges ahead. *Ecological Applications*, v.10(4), p.941-48.
- POSADAS, D.A.; TANNÚS, A.; PANEPUCCI, H.C.; CRESTANA, S. (1996). Magnetic resonance imaging as a non-invasive technique for investigating 3-D preferential flow occurring within stratified soil samples. *Computers and Electronics in Agriculture*, Amsterdam, v.14, n.4, p.255-67.
- PETROVIC, A.M.; SIEBERT, J.E.; RIEKE, P.E. (1982). Soil bulk density analysis in three dimensions by computed tomography scanning. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.46, p.445-9.

- PREVEDELLO, C.L. (1996). *Física do solo com problemas resolvidos*. Curitiba: Sociedade Autônoma de Estudos Avançados em Física do Solo, 446p.
- PRIMAVESI, O.; PRIMAVESI, A.C.P.A.; PEDROSO, A.F.; CAMARGO, A.C.; RASSINI, J.B.; ROCHA FILHO, J.; OLIVEIRA, G.P.; CORREA, L.A.; ARMELIN, M.J.A., VIEIRA, S.R.; DECHEN, S.C.F. (1999). Microbacia hidrográfica do Ribeirão Canchim. São Carlos, Embrapa Pecuária Sudeste - Boletim de Pesquisa nº05.
- RAATS, P.A.C. (2001). *Developments in soil-water physics since the mid 1960s*. Geoderma, v.100, p.355-87.
- RADON, J. (1917). *In the determination of functions from their integrals along certain manifolds*. Berichte über die Verhandlungen, v.69, p.262-277 (ger).
- RICHTER, J. (1987). *The soil as a reactor*. Cremlingen, Germany, Catena Verlag.
- REICHARDT, K. (1996). *Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas*. 2ed. Piracicaba, USP/ESALQ Depto. de Física e Meteorologia, 513p.
- ROSSI, C.; NIMMO, J.R. (1994). Modeling soil water retention from saturation to oven dryness. *Water Resources Research*, v.30, p.701-8.
- SAEIJIS, H.L.F.; VAN BERKEL, M.J. (1995). Global water crisis: the major issue of the 21st century, a growing and explosive problem. *European Water Pollution Control*. v.5 (4), p.26-40.
- SHCHERBAKOV, R.A.; PACHEPSKY, Y.A.; KUZNETSOV, M.Y. (1986). Comparison of methods of calculating one-dimensional moisture transport in soils. *Water Resources Research*, v.13, p.11-20.
- SHIPITALO, M.J.; DICK, W.A.; EDWARDS, W.M. (2000). Conservation tillage and macropore factors that affect water movement and the fate of chemicals. Amsterdam, *Soil & Tillage Research*, v.53, p.167-83.
- SMITH, K.A.; MULLINS, C.E. (2000). *Soil and environmental analysis: physical methods*. 2. ed. New York, Marcel Dekker.
- SPOSITO, G.; REGINATO, R.J. (1992). *Opportunities in basic soil science research*. Madison, Soil Science Society of America, Inc., 109p.
- SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA (1997). *Glossary of soil science terms*. Madison, Soil Science Society of America, Inc.
- STARR, G.C.; LOWERY, B.; COOLEY, E.T. (2000). Soil water content determination using a network analyzer and coaxial probe. *Soil Science Society of America Journal*, v.64(3), p.867-72.
- STIKKER, A. (1998). Water today and tomorrow. *Futures*. Great Britain, Pergamon, v.30(1), p.43-62.
- SWAIN A. (2001). Water wars: fact or fiction? *Futures*. Netherlands, Pergamon, v.33, p.769-81.
- TIMLIN, D.J.; PACHEPSKY, Y.A. (1998). Measurement of unsaturated soil hydraulic conductivity using a ceramic cup tensiometer. *Soil Science*, v.163, p.625-35.

- TAYLOR, T. and LUPTON R. (1986). Resolution, artifacts and the design of computed tomography systems. VIII. Tomography, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, v.A242, p.603-9.
- TORRE-NETO, A.; CRUVINEL, P.E.; INAMASU, R.Y.; CRESTANA, S. (1997). Tecnologias de ponta na agricultura: instrumentação e automação para a agricultura de precisão. In: SERAPHIM, O.J., ed. Tecnologia e aplicação racional de energia elétrica e de fontes renováveis na agricultura: *Anais do Simpósio "Tecnologia e Aplicação Racional de Energia Elétrica e de Fontes Renováveis na Agricultura"*. Campina Grande: UFPB, 1997. p.75-95. Simpósio integrante do XXVI CONBEA, Campina Grande-PB, jul.
- TRAUTMANN, N.M.; PORTER, K.S.; WAGENET, R.J. (2000). Pesticides and groundwater: a guide for the pesticide user. <http://pmep.cce.cornell.edu/facts-slides-self/facts/pest-gr-gud-grw89.html> (5 Nov.).
- VAN GENUCHTEN, M.T. (1980). A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, v.44, p.892-989.
- VAN GENUCHTEN, M.T. (1981). *Non-equilibrium transport parameters from miscible displacement experiments*. U.S. Salinity Laboratory, USDA-SEA-ARS, Riverside, CA. (Research Report No. 119).
- VAZ, C.M.P.; NAIME, J.M.; MACEDO, A. (1999). Soil particle size fractions determined by gamma-ray attenuation. *Soil Science*, Baltimore, v.164, n.6, p.403-10, Jun.
- VAZ, C.M.P.; BASSOI, L.H.; Hopmans, J.W. Contribution of water content and bulk density to field soil penetration resistance as measured by a combined cone penetrometer-TDR probe. *Soil and Tillage Research*, v.60, p.35-42.
- WALLACE, J.S. (2000). Increasing agricultural water use efficiency to meet future food production. *Agriculture Ecosystems & Environment*. Netherlands, v.82, p105-19.
- WANG, C.H.; WILLIS, D.L.; LOVELAND, W.D. (1975). Characteristics of ionizing radiation. In: WANG, C.H.; WILLIS, D.L.; LOVELAND, W.D. *Radioisotope methodology in the biological environmental, and physical sciences*. Englewood Cliffs, Prentice Hall. Cap. 3, p.39-74.