



CNEN/SP

ipen

**Instituto de Pesquisas
Energéticas e Nucleares**

**AUTARQUIA ASSOCIADA A UNIVERSIDADE
DE SÃO PAULO**

ANÁLISE CRÍTICA DA DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO UTILIZANDO ATENUAÇÃO DA RADIAÇÃO GAMA MONOENERGÉTICA

OTÁVIO PORTEZAN FILHO

**Tese apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Doutor em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear.**

**Orientador:
Dr. Klaus Reichardt**

**São Paulo
1997**

INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

**ANÁLISE CRÍTICA DA DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO
SOLO UTILIZANDO ATENUAÇÃO DA RADIAÇÃO GAMA MONOENERGÉTICA**

OTÁVIO PORTEZAN FILHO



Tese apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Doutor em Ciências na Área de Tecnologia
Nuclear.

Orientador:

Dr. Klaus Reichardt

SÃO PAULO

1997

Aos meus pais,
OCTÁVIO e ARLINDA
e aos meus irmãos,
OFEREÇO.

À minha esposa ROSELI,
DEDICO.

AGRADECIMENTOS

- Ao Professor Dr. KLAUS REICHARDT, pela orientação, pela amizade e colaboração durante o trabalho.
- Ao Dr. Osny O.S. Bacchi, Chefe da Seção da Física do Solo do CENA/USP pelas facilidades encontradas no laboratório para o desenvolvimento deste trabalho.
- Ao Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/USP) pela oportunidade de estudos.
- Aos Dr. Virgílio F. do Nascimento Filho, Dr. Epaminondas S. B. Ferraz e Dr. Carlos Roberto Appoloni pelas discussões relativas aos problemas encontrados no espectrômetro gama e ao Dr. Takashi Muraoka pela gentileza em fazer as fotos.
- Aos amigos da Seção da Física do Solo do CENA/USP pelo apoio recebido.
- Aos amigos do Departamento de Física da Universidade Estadual de Londrina, pelo incentivo constante.
- À CAPES e à Universidade Estadual de Londrina, pelo apoio financeiro.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS	v
LISTA DE FIGURAS	xvii
RESUMO	xxiv
ABSTRACT	xxvi
1 - INTRODUÇÃO	01
2 - TEORIA	07
2.1. - Solo	07
2.2. - Radiação gama	13
2.3. - Medida da condutividade hidráulica do solo	29
2.3.1. - Método de Hillel et al. (1972)	33
2.3.2. - Método de Libardi et al. (1980)	37
2.3.4. - Método de Sisson et al. (1980)	40
3 - MATERIAL E MÉTODOS	43
3.1. - Solo	43

3.1.1. - Coletas e análises das amostras de solo	43
3.1.2. - Curvas de retenção da água no solo.....	45
3.1.3. - Colunas de solo.....	47
3.1.3.1. - Preparo de colunas.....	49
3.1.3.2. - Infiltração da água	50
3.2. - Radiação gama	51
3.2.1. - Mesa de medidas	51
3.2.2. - Sistema de detecção da radiação gama	53
3.2.3. - Correção do tempo morto	58
3.2.4. - Coeficientes de atenuação de massa da água e do solo... 61	
3.2.5. - Densidade do solo na coluna	63
3.2.6. - Umidade volumétrica nas colunas de solo	64
4 - RESULTADOS OBTIDOS.....	66
4.1. - Análises das amostras de solo.....	66
4.2. - Curvas de retenção da água no solo	70
4.3. - Colunas de solo: densidade e infiltração de água	73
4.4. - Umidade volumétrica nas colunas de solo.....	80
4.5. - Condutividade hidráulica.....	132
5 - CONCLUSÕES	165
6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	167

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Análises dos solos segundo métodos convencionais	66
Tabela 4.2 - Coeficientes de atenuação de massa dos solos LVa, LVE e LRd para fótons de 661,6 KeV do ¹³⁷ Cs, obtidos com a nossa geometria	67
Tabela 4.3 - Coeficientes de atenuação de massa da água (LUO & WELLS, 1992).	69
Tabela 4.4 - Parâmetros das curvas de retenção da água no solo, conforme equação (3.1), obtidos do programa SWRC.	70
Tabela 4.5 - Porosidade total e umidade de saturação, em valores percentuais, para as amostras de solos.	72
Tabela 4.6 - Densidade nas colunas de solos LVa, LVE e LRd , montadas em laboratório.	73
Tabela 4.7 - Densidade nas colunas de solo LVa obtida por atenuação da radiação gama, nas profundidades de 0,01 a 0,20 m e os respectivos coeficientes de variação (CV).	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Análises dos solos segundo métodos convencionais	66
Tabela 4.2 - Coeficientes de atenuação de massa dos solos LVa, LVE e LRd para fótons de 661,6 KeV do ¹³⁷ Cs, obtidos com a nossa geometria	67
Tabela 4.3 - Coeficientes de atenuação de massa da água (LUO & WELLS, 1992).	69
Tabela 4.4 - Parâmetros das curvas de retenção da água no solo, conforme equação (3.1), obtidos do programa SWRC.	70
Tabela 4.5 - Porosidade total e umidade de saturação, em valores percentuais, para as amostras de solos.	72
Tabela 4.6 - Densidade nas colunas de solos LVa, LVE e LRd , montadas em laboratório.	73
Tabela 4.7 - Densidade nas colunas de solo LVa obtida por atenuação da radiação gama, nas profundidades de 0,01 a 0,20 m e os respectivos coeficientes de variação (CV).	75

Tabela 4.8 - Densidade nas colunas de solo LVE obtida por atenuação da radiação gama, nas profundidades de 0,01 a 0,20 m e os respectivos coeficientes de variação (CV).	76
Tabela 4.9 - Densidade nas colunas de solo LRd obtida por atenuação da radiação gama, nas profundidades de 0,01 a 0,20 m e os respectivos coeficientes de variação (CV).	77
Tabela 4.10 - Tempos de infiltração da água nas colunas de solos LVA, LVE e LRd.....	79
Tabela 4.11 - Umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama na coluna A do solo LVA, nos diversos tempos de redistribuição da água.	81
Tabela 4.12 - Umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama na coluna B do solo LVA, nos diversos tempos de redistribuição da água.	82
Tabela 4.13 - Umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama na coluna C do solo LVA, nos diversos tempos de redistribuição da água.	83
Tabela 4.14 - Umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama na coluna D do solo LVA, nos diversos tempos de redistribuição da água.	84

Tabela 4.15 - Umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama na coluna E do solo LVa, nos diversos tempos de redistribuição da água.	85
Tabela 4.16 - Umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama na coluna F do solo LVa, nos diversos tempos de redistribuição da água.	86
Tabela 4.17 - Umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama na coluna A do solo LVE, nos diversos tempos de redistribuição da água.	87
Tabela 4.18 - Umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama na coluna B do solo LVE, nos diversos tempos de redistribuição da água.	88
Tabela 4.19 - Umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama na coluna C do solo LVE, nos diversos tempos de redistribuição da água.	89
Tabela 4.20 - Umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama na coluna D do solo LVE, nos diversos tempos de redistribuição da água.	90

Tabela 4.21 - Umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama na coluna E do solo LVE, nos diversos tempos de redistribuição da água.	91
Tabela 4.22 - Umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama na coluna F do solo LVE, nos diversos tempos de redistribuição da água.	92
Tabela 4.23 - Umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama na coluna A do solo LRd, nos diversos tempos de redistribuição da água.	93
Tabela 4.24 - Umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama na coluna B do solo LRd, nos diversos tempos de redistribuição da água.	94
Tabela 4.25 - Umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama na coluna C do solo LRd, nos diversos tempos de redistribuição da água.	95
Tabela 4.26 - Coeficiente de variação na umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama, na coluna B do solo LVa durante a redistribuição da água.	96

Tabela 4.27 - Coeficiente de variação na umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama, na coluna E do solo LVa, durante a redistribuição da água.....	97
Tabela 4.28 - Coeficiente de variação na umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama, na coluna C do solo LVE, durante a redistribuição da água.....	98
Tabela 4.29 - Coeficiente de variação na umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama, na coluna F do solo LVE, durante a redistribuição da água.....	99
Tabela 4.30 - Coeficiente de variação na umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama, na coluna A do solo LRd, durante a redistribuição da água.....	100
Tabela 4.31 - Coeficiente de variação na umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama, na coluna C do solo LRd, durante a redistribuição da água.....	101
Tabela 4.32 - Umidade volumétrica calculada pela regressão linear θ versus $\ln t$, para a coluna B do solo LVa, com os tempos de redistribuição previamente definidos.....	112

Tabela 4.33 - Umidade volumétrica calculada pela regressão linear θ versus Int , para a coluna E do solo LVa com os tempos de redistribuição previamente definidos.....	113
Tabela 4.34 - Umidade volumétrica calculada pela regressão linear θ versus Int , para a coluna C do solo LVE com os tempos de redistribuição previamente definidos.....	114
Tabela 4.35 - Umidade volumétrica calculada pela regressão linear θ versus Int , para a coluna F do solo LVE com os tempos de redistribuição previamente definidos.....	115
Tabela 4.36 - Umidade volumétrica calculada pela regressão linear θ versus Int , para a coluna A do solo LRd com os tempos de redistribuição previamente definidos.....	116
Tabela 4.37 - Umidade volumétrica calculada pela regressão linear θ versus Int , para a coluna C do solo LRd com os tempos de redistribuição previamente definidos.....	117
Tabela 4.38 - Valores máximos e mínimos do coeficiente de correlação para a regressão linear θ versus Int aplicada aos dados experimentais.....	118

- Tabela 4.39a - Valores de K_s e γ obtidos do programa CONDHILS para o método de HILLEL et al. (1972), considerando $\delta H/\delta z = -1$ e resultados das respectivas regressões lineares aplicadas aos dados de umidade θ na coluna de solo durante redistribuição da água. Solo LVa - coluna B. 133
- Tabela 4.39b - Valores de K_s e γ obtidos do programa CONDHILS para o método de LIBARDI et al. (1972), considerando $\delta H/\delta z = -1$ e resultados das respectivas regressões lineares aplicadas aos dados de umidade θ na coluna de solo durante redistribuição da água. Solo LVa - coluna B. 134
- Tabela 4.39c - Valores de K_s e γ obtidos do programa CONDHILS para o método de SISSON et al. (1972), considerando $\delta H/\delta z = -1$ e resultado da respectiva regressão linear aplicada aos dados de umidade θ na coluna de solo durante redistribuição da água. Solo LVa - coluna B. 135
- Tabela 4.40a - Valores de K_s e γ obtidos do programa CONDHILS para o método de HILLEL et al. (1972), considerando $\delta H/\delta z = -1$ e resultados das respectivas regressões lineares aplicadas aos dados de umidade θ na coluna de solo durante redistribuição da água. Solo LVa - coluna E. 136

Tabela 4.40b - Valores de K_s e γ obtidos do programa CONDHILS para o método de LIBARDI et al. (1972), considerando $\delta H/\delta z = -1$ e resultados das respectivas regressões lineares aplicadas aos dados de umidade θ na coluna de solo durante redistribuição da água. Solo LVa - coluna E.	137
--	-----

Tabela 4.40c - Valores de K_s e γ obtidos do programa CONDHILS para o método de SISSON et al. (1972), considerando $\delta H/\delta z = -1$ e resultado da respectiva regressão linear aplicada aos dados de umidade θ na coluna de solo durante redistribuição da água. Solo LVa - coluna E.	138
--	-----

Tabela 4.41a - Valores de K_s e γ obtidos do programa CONDHILS para o método de HILLEL et al. (1972), considerando $\delta H/\delta z = -1$ e resultados das respectivas regressões lineares aplicadas aos dados de umidade θ na coluna de solo durante redistribuição da água. Solo LVE - coluna C.	139
---	-----

Tabela 4.41b - Valores de K_s e γ obtidos do programa CONDHILS para o método de LIBARDI et al. (1972), considerando $\delta H/\delta z = -1$ e resultados das respectivas regressões lineares aplicadas aos dados de umidade θ na coluna de solo durante redistribuição da água. Solo LVE - coluna C.	140
--	-----

Tabela 4.41c - Valores de K_s e γ obtidos do programa CONDHILS para o método de SISSON et al. (1972), considerando $\delta H/\delta z = -1$ e resultado da respectiva regressão linear aplicada aos dados de umidade θ na coluna de solo durante redistribuição da água. Solo LVE - coluna C. 141

Tabela 4.42a - Valores de K_s e γ obtidos do programa CONDHILS para o método de HILLEL et al. (1972), considerando $\delta H/\delta z = -1$ e resultados das respectivas regressões lineares aplicadas aos dados de umidade θ na coluna de solo durante redistribuição da água. Solo LVE - coluna F. 142

Tabela 4.42b - Valores de K_s e γ obtidos do programa CONDHILS para o método de LIBARDI et al. (1972), considerando $\delta H/\delta z = -1$ e resultados das respectivas regressões lineares aplicadas aos dados de umidade θ na coluna de solo durante redistribuição da água. Solo LVE - coluna F. 143

Tabela 4.42c - Valores de K_s e γ obtidos do programa CONDHILS para o método de SISSON et al. (1972), considerando $\delta H/\delta z = -1$ e resultado da respectiva regressão linear aplicada aos dados de umidade θ na coluna de solo durante redistribuição da água. Solo LVE - coluna F. 144

Tabela 4.43a - Valores de K_s e γ obtidos do programa CONDHILS para o método de HILLEL et al. (1972), considerando $\delta H/\delta z = -1$ e resultados das respectivas regressões lineares aplicadas aos dados de umidade θ na coluna de solo durante redistribuição da água. Solo LRd - coluna A. 145

Tabela 4.43b - Valores de K_s e γ obtidos do programa CONDHILS para o método de LIBARDI et al. (1972), considerando $\delta H/\delta z = -1$ e resultados das respectivas regressões lineares aplicadas aos dados de umidade θ na coluna de solo durante redistribuição da água. Solo LRd - coluna A. 146

Tabela 4.43c - Valores de K_s e γ obtidos do programa CONDHILS para o método de SISSON et al. (1972), considerando $\delta H/\delta z = -1$ e resultado da respectiva regressão linear aplicada aos dados de umidade θ na coluna de solo durante redistribuição da água. Solo LRd - coluna A..... 147

Tabela 4.44a - Valores de K_s e γ obtidos do programa CONDHILS para o método de HILLEL et al. (1972), considerando $\delta H/\delta z = -1$ e resultados das respectivas regressões lineares aplicadas aos dados de umidade θ na coluna de solo durante redistribuição da água. Solo LRd - coluna C. 148

Tabela 4.44b - Valores de K_s e γ obtidos do programa CONDHILS para o método de LIBARDI et al. (1972), considerando $\delta H/\delta z = -1$ e resultados das respectivas regressões lineares aplicadas aos dados de umidade θ na coluna de solo durante redistribuição da água. Solo LRd - coluna C. 149

Tabela 4.44c - Valores de K_s e γ obtidos do programa CONDHILS para o método de SISSON et al. (1972), considerando $\delta H/\delta z = -1$ e resultado da respectiva regressão linear aplicada aos dados de umidade θ na coluna de solo durante redistribuição da água. Solo LRd - coluna C. 150

Tabela 4.45 - Resultados obtidos pelo método de LIBARDI et al. (1980) para K_s , γ com θ_s medido por sonda de nêutrons. (dados obtidos de FALLEIROS et al. 1997)..... 152

Tabela 4.46 - Resultados obtidos pelo método de LIBARDI et al. (1980) para K_s , γ utilizando θ_s calculado para $t = 60$ s (dados obtidos de FALLEIROS et al. 1997)..... 152

Tabela 4.47 - Coeficiente de variação na condutividade hidráulica $K(\theta)$, determinado para as colunas de solos, de acordo com os resultados mostrados nas figuras 4.31 a 4.33. 155

Tabela 4.48 - Parâmetros A e B da função condutividade hidráulica $K(W)=A \exp (BW)$ estimada para vários métodos e as respectivas diferenças percentuais (%) (extraída de KATUL et al., 1993).	163
--	-----

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Classificações texturais do solo. Escala superior proposta pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos. Escala inferior proposta pela Sociedade Internacional da Ciência do Solo.	08
Figura 2.2: Diagrama do efeito fotoelétrico	14
Figura 2.3: Diagrama do efeito Compton.....	15
Figura 2.4: Diagrama do processo de produção de par	17
Figura 2.5: Coeficientes de atenuação linear no chumbo em função da energia da radiação gama: $\mu^*_f \rightarrow$ referente ao efeito fotoelétrico; $\mu^*_c \rightarrow$ efeito Compton; $\mu^*_p \rightarrow$ produção de par; $\mu^* \rightarrow$ coeficiente de atenuação linear total.	19
Figura 2.6: Esquema de atenuação de um feixe gama monoenergético em uma amostra qualquer de massa específica ρ e espessura x na direção do feixe. (Lei de Lambert-Beer)	20

Figura 2.7: Esquema de determinação do coeficiente de atenuação de massa da água no processo de interação com feixe monoenergético de radiação gama: $I_0 \rightarrow$ feixe incidente; $I \rightarrow$ feixe transmitido; $x \rightarrow$ espessura da amostra de água na caixa na direção do feixe gama; $x_r \rightarrow$ espessura das paredes da caixa na direção do feixe gama.....22

Figura 2.8: Esquema do volume de solo ($V= x.S$) atravessado por um feixe de radiação gama de seção transversal S e de intensidades I_0 e I , incidente e transmitido, respectivamente. A) considerando o solo como um todo; B) considerando as três frações em separado.....26

Figura 2.9: a) Umidade volumétrica em função do tempo de redistribuição e b) $\theta_s - \theta$ versus $\ln t$. Coluna E do solo LVa, profundidade de 0,10 m.35

Figura 3.1: Mesa de tensão com amostras de solo em cilindros volumétricos.....46

Figura 3.2: Colunas de solo utilizadas neste trabalho.....48

Figura 3.3: Mesa de medidas mostrando o conjunto fonte radioativa ^{137}Cs - coluna de solo - detetor de NaI (TI).52

Figura 3.4: Diagrama de blocos de um espectrômetro gama monocanal. (adaptado de CRESTANA, 1985).....54

Figura 3.5: Esquema de funcionamento de uma fotomultiplicadora.....	56
Figura 3.6: Eletrônica acoplada ao espectrômetro gama monocal, osciloscópio e microcomputador	59
Figura 3.7: Espectro do ^{137}Cs , com o pico característico de energia de 661,6 Kev. A “janela” utilizada no monocal está definida de 4,4 a 6,6 volts.....	62
Figura 4.1: Curvas de retenção da água nos solos LVa, LVE e LRd. Pontos representam os dados experimentais e a linha contínua o resultado fornecido pelo SWRC.....	71
Figura 4.2: Densidade do solo obtida por atenuação da radiação gama versus profundidade nas colunas de solos LVa, LVE e LRd.	78
Figura 4.3: Umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama versus profundidade na coluna B do solo LVa.....	103
Figura 4.4: Umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama versus profundidade na coluna E do solo LVa.....	104
Figura 4.5: Umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama versus profundidade na coluna C do solo LVE.	105

- Figura 4.6: Umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama versus profundidade na coluna F do solo LVE..... 106
- Figura 4.7: Umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama versus profundidade na coluna A do solo LRd..... 107
- Figura 4.8: Umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama versus profundidade na coluna C do solo LRd. 108
- Figura 4.9: Umidade volumétrica em função do tempo de redistribuição para duas profundidades na coluna B do solo LVa. 109
- Figura 4.10: Umidade volumétrica em função do tempo de redistribuição para duas profundidades na coluna E do solo LVa..... 109
- Figura 4.11: Umidade volumétrica em função do tempo de redistribuição para duas profundidades na coluna C do solo LVE. 110
- Figura 4.12: Umidade volumétrica em função do tempo de redistribuição para duas profundidades na coluna F do solo LVE. 110

Figura 4.13: Umidade volumétrica em função do tempo de redistribuição para duas profundidades na coluna A do solo LRd.	111
Figura 4.14: Umidade volumétrica em função do tempo de redistribuição para duas profundidades na coluna C do solo LRd.	111
Figura 4.15: Umidade volumétrica calculada por modelo versus profundidade na coluna B do solo LVa.	120
Figura 4.16: Umidade volumétrica calculada por modelo versus profundidade na coluna E do solo LVa.	121
Figura 4.17: Umidade volumétrica calculada por modelo versus profundidade na coluna C do solo LVE.	122
Figura 4.18: Umidade volumétrica calculada por modelo versus profundidade na coluna F do solo LVE.	123
Figura 4.19: Umidade volumétrica calculada por modelo versus profundidade na coluna A do solo LRd.	124
Figura 4.20: Umidade volumétrica calculada por modelo versus profundidade na coluna C do solo LRd.	125

- Figura 4.21: Umidade volumétrica medida em função do tempo de redistribuição e o ajuste pelo modelo para a coluna B do solo LVa..... 126
- Figura 4.22: Umidade volumétrica medida em função do tempo de redistribuição e o ajuste pelo modelo para a coluna E do solo LVa..... 126
- Figura 4.23: Umidade volumétrica medida em função do tempo de redistribuição e o ajuste pelo modelo para a coluna C do solo LVE..... 127
- Figura 4.24: Umidade volumétrica medida em função do tempo de redistribuição e o ajuste pelo modelo para a coluna F do solo LVE..... 127
- Figura 4.25: Umidade volumétrica medida em função do tempo de redistribuição e o ajuste pelo modelo para a coluna A do solo LRd..... 128
- Figura 4.26: Umidade volumétrica medida em função do tempo de redistribuição e o ajuste pelo modelo para a coluna C do solo LRd..... 128
- Figura 4.27: Desvios médios da umidade do solo em função das profundidades: a) coluna B e b) coluna E do solo LVa..... 129

Figura 4.28: Desvios médios da umidade do solo em função das profundidades: a) coluna C e b) coluna F do solo LVE 130

Figura 4.29: Desvios médios da umidade do solo em função das profundidades: a) coluna A e b) coluna C do solo LRd 131

Figura 4.30: Curvas $\theta_s - \theta$ versus $\ln t$ para profundidades variando de 0,25 a 1,25 m: a) com θ_s medido com sonda de nêutrons e b) com θ_s calculado para $t = 60$ s..... 154

Figura 4.31: Condutividade hidráulica $K(\theta)$ calculada para $\theta = 0,28 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ em função da profundidade nas colunas B (acima) e E (abaixo) do solo LVa. 157

Figura 4.32: Condutividade hidráulica $K(\theta)$ calculada para $\theta = 0,18 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ em função da profundidade nas colunas C (acima) e F (abaixo) do solo LVE..... 158

Figura 4.33: Condutividade hidráulica $K(\theta)$ calculada para $\theta = 0,38 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ em função da profundidade nas colunas A (acima) e C (abaixo) do solo LRd..... 159

Figura 4.34: Condutividade hidráulica $K(\theta)$ estimada pelos métodos CGA, de Libardi e do *State Space*. O intervalo de confiança é também mostrado..... 163

ANÁLISE CRÍTICA DA DETERMINAÇÃO DA CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA DO SOLO UTILIZANDO ATENUAÇÃO DA RADIAÇÃO GAMA MONOENERGÉTICA.

Otávio Portezan Filho

RESUMO

Três amostras de solo de diferentes texturas: LVA (latossolo vermelho-amarelo), LVE (latossolo vermelho-escuro) e LRd (latossolo roxo-distrófico) foram utilizadas para as medidas da condutividade hidráulica não saturada $K(\theta)$. As densidades e as umidades dos solos durante o processo de drenagem interna da água foram medidas com a atenuação da radiação gama monoenergética, utilizando colunas de solo homogêneas montadas em laboratório. As medidas foram realizadas com feixe gama colimado de 0,003 m de diâmetro, utilizando um detetor de NaI(Tl) (3" x 3") e uma fonte radioativa de ^{137}Cs , 74×10^8 Bq e 661,6 KeV. As colunas de solo foram varridas pelo feixe gama a partir de 0,01 até 0,20 m de profundidade, em passos de 0,01 m, para diversos tempos de redistribuição da água no solo. Os resultados mostraram uma grande variabilidade da condutividade hidráulica não saturada $K(\theta)$, mesmo para o caso de solos homogêneos. A variabilidade entre métodos de determinação da relação $K(\theta)$ foi significativamente menor que a variabilidade espacial. A

consideração do gradiente unitário durante redistribuição da água no solo, que é assumida nos métodos de HILLEL, LIBARDI e SISSON levaram a valores de condutividade hidráulica que aumentam em profundidade. O caráter exponencial da relação entre a condutividade hidráulica e a umidade do solo, é responsável pela dificuldade da estimativa da condutividade hidráulica, o que é uma consequência de pequenas variações do arranjo poroso, mesmo em amostras de solo supostamente homogêneas.

**CRITICAL ANALYSIS OF SOIL HYDRAULIC CONDUCTIVITY
DETERMINATION USING MONOENERGETIC GAMMA RADIATION
ATTENUATION.**

Otávio Portezan Filho

ABSTRACT

Three soil samples of different textures: LVA (red yellow latosol), LVE (dark red latosol) and LRd (distrophic dark red latosol) were utilized for unsaturated hydraulic conductivity $K(\theta)$ measurements. Soil bulk densities and water contents during internal water drainage were measured by monoenergetic gamma radiation attenuation, using homogeneous soil columns assembled in the laboratory. The measurements were made with a collimated gamma beam of 0.003 m in diameter using a NaI(Tl) (3" x 3") detector and a ^{137}Cs gamma source of 74×10^8 Bq and 661.6 KeV. Soil columns were scanned with the gamma beam from 0.01 to 0.20 m depth, in 0.01m steps, for several soil water redistribution times. The results show a great variability of the unsaturated hydraulic conductivity relation $K(\theta)$, even though homogeneous soils were used. The variability among methods is significantly smaller in relation to variability in space. The assumption of unit hydraulic gradient during redistribution of soil water utilized in the methods of HILLEL, LIBARDI and SISSON leads to hydraulic

conductivity values that increase in depth. The exponential character of the $K(\theta)$ relationship, is responsible for the difficulty of estimating soil hydraulic conductivity, which is a consequence of small variations in the porous arrangement, even in samples supposed to be homogeneous.

1 - INTRODUÇÃO

A determinação da condutividade hidráulica em solo não saturado é importante para a descrição do transporte de água (solução do solo) neste sistema poroso complexo que é o solo, porque esta condição de não saturação é a mais frequente na maioria das atividades agrícolas. Este parâmetro é uma propriedade do solo e uma função de seu teor de água, expresso através de sua umidade ou de sua energia potencial. É parte integrante da equação de DARCY-BUCKINGHAM, que descreve o movimento da água em materiais porosos. A condutividade hidráulica do solo é uma propriedade de cada sistema poroso, uma vez que depende do arranjo das partículas que o formam, e segundo KLUTE & DIRKSEN (1986), representa a capacidade do sistema em transmitir água. Tem seu valor altamente variável no tempo e no espaço, em decorrência de acréscimos ou decréscimos na umidade do solo. Como já foi dito acima, depende também do tipo, da forma e do arranjo geométrico (estrutura) das partículas que constituem o solo. Em menor escala, a condutividade hidráulica apresenta também, dependência com as propriedades do fluido (viscosidade e densidade), no caso, a solução do solo.

O estudo da condutividade hidráulica para solos não saturados é essencial quando aplicado às situações relacionadas à irrigação, drenagem e transporte de nutrientes no solo, ou seja, em situações importantes para o desenvolvimento de uma cultura agrícola. As chuvas e/ou irrigações que ocorrem em uma determinada cultura ou a condução de resíduos tóxicos da superfície do solo para horizontes mais profundos, são situações importantes que envolvem o conhecimento do fluxo de água no solo.

Muitos métodos de determinação da condutividade hidráulica,

para condições de campo e laboratório foram desenvolvidos, como os de HILLEL et al. (1972), CAMPBELL (1974), LIBARDI et al. (1980), SISSON et al (1980), VAN GENUCHTEN (1980), CHONG et al. (1981) entre outros. Esses métodos estimam a condutividade hidráulica através do conhecimento do potencial da água e da umidade do solo obtidos por sonda de nêutrons, tensiometria, curva de retenção da água no solo ou atenuação da radiação gama. KLUTE (1972), ROGOWSKY (1972), KLUTE & DIRKSEN (1986) e WÖSTEN & VAN GENUCHTEN (1988), apresentaram ainda alguns modelos para a determinação da condutividade hidráulica em solos não saturados, que se utilizam de outros procedimentos de medida e cálculo.

O primeiro estudo experimental sobre o movimento da água no solo foi realizado por DARCY (1856) utilizando colunas de areia saturada. BUCKINGHAM (1907), descreveu o fluxo de água em meio poroso não saturado fazendo uma modificação na equação obtida por DARCY(1856). RICHARDS (1931), combinou a equação de DARCY-BUCKINGHAM com a equação da continuidade para estabelecer uma relação mais geral, que é utilizada atualmente. KLUTE (1972) descreve em seu trabalho vários métodos para estimativa da condutividade e difusividade hidráulicas para solos não saturados, tanto em campo como em laboratório, inclusive o Método do Perfil Instantâneo, no qual se baseiam os métodos de HILLEL et al. (1972), LIBARDI et al. (1980) e SISSON et al. (1980).

CAVALCANTE (1978), mediu a condutividade hidráulica do solo no processo de redistribuição da água em colunas de solo (TRe - terra roxa estruturada), através da técnica de atenuação da radiação gama monoenergética. Mostrou que o método de HILLEL et al. (1972), com gradiente unitário do potencial total da água, fornece resultados satisfatórios quando aplicado às condições de laboratório. BRESLER et al. (1984) fizeram uma análise estatística para verificar quais são os fatores dominantes na variabilidade espacial da condutividade hidráulica saturada medida no campo, para um solo de

textura arenosa. A amostragem compreendeu 30 locais da área de interesse e 4 profundidades (0 - 0,30; 0,30 - 0,60; 0,60 - 0,90 e 0,90 - 1,20 m). Verificaram que a salinidade do solo explica de 10 a 15% a variabilidade na condutividade hidráulica saturada, a textura (percentagem de areia) de 25 a 45%, a interação entre a salinidade e textura do solo de 10 a 15% e outros fatores inerentes ao solo explicam de 30 a 50%. JONES & WAGENET (1984), utilizando sonda de nêutrons, estimaram em campo a condutividade hidráulica para o solo franco arenoso. Aplicaram aos dados experimentais os métodos de LIBARDI et al. (1980), SISSON et al. (1980) e CHONG et al. (1981) e os valores da condutividade hidráulica determinados pelos dois primeiros métodos foram bem concordantes. O método de CHONG et al. (1981) forneceu valores pelo menos duas vezes menores. BACCHI (1988), com dados experimentais obtidos em campo (LVa - latossolo vermelho-amarelo) por meio de sonda de nêutrons e tensiometria calculou a condutividade hidráulica no processo de redistribuição da água através dos métodos de HILLEL et al. (1972), LIBARDI et al. (1980), VAN GENUCHTEN (1980) e PAULETTO et al. (1988). Esse trabalho mostrou que os resultados obtidos através dos métodos de HILLEL e LIBARDI foram bastante concordantes. O gradiente do potencial total da água no solo variou de 0,52 a 1,05 m.m⁻¹ durante o período de redistribuição da água no solo. Por outro lado, o método de PAULETTO não forneceu resultados satisfatórios e o método de VAN GENUCHTEN subestimou os valores da condutividade hidráulica, principalmente para valores de umidade próximos à saturação. AHUJA et al. (1988), mediram a condutividade hidráulica para 4 solos não saturados e mostraram que os resultados dos gradientes hidráulicos foram influenciados pela natureza e complexidade do perfil do solo e variaram com o tempo e profundidade. Os resultados da condutividade hidráulica para os solos úmidos, em todos os solos, indicaram que a aproximação do gradiente unitário leva a valores de condutividade hidráulica menores daqueles calculados usando o gradiente medido. OLIVEIRA (1991), calculou a condutividade hidráulica nos processos de redistribuição e infiltração da água no solo LRd (latossolo roxo-distrófico), utilizando a técnica de atenuação da radiação gama monoenergética e tensiometria. Os valores da condutividade hidráulica calculados na infiltração (coluna de solo) apresentaram erros devido às dificuldades do método escolhido

para o cálculo, que foi o de BRUCE & KLUTE (1956), que requer inicialmente o cálculo da difusividade da água no solo para, a partir dela, calcular a condutividade. Em relação à redistribuição da água, OLIVEIRA (1991), utilizou os métodos de HILLEL et al. (1972) com gradiente unitário para o potencial total da água e LIBARDI et al. (1980), para calcular a condutividade hidráulica dos dados experimentais de laboratório e de campo. Mostrou que os valores da condutividade hidráulica diferem nestes métodos, em ambos experimentos, devido à forma da determinação do valor da condutividade hidráulica saturada utilizada pelos métodos.

Para fazer uma análise crítica dos problemas expostos acima, optou-se neste trabalho por utilizar amostras de solo homogêneas, submetidas a um controle mais rigoroso de laboratório, nas quais a umidade seria determinada por uma técnica não destrutiva, que tivesse uma interferência mínima sobre o sistema em estudo. A atenuação da radiação gama possui estas características e, é uma técnica bastante conhecida.

A técnica de atenuação da radiação gama na física do solo foi aplicada, inicialmente, para medidas de densidade, conforme REGINATO & VAN BAVEL (1964) e, posteriormente para determinação da umidade do solo. Um dos primeiros trabalhos, em nosso meio, que se utilizou da técnica da atenuação da radiação gama, foi o de REICHARDT (1965). Com o uso desta técnica, é possível obter medidas não destrutivas de densidade e umidade do solo. É necessário, no caso da atenuação da radiação gama, um boa exatidão na medida da espessura dessa amostra de solo, para evitar-se erros no cálculo da densidade e/ou umidade do solo. Pode-se, com esta técnica, estudar a compactação do solo causada pelos maquinários e, até mesmo, monitorar mudanças na densidade num perfil de solo. Um solo bastante compactado não permite um desenvolvimento radicular satisfatório para sobrevivência da cultura, provocando também uma má aeração do solo e, conseqüentemente, afetando o fluxo de água neste solo. Para medidas realizadas em laboratório, utilizam-se

amostras de solo indeformadas ou deformadas, como por exemplo, colunas de solo. As colunas de solo podem ser varridas por um feixe gama, mono ou bienergético (neste caso podendo utilizar a configuração de feixe em linha ou então, perpendicular ou mesmo, paralelo) para o estudo de densidade e/ou umidade. Algumas fontes radioativas, emissoras de radiação gama, foram utilizadas em medidas com solos, como por exemplo: ^{60}Co - cobalto (GARDNER & CALISSENDORFF, 1967 apud PHOGAT et al., 1991 e APPOLONI & RIOS, 1994), ^{137}Cs - cézio e/ou ^{241}Am - amerício (FERGUSON & GARDNER, 1962; GURR, 1962; COREY et al., 1971; GARDNER et al., 1972; MANSELL et al., 1973; BRIDGE & COLLIS-GEORGE, 1973; NOFZIGER & SWARTZENDRUBER, 1974; REGINATO, 1974; CAVALCANTE, 1978; NOFZIGER, 1978; SOUZA et al., 1991; OLIVEIRA, 1991; PHOGAT et al., 1991; LUO & WELLS, 1992a; WELLS & LUO, 1992b; VAZ et al., 1992 e APPOLONI & RIOS, 1994), ^{169}Yb - itérbio (PHOGAT et al., 1991) e ^{144}Ce - cério (GARDNER & CALISSENDORFF, 1967 apud PHOGAT et al., 1991). FERRAZ & MANSELL (1979), indicam outros radioisótopos que podem ser aplicados nas pesquisas utilizando o processo de atenuação da radiação gama: ^{109}Cd - cádmio, ^{134}Cs - cézio, ^{210}Pb - chumbo, ^{192}Ir - irídio, ^{203}Hg - mercúrio, ^{22}Na - sódio e ^{170}Tm - túlio. No caso de se utilizar feixe de dupla energia é importante colimar duas fontes com energias bem distintas. NOFZIGER (1978), mostrou que grandes erros podem ocorrer na estimativa da umidade e densidade nas medidas realizadas com sistema gama de dupla energia, com solos muito estratificados, principalmente quando na amostra de solo ocorrerem variações crescentes ou decrescentes de umidade e de densidade no mesmo sentido. As configurações utilizando sistemas com feixe gama monoenergético ou dupla energia, fornecem a umidade média apenas na extensão percorrida pelo feixe gama na amostra de solo.

Através de medidas de condutividade hidráulica de solos, obtidas com auxílio da técnica de atenuação da radiação gama, este trabalho tem por objetivos: a) fazer uma análise crítica dos métodos de determinação da condutividade hidráulica de solo, tais como, os de HILLEL et al. (1972), LIBARDI et al. (1980) e SISSON et al. (1980); b) verificar o comportamento da

condutividade hidráulica, no processo de redistribuição da água, em relação à profundidade para três solos com diferentes granulometrias, compactados em colunas; c) analisar as implicações da hipótese do gradiente unitário do potencial total da água nos resultados obtidos.

2 - TEORIA

2.1 - Solo

O termo solo refere-se à porção da camada externa da superfície terrestre, fragmentada e sujeita ao intemperismo. Sua formação é devida à desintegração e decomposição de rochas por processos físicos, químicos e biológicos ao longo do tempo, influenciados também pelo relevo. Sofre a influência da atividade e acúmulo de vários resíduos provenientes de plantas e animais, em níveis macroscópicos e microscópicos. Segundo CAMPBELL (1985), solo é um sistema trifásico, composto de sólidos, líquidos e gases. A fase sólida, ou matriz do solo, contém partículas minerais e materiais orgânicos. A fase líquida, ou solução do solo, consiste de água e minerais dissolvidos, e a fase gasosa, ou atmosfera do solo, é composta de aproximadamente de 80 % de nitrogênio, com oxigênio e dióxido de carbono totalizando os 20 % restantes.

A análise granulométrica do solo, que consiste na classificação das partículas tão somente quanto ao seu tamanho, permite estudar a sua textura e classificá-lo do ponto de vista físico. As partículas do solo são divididas em três frações de tamanho, chamadas frações texturais: areia, limo ou silte e argila. Segundo KIEHL (1979), o termo silte foi adotado pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, em substituição à tradicional denominação limo. As classificações texturais do solo, são realizadas de acordo com escalas propostas pela Sociedade Internacional de Ciência do Solo e pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América do Norte (U.S.D.A.), sendo esta última a mais empregada no Brasil. Na figura (2.1), são apresentadas ambas as escalas para efeito de comparação.

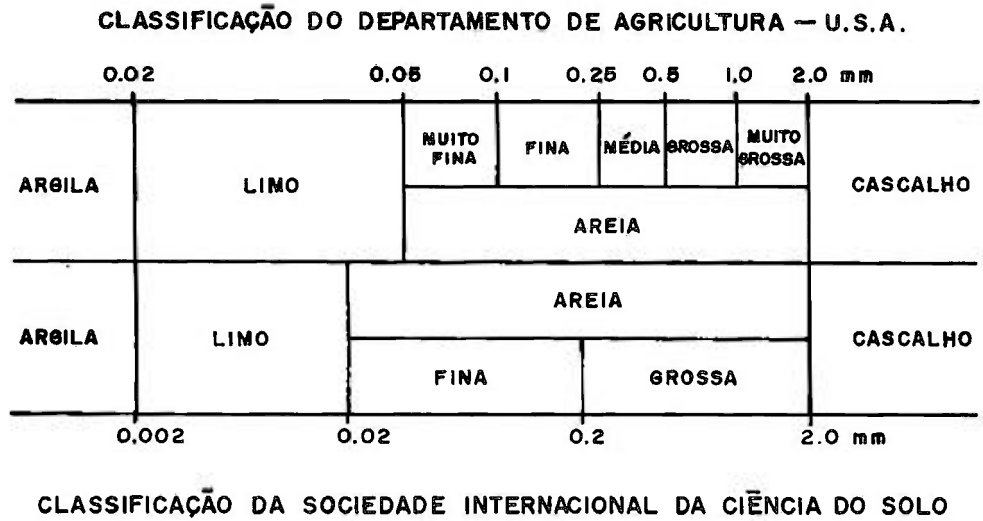


Figura 2.1: Classificações texturais do solo. Escala superior proposta pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos. Escala inferior proposta pela Sociedade Internacional da Ciência do Solo.

Para a descrição física de uma amostra de solo, são utilizadas algumas relações entre a massa e o volume das três frações, a saber:

a) **densidade das partículas**, d_p (dimensão ML^{-3})

$$d_p = \frac{m_p}{V_p} \quad (2.1)$$

onde

m_p é a massa das partículas sólidas

V_p é o volume ocupado pelas partículas sólidas.

Na ciência do solo é usual utilizar a denominação densidade como sinônimo de massa específica. Na realidade trata-se da massa específica das partículas do solo. É uma densidade média dos diferentes tipos de partículas que constituem a fase sólida. Para a maioria dos solos minerais encontra-se, principalmente:

feldspatos	-	2500 - 2600 Kg.m ⁻³ ;
micas	-	2700 - 3000 Kg.m ⁻³ ;
quartzos	-	2500 - 2800 Kg.m ⁻³ ; e
minerais de argila	-	2200 - 2600 Kg.m ⁻³ , cujo

valor médio é 2650 Kg.m⁻³.

Este valor aumenta quando o solo contém alta porcentagem de minerais, como dióxido de manganês e dióxido de titânio e diminui quando aumenta o seu teor de matéria orgânica. A matéria orgânica do solo tem densidade de partícula no intervalo de 1330 a 1500 Kg.m⁻³ (LIBARDI, 1995).

b) **densidade do solo** d_s (dimensão ML⁻³), é um índice do grau de compactação de um solo, pois é determinada considerando o volume total V_t da amostra de solo, isto é, incluindo o volume de poros:

$$d_s = \frac{m_p}{V_t} \quad (2.2)$$

O volume total de uma amostra de solo pode ser expresso como a soma dos volumes de sólidos, de água e de ar: $V_t = V_p + V_l + V_g$. Para um solo seco, tem-se o componente volume de água igual a zero ($V_l = 0$) e desta forma, o volume total pode ser então escrito em função do volume do espaço poroso $V_{po} = V_t - V_p$, que é ocupado pelo ar.

c) **porosidade total** α (dimensão $L^3 L^{-3}$), que é uma medida do espaço poroso, relacionada ao volume total da amostra:

$$\alpha = \frac{V_{po}}{V_t} = \frac{V_t - V_p}{V_t} \quad (2.3)$$

Com as definições densidade de partícula e densidade do solo, a expressão para porosidade total pode ser então escrita na forma seguinte:

$$\alpha = \left(1 - \frac{d_s}{d_p}\right) \quad (2.4)$$

Conhecendo-se então as densidades de um solo e de suas partículas, pode-se estimar a sua porosidade total α pela equação dada acima. Com esta equação verifica-se também que, quanto maior a densidade de um solo, menor será sua porosidade, sendo portanto, um índice de estimativa da compactação de um solo.

d) **umidade à base de massa** U (dimensão MM^{-1}):

$$U = \frac{m_l}{m_p} = \frac{m_u - m_p}{m_p} \quad (2.5)$$

onde

m_l é a massa de água no solo

m_u é a massa do solo úmido.

e) **umidade à base de volume** θ (dimensão $L^3 L^{-3}$), volume de água por volume de solo:

$$\theta = \frac{V_l}{V_t} = \frac{m_l}{d_a V_t} = \frac{m_u - m_p}{d_a V_t} \quad (2.6)$$

A relação entre a umidade à base de massa e à base de volume é:

$$\theta = \frac{U \cdot d_s}{d_a} \quad (2.7)$$

Nas duas equações acima, utilizou-se o valor de $d_a = 1000 \text{ Kg.m}^{-3}$ para a densidade da água.

f) **armazenagem de água no solo** W (dimensão L^{-1}), representa a quantidade de água, expressa em termos de altura de água, existente em qualquer camada de um perfil de solo:

$$W = \int_0^L \theta(z) dz \cong \theta^* L \quad (2.8)$$

onde θ^* é a umidade média do perfil do solo desde zero a L .

g) **princípio de retenção da água no solo** : basicamente existem dois principais processos que explicam a retenção da água pelos solos. A retenção ocorre nos microporos (diâmetro menor que $30 \mu m$) dos agregados e está relacionada com o fenômeno da capilaridade, ou ainda, a retenção ocorre nas superfícies dos sólidos do solo como filmes (película de água) adsorvidos às suas superfícies, processo chamado de adsorção. Assim, as forças mátricas que originam o potencial matricial (ou mátrico) são compostas, principalmente, das forças capilares e de adsorção. A separação do potencial matricial nestes dois componentes (adsorção e capilaridade) é praticamente impossível na faixa de umidade do solo encontrada para o desenvolvimento de uma cultura, mas pode-se dizer que logo após a drenagem livre de um solo saturado no campo, as forças capilares são dominantes e que, à medida que o solo seca, a partir daí, a adsorção vai adquirindo maior importância (LIBARDI, 1995).

2.2 - Radiação gama

As radiações (alfa, beta e gama) emitidas pelos núcleos atômicos podem atravessar uma certa espessura de matéria antes de dissiparem totalmente suas energias iniciais. Para um corpo sólido, a ordem dessa espessura pode ser de centímetros para raios gama, de milímetros para partículas beta e centésimos de milímetro para partículas alfa. Este limitado poder de penetração, está relacionado com as interações da radiação com a matéria a qual atravessa. As partículas carregadas (alfa e beta) dissipam sua energia continuamente em uma sequência de muitas ionizações e eventos de excitação, enquanto que, com a radiação gama ocorre absorção completa ou seu espalhamento na interação com a matéria. A radiação gama é uma onda eletromagnética e sua energia é dada por $E = h\nu$, (h é a constante de Planck: $6,626 \times 10^{-34}$ J.s, ν (Hz) é a frequência da radiação gama). A frequência é dada por $\nu = c/\lambda$, onde c (m.s^{-1}) é a velocidade da luz no vácuo e λ (m) o comprimento de onda.

Há vários processos de interação da radiação gama com a matéria; sendo três os mais representativos para a detecção desta radiação, os quais são: efeito fotoelétrico, espalhamento Compton e produção de pares. Todos estes processos de interação, produzem uma transferência completa ou parcial da energia de um fóton para um elétron. Estes processos, então ocasionam, ou o desaparecimento do fóton ou seu espalhamento para fora da direção de interesse.

No **efeito fotoelétrico**, o fóton é completamente absorvido e toda sua energia $E = h\nu$ é transferida a um elétron ligado,

que escapa do átomo com uma energia cinética T_e , igual à diferença entre a energia do fóton e a energia de ligação b_e do elétron no átomo, conforme equação abaixo:

$$T_e = h\nu - b_e \quad (2.9)$$

O efeito fotoelétrico (figura 2.2) ocorre, preferencialmente, com elétrons na camada **K**, os quais têm uma energia de ligação maior [115 keV no Urânio, 7.1 keV no Ferro e 0,28 keV no Carbono (SANZ, 1970)]. O buraco na camada **K** é preenchido por outro elétron proveniente de camada mais periférica havendo a emissão de um raio **X** ou de um elétron Auger. O elétron Auger é produzido, quando ocorre um efeito fotoelétrico interno no átomo, devido ao raio **X**, tendo um alcance curto no meio, devido à sua baixa energia. A atenuação fotoelétrica varia de maneira complexa com a energia do fóton ($= h\nu$) e com o valor de **Z** (número atômico) do absorvedor, ou seja, é maior para baixas energias e cresce rapidamente com o número atômico **Z** do átomo em questão.

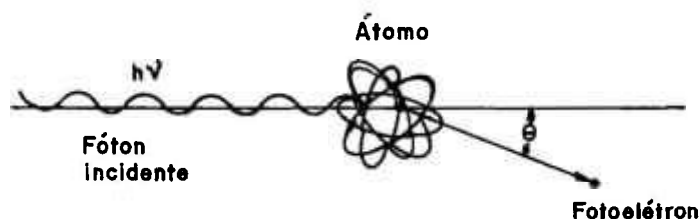


Figura 2.2: Diagrama do efeito fotoelétrico.

O **efeito Compton** é uma interação entre o fóton e um elétron de muito baixa energia de ligação ou livre. Considera-se como elétron livre aquele que, quando a energia do fóton é muito maior que a energia de ligação do elétron no átomo. O espalhamento Compton, ao contrário do efeito fotoelétrico, geralmente envolve elétrons das camadas mais externas do átomo. O efeito Compton começa ter importância à medida que a energia do fóton aumenta, diminuindo desta forma a contribuição do efeito fotoelétrico.

No processo Compton, o fóton incidente cede ao elétron uma parte de sua energia $h\nu$, adquirindo uma nova frequência ν^* e, conseqüentemente, uma menor energia $h\nu^*$, desviando-se de sua trajetória inicial, conforme figura 2.3 abaixo.

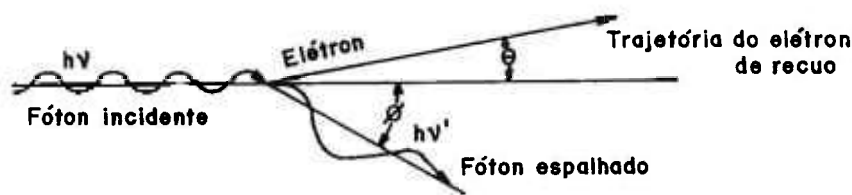


Figura 2.3: Diagrama do efeito Compton.

O fóton é espalhado em um ângulo ϕ entre suas direções original e final enquanto que o elétron se afasta em uma direção fazendo um ângulo θ com a do fóton incidente. As trajetórias do fóton incidente, do fóton espalhado e do elétron estão sempre no mesmo plano. Uma útil e conveniente relação, derivada das condições relativísticas das equações de

conservação do momento angular e da energia, é dada abaixo:

$$h\nu^* = \frac{h\nu}{1 + (h\nu/m_0c^2).(1 - \cos\phi)} \quad (2.10)$$

onde m_0c^2 (0.511 MeV) representa a energia da massa de repouso do elétron.

Fazendo $\alpha = h\nu/m_0c^2$, a energia $E^* = h\nu^*$ do fóton espalhado é igual a:

$$E^* = \frac{E}{1 + \alpha(1 - \cos\phi)} \quad (2.11)$$

O fóton espalhado pode interagir novamente com a matéria e toda sua energia pode ser ou não absorvida no meio. A energia cinética T do elétron espalhado, dada pela equação (2.9), pode ser expressa em função de ϕ , pela equação:

$$T = \frac{\alpha E(1 - \cos\phi)}{1 + \alpha(1 - \cos\phi)} \quad (2.12)$$

Dois casos extremos podem ser verificados com as duas equações acima:

a) um ângulo de espalhamento rasante do fóton, ou seja, $\phi \cong 0$. As equações fornecem que $h\nu^* \cong h\nu$ e $T \cong 0$. Nesta situação, o elétron que interagiu com o fóton tem uma energia pequena e o fóton espalhado tem, aproximadamente, a mesma energia do fóton incidente.

b) uma colisão frontal do fóton, ou seja, $\phi = \pi$. Neste caso, o fóton é espalhado para trás, na mesma direção de origem, enquanto que o elétron recua ao longo da direção de incidência do fóton. Este extremo, representa o máximo de energia que pode ser transferido a um elétron, numa interação Compton.

Na produção de par, o fóton interage com o núcleo do átomo alvo e desaparece totalmente. Há a criação de um par elétron-pósitron (figura 2.4), ou seja, trata-se de uma transformação de energia em matéria, de acordo com a fórmula de equivalência de Einstein ($E=mc^2$). A energia $2m_0c^2 = 1,02 \text{ MeV}$ é limiar para o processo, sendo esta a energia de massa de repouso necessária para criar o par elétron-pósitron. Este processo de interação,

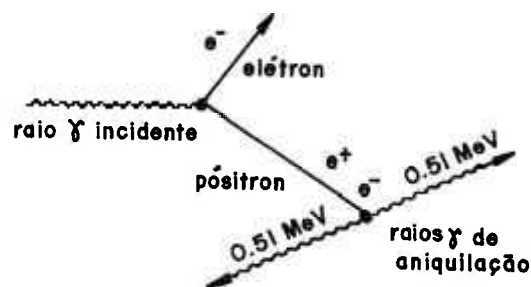


Figura 2.4: Diagrama do processo de produção de par.

apesar de importante, só ocorre quando se usa feixes de radiação com fótons de energia maior que 1,02 MeV, como por exemplo, com a fonte de ^{60}Co - Cobalto. No presente trabalho é utilizada a fonte de ^{137}Cs - Césio, cuja energia está bem abaixo deste valor. A atenuação é, neste caso, devida somente aos processos fotoelétrico e Compton.

A interação da radiação gama com a matéria em termos globais é regida pela lei de Lambert-Beer. Quando um feixe de radiação gama monoenergético atravessa um material homogêneo de massa específica ρ , seus fótons interagem com os elétrons, núcleos e campos elétricos do material ou meio. Desta forma, o número de fótons incidentes I , sofre um processo de atenuação. A fração $-dI/I$ de fótons atenuados é diretamente proporcional à espessura dx do material atravessado pelo feixe, ou seja:

$$\frac{dI}{I} = -(\mu_f^* + \mu_c^* + \mu_p^*) \cdot dx \quad (2.13)$$

onde a constante μ^* de proporcionalidade é chamada de coeficiente de atenuação linear. O coeficiente de atenuação linear μ^* (de dimensão L^{-1}), tem seu valor dependente da energia da radiação gama, da massa específica do material atenuador e de sua composição química. Em função dos coeficientes parciais de atenuação para os dois principais processos de interação vistos acima, pode-se escrever μ^* na forma seguinte, considerando seus efeitos aditivos:

$$\mu^* = \mu_f^* + \mu_c^* \quad (2.14)$$

onde os subscritos f e c , representam os efeitos fotoelétrico e Compton., respectivamente. A título de exemplo, na figura 2.5 abaixo, tem-se representado, para o Pb (chumbo), cada componente do coeficiente de atenuação total em função da energia e também o coeficiente de atenuação total μ^* .

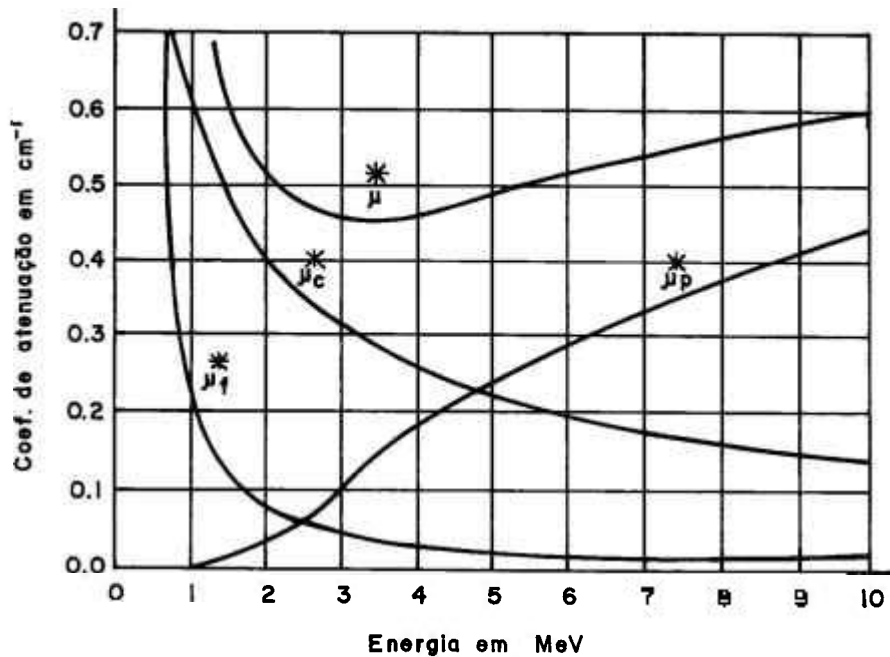


Figura 2.5: Coeficientes de atenuação linear no chumbo em função da energia da radiação gama: μ_f^* => referente ao efeito fotoelétrico; μ_c^* => efeito Compton; μ_p^* => produção de par; μ^* => coeficiente de atenuação linear total.

O uso do coeficiente de atenuação linear μ^* torna-se limitado, dada sua relação com a massa específica do material absorvedor.

Assim, o coeficiente de atenuação de massa μ , é definido por:

$$\mu = \frac{\mu^*}{\rho} \quad (2.15)$$

onde ρ , é a massa específica do material absorvedor. O coeficiente de atenuação de massa μ (dimensão $L^2 M^{-1}$) é, geralmente, independente do estado físico do material, para uma dada energia do raio gama.

Da integração da equação (2.13), entre os limites I_0 (taxa de radiação gama incidente) e I (taxa de radiação gama transmitida) para intensidade de feixe e, entre os limites 0 (zero) e x para espessura de material atenuador (figura 2.6), resulta a lei de Lambert-Beer:

$$I = I_0 \cdot e^{-\rho \cdot \mu \cdot x} \quad (2.16)$$

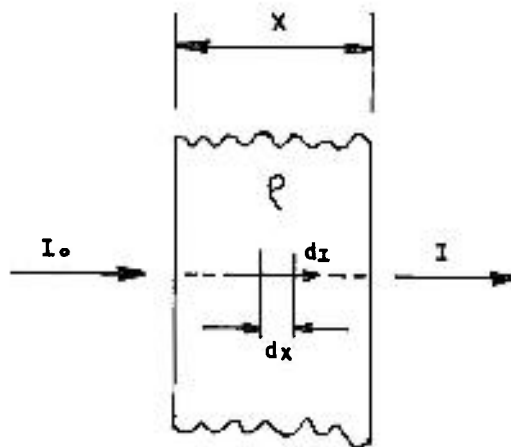


Figura 2.6: Esquema de atenuação de um feixe gama monoenergético em uma amostra qualquer de massa específica ρ e espessura x na direção do feixe. (Lei de Lambert-Beer).

Considerando o solo material atenuador, o coeficiente de atenuação de massa μ corresponde ao coeficiente de um material composto dos vários componentes químicos da fração sólida, da água e do ar. Considerando sua aditividade, o coeficiente final é dado por:

$$\mu = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \left(\frac{\mu^*}{d} \right)_i \quad (2.17)$$

onde os fatores w_i representam as frações de cada componente i presente no material. No presente estudo, será utilizado um coeficiente de atenuação global, simbolizado por μ_p , correspondente à atenuação do feixe gama apenas pelo conjunto dos componentes sólidos do solo, o qual tem uma densidade d . Já foi dito que, na ciência do solo é usual a denominação densidade como sinônimo de massa específica. Trata-se da massa específica média das partículas sólidas do solo, ou seja, é uma densidade média dos diferentes tipos de partículas que definem a fase sólida. Para diferenciar a água, seu coeficiente será considerado em separado e simbolizado por μ_a . O coeficiente de atenuação do ar será considerado desprezível.

Para o caso da determinação do coeficiente de atenuação de massa da água (μ_a), basta colocar uma amostra de água interagindo com um feixe monoenergético colimado de radiação gama, como mostra a figura 2.7.

Neste caso, tem-se:

$$\ln \frac{I}{I_0} = -x \cdot d_a \cdot \mu_a \quad (2.18)$$

onde

I_0 é a intensidade do feixe incidente na água (cps)

I é a intensidade do feixe transmitido da água (cps)

e

d_a é a densidade da água ($\text{Kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

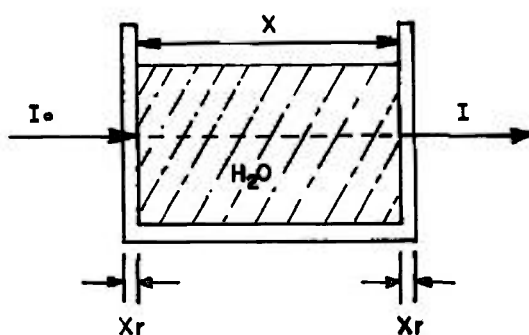


Figura 2.7: Esquema de determinação do coeficiente de atenuação de massa da água, no processo de interação com feixe monoenergético de radiação gama: $I_0 \Rightarrow$ feixe incidente; $I \Rightarrow$ feixe transmitido; $x \Rightarrow$ espessura da amostra de água na caixa na direção do feixe gama; $x_r \Rightarrow$ espessura das paredes da caixa na direção do feixe gama.

A variância de uma estimativa de μ_a , simbolizada por $\sigma^2 \mu_a$, foi obtida por propagação de erros na equação (2.18), ou seja:

$$\sigma^2 \mu_a = \left(\frac{\partial \mu_a}{\partial x} \right)^2 \cdot \sigma^2_x + \left(\frac{\partial \mu_a}{\partial d_a} \right)^2 \cdot \sigma^2_{d_a} + \left(\frac{\partial \mu_a}{\partial I_0} \right)^2 \cdot \sigma^2_{I_0} + \left(\frac{\partial \mu_a}{\partial I} \right)^2 \cdot \sigma^2_I \quad (2.19)$$

Considerando a massa específica da água constante e exata, obtém-se as derivadas abaixo, da equação (2.18):

$$\frac{\partial \mu_a}{\partial d_a} = 0$$

$$\frac{\partial \mu_a}{\partial x} = -\frac{1}{x^2 \cdot d_a} \ln \frac{I_0}{I}$$

$$\frac{\partial \mu_a}{\partial I} = -\frac{1}{x \cdot d_a \cdot I}$$

$$\frac{\partial \mu_a}{\partial I_0} = -\frac{1}{x \cdot d_a \cdot I_0}$$

Substituindo estas derivadas parciais na equação (2.19), tem-se então a expressão para a variância da estimativa do coeficiente de

atenuação de massa da água.

Para o caso da determinação do coeficiente de atenuação de massa das partículas sólidas μ_p , o ideal seria utilizar um solo seco (amostra submetida à uma temperatura pouco maior que a temperatura de vaporização da água, 378,15 K, pelo tempo necessário para que tenha massa constante), mas como o aquecimento do solo pode alterar seus constituintes, a prática mais recomendada é utilizar um solo seco ao ar, com uma umidade residual θ_r , definida na equação (2.6).

Para uma amostra deformada de solo seco ao ar e em um feixe monoenergético colimado de radiação gama, pode-se descrever matematicamente o processo de atenuação de fótons, utilizando a equação de Lambert-Beer, conforme mostra-se na figura 2.8, desprezando a atenuação do ar.

$$\ln \frac{I}{I_0} = -x \cdot \mu_a \cdot \theta_r - x \cdot \mu_p \cdot d_s = -x_a \cdot \mu_a \cdot d_a - x_p \cdot \mu_p \cdot d_p \quad (2.20)$$

onde:

x é a espessura de solo atravessada pelo feixe

x_p é o somatório das espessuras de partículas sólidas atravessadas pelo feixe

x_a é o somatório das espessuras de água atravessadas pelo feixe

d_s é a densidade do solo, definida na equação (2.2)

$$d_a = 1000 \text{ Kg.m}^{-3}$$

d_p é a densidade das partículas do solo, definida na equação (2.1)

θ_r é a umidade residual do solo seco ao ar, definida na equação (2.6)

I_0 é a intensidade do feixe incidente no solo (cps)

I é a intensidade do feixe transmitido do solo (cps)

Da equação (2.20) acima, obtém-se a expressão para o coeficiente de atenuação de massa do solo μ_p :

$$\mu_p = \frac{1}{x \cdot d_s} \cdot \left\langle \ln \frac{I_0}{I} - x \cdot \mu_a \cdot \theta_r \right\rangle \quad (2.21)$$

Realizando a propagação de erros na equação acima, é possível determinar a expressão para a variância da estimativa do coeficiente de atenuação de massa do solo, $\sigma^2_{\mu_p}$. Os termos mais importantes para o seu cálculo estão relacionados à espessura x , à taxa de contagens I_0 para o recipiente vazio e à taxa de contagens I para o recipiente com solo. A expressão final para $\sigma^2_{\mu_p}$ é apresentada na equação (2.22).

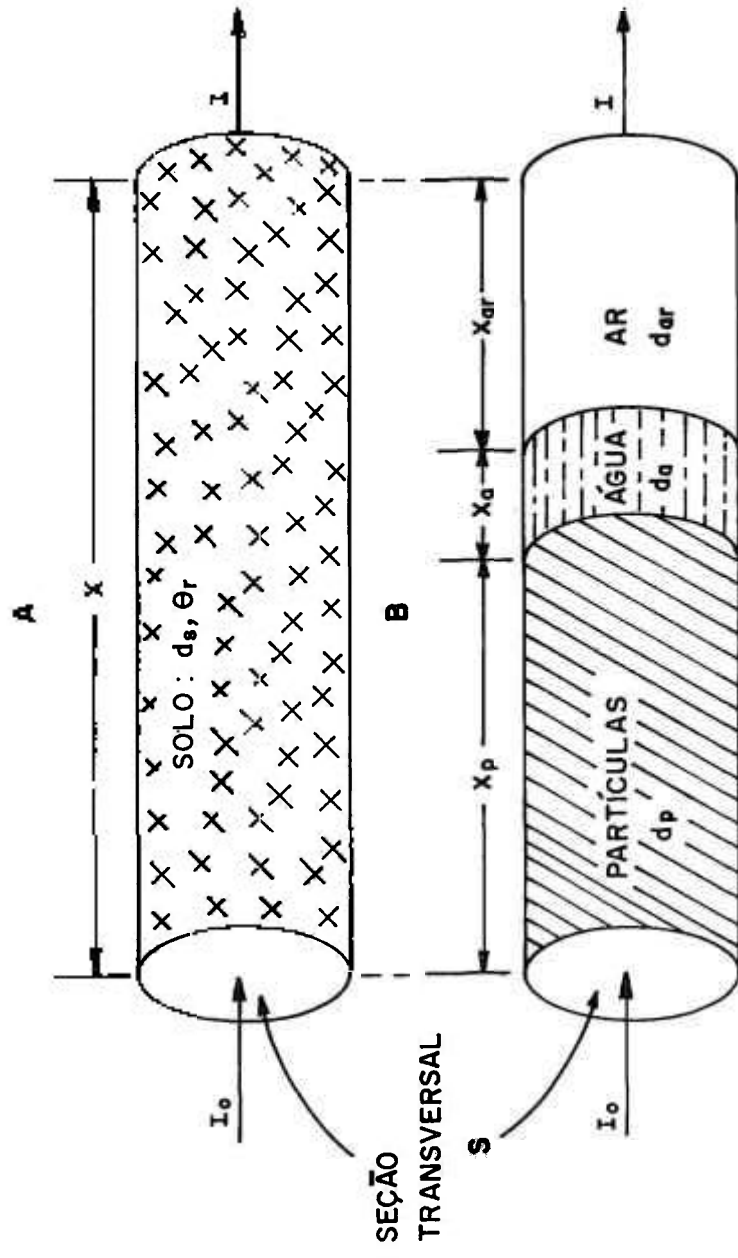


Figura. 2.8: Esquema do volume de solo ($V = x.S$) atravessado por um feixe de radiação gama de seção transversal S e de intensidades I_0 e I , incidente e transmitido, respectivamente. A) considerando o solo como um todo; B) considerando as três frações em separado.

$$\sigma^2 \mu_p = \left(-\frac{1}{x^2 \cdot d_s} \cdot \ln \frac{I_0}{I} \right)^2 \cdot \sigma^2 x + \left(\frac{1}{x \cdot d_s \cdot I_0} \right)^2 \cdot \sigma^2 I_0 + \left(-\frac{1}{x \cdot d_s \cdot I} \right)^2 \cdot \sigma^2 I \quad (2.22)$$

Conhecidos os valores de μ_a e μ_p a equação (2.20) pode ser utilizada para determinações da densidade do solo d_s e de sua umidade, em outras situações. No caso de feixe gama monoenergético, há a necessidade de conhecer um destes parâmetros para se determinar o outro. Já em caso de feixe gama de dupla energia, desde que os coeficientes μ_a e μ_p sejam diferentes para cada energia, é possível determinar ambos parâmetros θ e d_s , simultaneamente. No presente trabalho, não houve a possibilidade de se utilizar feixe duplo e, por isso, optou-se em determinar previamente d_s em amostras de solo secas ao ar. Neste caso:

$$d_s(z) = \frac{1}{x \cdot \mu_p} \cdot \left[\ln \frac{I_0}{I} - x \cdot \mu_a \cdot \theta_r \right] \quad (2.23)$$

onde z é a coordenada de posição dentro da amostra de solo.

Também é assumido que o solo é um material poroso rígido e, como consequência, a densidade do solo é invariante no tempo, mesmo durante os processos de infiltração e de redistribuição da água

As contribuições mais importantes para a variância de uma medida de densidade do solo $\sigma^2 d_s$ vêm da taxa de contagens I_0 , da

taxa de contagens I e do coeficiente de atenuação de massa μ_p do solo:

$$\sigma^2 d_s = \left(-\frac{1}{x \mu_p} \ln \frac{I_0}{I} - x \mu_a \cdot \theta_r \right)^2 \sigma^2 \mu_p + \left(\frac{1}{x \mu_p I_0} \right)^2 \sigma^2 I_0 + \left(-\frac{1}{x \mu_p I} \right)^2 \sigma^2 I \quad (2.24)$$

Conhecida a densidade do solo d_s nas posições em que se pretende medir a umidade θ , pode-se determinar a umidade do solo durante os processos de infiltração e de redistribuição da água:

$$\theta(z, t) = \frac{1}{x \cdot \mu_a} \cdot \left[\ln \frac{I_0}{I} - x \cdot \mu_p \cdot d_s \right] \quad (2.25)$$

onde t representa o tempo.

A variância das estimativas de umidade do solo $\sigma^2 \theta$ pode ser estimada através da expansão de erros da equação acima. Verificou-se que, as mais importantes contribuições são as relacionadas à espessura x , à taxa de contagens I com a coluna com o solo molhado e à densidade d_s do solo seco:

$$\sigma^2 \theta = \left(-\frac{1}{x \cdot \mu_a} \cdot \ln \frac{I_0}{I} \right)^2 \cdot \sigma^2 x + \left(-\frac{1}{x \cdot \mu_a \cdot I} \right)^2 \cdot \sigma^2 I + \left(-\frac{\mu_p}{\mu_a} \right)^2 \cdot \sigma^2 d_s \quad (2.26)$$

2.3 - Medida da condutividade hidráulica do solo

Em laboratório utilizando material poroso saturado, DARCY(1856), encontrou uma relação de proporcionalidade entre a densidade de fluxo de água e o gradiente hidráulico que atua sobre a água. A constante de proporcionalidade foi denominada de condutividade hidráulica saturada. Para o fluxo de água em um meio poroso não saturado, BUCKINGHAM (1907), obteve de seus resultados experimentais (colunas com solo não saturado) uma equação semelhante. SWARTZENDRUBER (1969) denominou-a de equação de DARCY-BUCKINGHAM. Para o fluxo de água em uma amostra de solo de estrutura rígida tem-se:

$$\vec{q} = -K(\theta) \text{grad } H \quad (2.27)$$

onde

$\vec{q}$ é a densidade de fluxo de água no solo (LT^{-1})

$\text{grad } H$ é o vetor gradiente de potencial hidráulico (L.L^{-1})

$K(\theta)$ é a condutividade hidráulica da amostra (LT^{-1}) de solo, considerada função apenas da umidade do solo, uma vez que o meio poroso é considerado rígido. Neste trabalho, umidade volumétrica θ já definida pela equação (2.25), é medida nas colunas de solo através da técnica da

atenuação da radiação gama.

H , que é o potencial total da água no solo, é energia medida em termos de carga hidráulica, isto é, energia por unidade de peso $[(M.L^2.T^{-2})/(M.L.T^{-2})=L]$ que representa a soma dos potenciais matricial $[h]$, dimensão L e gravitacional $[z]$, dimensão L da água. O potencial matricial h é o resultado do efeito combinado de mecanismos de interação entre a água e a fração sólida do solo, destacando-se entre eles a capilaridade e a adsorção. Sua descrição analítica é bastante complicada, fato este que leva a sua determinação ser experimental. O potencial matricial $h(\theta)$ é geralmente determinado em laboratório utilizando mesa de tensão, funil de placa porosa e câmara de Richards. Está relacionado com a umidade, através de uma função caracterizada como curva de retenção.

O sinal negativo na equação (2.27) indica que o sentido do fluxo de água é oposto ao sentido do gradiente do potencial hidráulico, indicando que o movimento da água se realiza de um maior estado de energia da água para um menor.

A equação da continuidade indica que as variações do teor de água θ no decorrer do tempo, em um elemento de volume de solo, estão relacionadas com a variação da densidade de fluxo $\vec{q}$ de água no espaço neste elemento, o que, em linguagem vetorial, representa o divergente:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\text{div } \vec{q} \quad (2.28)$$

A equação (2.27) de DARCY-BUCKINGHAM substituída na equação da continuidade (2.28) para fluxo de água apenas na direção vertical z ,

resulta em:

$$\frac{\partial \theta(z, t)}{\partial t} = \frac{\partial \left\{ K(\theta) \frac{\partial H(z, t)}{\partial z} \right\}}{\partial z} \quad (2.29)$$

que é a equação de RICHARDS (1931). Esta equação diferencial descreve o fluxo de água unidimensional, isotérmico para solos rígidos não saturados. Para o caso especial de um perfil de solo sob drenagem, que anteriormente sofreu infiltração de água em $z = 0$ até o equilíbrio dinâmico, a equação de RICHARDS pode ser integrada em relação à profundidade, de $z = z_1$ a $z = z_2$ e para um tempo qualquer t , permitindo explicitar o parâmetro de interesse $K(\theta)$:

$$\int_{z_1}^{z_2} \frac{\partial \theta}{\partial t} dz = \left\langle K(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \right\rangle_{z_2} - \left\langle K(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \right\rangle_{z_1} \quad (2.30)$$

No caso de prevenir perdas por evaporação, em $z = z_1 = 0$ (superfície do solo) através de uma cobertura impermeável à água, a equação acima pode ser reescrita para $z_2 = L$.

$$\int_0^L \frac{\partial \theta}{\partial t} dz = \left\langle K(\theta) \frac{\partial H}{\partial z} \right\rangle_{z_2=L} \quad (2.31)$$

Isolando a função condutividade hidráulica $K(\theta)$ obtém-se:

$$K[\theta(z,t)]_L = \frac{\int_0^L \frac{\partial \theta(z,t)}{\partial t} dz}{\left\langle \frac{\partial H(z,t)}{\partial z} \right\rangle_L} \quad (2.32)$$

Assim, conhecendo-se o fluxo de água e o gradiente do potencial total, para $z = L$ a equação acima permite calcular a condutividade hidráulica na profundidade desejada, para diferentes valores de θ .

Os métodos de HILLEL et al.(1972), LIBARDI et al.(1980) e SISSON et al.(1980) que foram utilizados neste trabalho para a determinação de $K(\theta)$, baseiam-se na equação (2.32), ou seja, consideram a equação de RICHARDS [equação (2.29)] adequada para a descrição do fluxo unidimensional de água.

A relação exponencial para a condutividade hidráulica em função da umidade se adapta muito bem para a maioria dos solos. Ela foi utilizada por HILLEL et al. (1972), faz parte integrante da metodologia de

$$K(\theta) = K_s e^{\gamma(\theta - \theta_s)} \quad (2.33)$$

LIBARDI et al. (1980) e também é uma das formas sugeridas em SISSON et al. (1980).

Nos métodos que serão descritos abaixo, a umidade no solo, pode ser determinada por sonda de nêutrons, tensiometria, atenuação da radiação gama e outras técnicas. O potencial total pode ser medido via tensiometria, pela curva de retenção da água obtida em laboratório utilizando cilindros volumétricos com amostra do solo deformado ou indeformado, e por outras metodologias. Neste trabalho, a umidade volumétrica do solo foi determinada em laboratório pela técnica de atenuação da radiação gama. O potencial total foi calculado utilizando a curva de retenção da água no solo, obtida em laboratório (mesa de tensão e câmara de Richards), com amostras de solo deformado em cilindros volumétricos.

Como os métodos de determinação da condutividade hidráulica $K(\theta)$ referem-se a solos homogêneos e, como o objetivo central deste trabalho é fazer uma análise crítica dos métodos de HILLEL et al.(1972), LIBARDI et al.(1980) e SISSON et al.(1980), utilizou-se para os testes de determinação de $K(\theta)$ colunas de solo deformado, preparadas de forma mais homogênea possível.

2.3.1 - Método de HILLEL et al.(1972)

O método de HILLEL et al.(1972) para a determinação da condutividade hidráulica $K(\theta)$, utiliza a equação (2.32) que é uma razão entre o fluxo de água q e o gradiente do potencial total $H = h + z$ na posição $z = L$ e mostra um procedimento, atualmente desatualizado, que utiliza diferenças finitas com aproximações muito grosseiras. Sem alterar o método original, pode-se obter uma expressão mais simples para a equação (2.32), utilizando-se dos seguintes procedimentos:

- a) a curva de redistribuição da água no solo θ versus t (umidade

volumétrica versus tempo) para uma profundidade fixa $z = L$ tem um comportamento exponencial decrescente no transcorrer do tempo, conforme mostra a figura 2.9a, obtida neste trabalho com a coluna de solo LVa (latossolo vermelho-amarelo) para a profundidade $z = 0,10$ m. Uma forma de linearizar a curva θ versus t é a transformação da variável t em $\ln t$ (figura 2.9b):

$$\theta_s(z) - \theta(z, t) = A_z \ln t + B_z \quad (2.34)$$

onde A_z e B_z são constantes a serem ajustadas por técnicas de minimização de desvios. A constante θ_s é o valor da umidade de saturação do solo para a mesma profundidade z . Calculando-se a derivada $(\partial \theta / \partial t)_z$ tem-se:

$$\left[\frac{\partial \theta(t)}{\partial t} \right]_z = -\frac{A_z}{t} \quad (2.35)$$

que substituída no numerador da equação (2.32) e aproximada por diferenças finitas em relação à profundidade resulta em:

$$\int_0^L \frac{\partial \theta(z, t)}{\partial t} dz \cong - \sum_{z=0}^{z=L} \frac{A_z}{t} \Delta z \quad (2.36)$$

que representa o fluxo de água para a profundidade $z = L$ no tempo t . Δz representa o incremento de profundidade utilizado nas medidas de umidade do

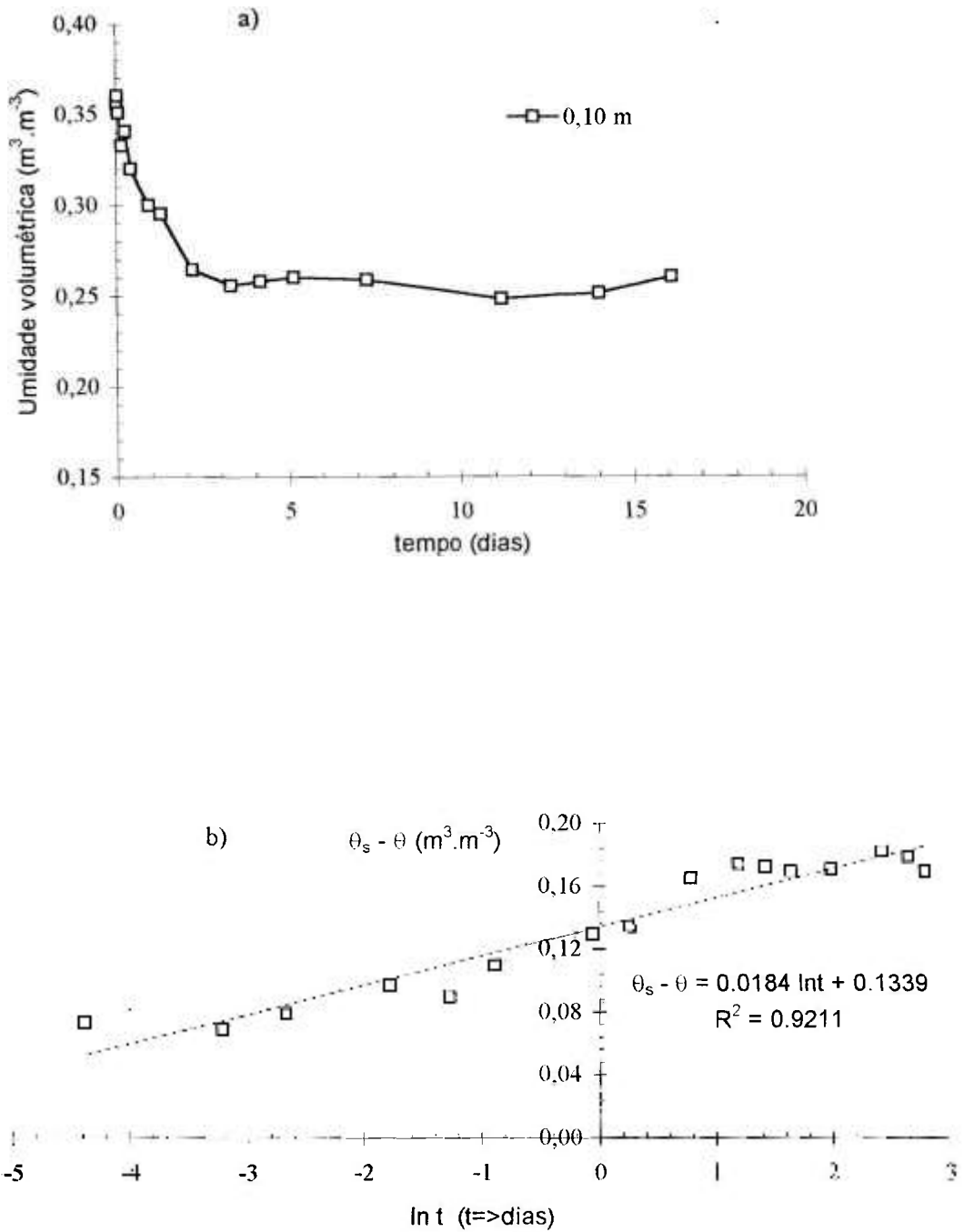


Figura 2.9: a) Umidade volumétrica em função do tempo de redistribuição e b) $\theta_s - \theta$ versus $\ln t$. Coluna E do solo LVa, profundidade de 0,10 m.

solo.

b) desde que o solo não apresente heterogeneidades bruscas em relação à profundidade, o denominador da equação (2.32), pode ser calculado utilizando a relação linear entre o potencial total H e a profundidade z , nos mesmos tempos t que foram realizadas as medidas de umidade:

$$H = Cz + D \quad (2.37)$$

onde C e D são parâmetros determinados também por ajuste de minimização de desvios. Derivando a equação acima em relação a z obtém-se o gradiente:

$$\left[\frac{\partial H(z)}{\partial z} \right]_t = C \quad (2.38)$$

A constante C é positiva pelo fato do potencial total ser negativo e de considerar-se z medido no sentido de cima (da superfície do solo, $z = 0$) para baixo (profundidade), considerado negativo. Assim, Δz é negativo e a razão calculada na equação (2.32), que é a condutividade hidráulica, é positiva.

As equações (2.36) e (2.38) substituídas em (2.32), permitem calcular facilmente a condutividade hidráulica K para a respectiva profundidade $z = L$ e para a respectiva umidade θ que ocorre no tempo t , pelo método de HILLEL et al.(1972):

$$K_{z=L}(\theta) \cong -\frac{\sum_{z=0}^L \frac{A_z}{t} \Delta z}{C} \quad (2.39)$$

Da aplicação da equação (2.39) para diferentes tempos t , resulta em conjunto de dados de K e de θ , que podem ser utilizados para expressar a forma geral da função $K(\theta)$. Com o objetivo de comparar os diferentes métodos, este ajuste foi feito conforme a equação (2.33), construindo uma tabela dos valores de K e de θ (expressos em termos de $\theta - \theta_s$) obtidos da equação (2.39) para cada profundidade $z=L$, em todos os tempos de redistribuição. A regressão linear $\ln K$ versus $\theta - \theta_s$ (equação 2.40), para cada profundidade, permite estimar os parâmetros γ e K_s da equação (2.33).

$$\ln K = E(\theta - \theta_s) + F \quad (2.40)$$

sendo

$$K_s = e^F \text{ e } \gamma = E.$$

2.3.2. - Método de LIBARDI et al.(1980)

Como já mencionado, este método (também conhecido na literatura como método θ) aplica a equação de RICHARDS [equação (2.29)] para descrição do fluxo de água no solo. As seguintes considerações são feitas (LIBARDI et al., 1980 e JONES & WAGENET, 1984):

a) o fluxo de água no solo em $t = 0$ (início da drenagem interna e fim da infiltração) é constante em todo o perfil do solo para as profundidades $0 \leq z \leq L$ e, para $t > 0$ o fluxo de água no solo em $z = 0$ (superfície do solo) é nulo.

b) a umidade média θ^* do solo num perfil de solo desde a superfície até a profundidade z e a umidade θ determinada em z , apresentam a seguinte relação:

$$\theta^* = a\theta + b \quad (2.41)$$

onde a ($a = 1$, indica solo homogêneo) e b são coeficientes determinados por regressão linear, e θ^* dado por:

$$\theta^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_i \quad (2.42)$$

onde n é o número de medidas de θ , obtidos em intervalos Δz , dentro da camada 0 (zero) a L .

c) a condutividade hidráulica $K(\theta)$ está relacionada com a umidade do solo θ por uma relação exponencial:

$$K(\theta) = K_s e^{\gamma(\theta - \theta_s)} \quad (2.33)$$

d) é assumido que, na redistribuição da água no solo o gradiente do potencial total é unitário, ou seja:

$$\frac{\partial H}{\partial z} = \frac{\partial(h+z)}{\partial z} = -1 \quad (2.43)$$

Para um solo saturado, ou próximo à saturação, o potencial matricial é desprezível, ou seja, $h \cong 0$, pois trata-se do estado padrão de referência para potencial. Conforme CHONG et al. (1981), a consideração de gradiente unitário durante a redistribuição da água no solo, sem evaporação, após a infiltração em um perfil uniforme de solo, foi introduzida por BLACK et al. (1969). A técnica para determinar a condutividade hidráulica, a partir de molhamento de um perfil de solo, no processo de drenagem evitando a evaporação na superfície, foi denominada de “Método de drenagem - gradiente unitário” por KLUTE (1972).

Integrando a equação de RICHARDS, equação (2.29), em relação à profundidade, e utilizando as equações (2.33), (2.41) e (2.43) encontra-se:

$$-az \frac{\partial \theta}{\partial t} = K_s e^{\gamma} (\theta - \theta_s) \quad (2.44)$$

Para obter a equação acima, convém recordar que, o armazenamento de água W_L em um perfil de solo até a profundidade L , está relacionado com a umidade média θ^* da forma seguinte:

$$W_L = \int_0^L \theta(z) dz \cong \frac{\sum_{i=1}^n \theta(z_i)}{n} n \Delta z = \theta^* L \quad (2.45)$$

Integrando a equação (2.44), em relação ao tempo, obtém-se:

$$\theta_s - \theta = \frac{1}{\gamma} \ln t + \frac{1}{\gamma} \ln \left(\frac{\gamma K_s}{aL} \right) \quad (2.46)$$

Portanto, da regressão linear de $\theta_s - \theta$ versus $\ln t$, para cada profundidade L , aplicada aos dados experimentais, obtém-se a constante γ que é o inverso de seu coeficiente angular e, K_s é obtido a partir do coeficiente linear. Assim, substituindo estas duas constantes na equação (2.33), encontra-se uma relação exponencial da condutividade hidráulica para a profundidade desejada. Ao calcular a condutividade hidráulica saturada, a constante a , que faz parte do coeficiente linear da equação (2.46), é obtida da equação (2.41).

2.3.3. - Método de SISSON et al.(1980)

SISSON et al.(1980), também assumem que o fluxo unidimensional da água em um meio poroso pode ser descrito pela equação de RICHARDS [equação (2.29)], que o gradiente de potencial hidráulico é unitário (equação 2.43) durante o processo de redistribuição da água no solo e ainda,

com as mesmas condições de contorno descritas nos métodos precedentes, portanto:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial K(\theta)}{\partial z} = - \frac{dK(\theta)}{d\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (2.47)$$

Conforme JONES & WAGENET (1984), para solução desta equação SISSON et al.(1980) utilizaram as técnicas de resolução de equações diferenciais ordinárias, apresentadas por LAX (1972) apud SISSON et al. (1980). O algoritmo de LAX, permite a solução da equação (2.47), inclusive aplicando a relação exponencial, (equação (2.33) utilizada no método de LIBARDI et al.(1980). A solução encontrada, que

$$\theta_s - \theta = \frac{1}{\gamma} \ln t + \frac{1}{\gamma} \ln \left(\frac{\gamma K_s}{L} \right) \quad (2.48)$$

comparada com a equação (2.46) do método de LIBARDI et al.(1980) mostra a semelhança entre elas, com exceção da constante a que não aparece no intercepto desta equação linear de $\theta_s - \theta$ versus $\ln t$.

Mediante uma simples transformação matemática da equação (2.48) obtém-se:

$$\ln \left(\frac{L}{t} \right) = \ln(\gamma K_s) + \gamma (\theta - \theta_s) \quad (2.49)$$

e esta é a forma na qual SISSON et al. (1980) apresentam sua metodologia. Realizando a regressão linear $\ln(L/t)$ versus $(\theta - \theta_s)$ para cada profundidade L , os valores das constantes K_s e γ podem ser determinados. Nota-se que, a constante γ é o valor da inclinação e K_s é calculado a partir do coeficiente linear da equação (2.49). Substituindo estas constantes na equação (2.33), a relação exponencial entre a condutividade hidráulica $K(\theta)$ e a umidade θ para cada profundidade é finalmente encontrada.

3 - MATERIAL E MÉTODOS

3.1 - Solo

3.1.1 - Coletas e análises das amostras de solo

Neste trabalho, foram utilizadas amostras de três solos para a medida da condutividade hidráulica em colunas. As amostras de solo foram coletadas na camada de 0-0,20 m.

a) LVa - latossolo vermelho-amarelo

Coletado no município de Piracicaba-SP, na ESALQ (Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz), campus da Universidade de São Paulo (USP).

b) LRd - latossolo roxo-distrófico

Coletada no município de Londrina-PR, na estação experimental do IAPAR (Instituto Agronômico do Paraná).

c) LVE - latossolo vermelho-escuro

Coletado no município de Paranavaí-PR, na estação experimental do IAPAR.

Análise granulométrica: foram realizadas utilizando o método do densímetro. O procedimento de análise granulométrica seguido foi segundo o manual da EMBRAPA (1979).

Densidade de partícula (d_p): O método usado foi o do balão volumétrico e o procedimento encontra-se em KIEHL (1979). Usando a densidade de partícula (d_p) de um solo, pode-se determinar, através da equação (2.4), a porosidade total, conhecendo-se antes o valor da densidade do solo (d_s), calculada por métodos convencionais ou por atenuação da radiação gama.

Umidade residual à base de massa (U_r): para cada amostra de solo, foram feitas 3 (três) repetições, distribuídas igualmente em pequenos recipientes cilíndricos, ou seja, um total de 9 (nove) recipientes cilíndricos. As amostras de solo foram para estufa a 378,15 K por um período de $172,8 \times 10^3$ s (48 h), evitando-se abrir essa estufa durante esse intervalo de tempo. Medindo-se a massa seca (após sair da estufa) e tendo a massa úmida (0,100 Kg), e utilizando a equação (2.5), obteve-se a umidade residual à base de massa. Nota-se que na equação (2.7) há uma relação entre a umidade à base de massa e a umidade volumétrica θ . Por outro lado, as equações que determinam o coeficiente de atenuação de massa (μ_p) e densidade do solo (d_s), respectivamente, equações (2.21) e (2.23) têm como parâmetro a ser calculado a umidade volumétrica residual, ou seja :

$$\theta_r = U_r \cdot d_s / d_a \quad (2.7)$$

3.1.2 - Curvas de retenção da água no solo

Para cada amostra de solo (LVa, LVE, LRd) utilizada neste trabalho, foi obtida uma curva de retenção da água no solo ou curva característica do solo. As amostras de solos foram inicialmente, secas ao ar por $172,8 \times 10^3$ s. Depois foram passadas em peneira de malha 2×10^{-3} m e novamente pela etapa de secagem ao ar por $172,8 \times 10^3$ s. Em cilindros volumétricos de alumínio, volume interno aproximado de 54×10^{-6} m³, fez-se a compactação do solo tal que a densidade de solo fosse próxima ao valor de campo. Na extremidade inferior do cilindro volumétrico, foi colocado pano do tipo perfex, fixo com elástico para permitir a passagem de água e ar. Para cada solo, 10 cilindros volumétricos foram montados, sendo que, 5 cilindros foram utilizados na mesa de tensão (figura 3.1) e o restante na câmara de Richards. As amostras de solos nos cilindros, foram inicialmente saturadas em recipientes por $172,8 \times 10^3$ s para a determinação da umidade (saturação) e, para as demais medidas as amostras ficaram em recipientes com água por $86,4 \times 10^3$ s. Na mesa de tensão ou sucção, as amostras de solos foram colocadas em tensões de 0,10; 0,20; 0,40; 0,60; 0,80 e 1,0 m de água. Acima deste valor, pode ocorrer formação de bolhas de ar no material poroso onde repousam as amostras de solos. Para a câmara de Richards, foram aplicadas tensões de 2,0; 3,0; 10,0; 30,0 e 150,0 m de água.

A curva de retenção é da forma h versus θ [potencial matricial (m de água) versus umidade volumétrica (m³.m⁻³)]. A umidade volumétrica foi calculada dos dados derivados das medidas das amostras na mesa de tensão e câmara de Richards, sendo o cálculo da umidade feito pela equação (2.6).



Figura 3.1: Mesa de tensão com amostras de solo em cilindros volumétricos.

Os dados de potencial h e de umidade θ foram ajustados pelo modelo de VAN GENUCHTEN (1980):

$$h = \frac{1}{\Omega} \left[\left(\frac{\theta_s - \theta_r}{\theta - \theta_r} \right)^{1/m} - 1 \right]^{1/n} \quad (3.1)$$

onde os subscritos s e r referem-se aos valores das umidade de saturação e residual. As constantes Ω , m e n determinam a forma da curva de retenção da água no solo. Todas as 5 (cinco) constantes, são fornecidas pelo programa de cálculo de curva de retenção, SWRC - *Soil Water Retention Curve* (DOURADO NETO et al., 1995). A entrada de dados para o programa são os potenciais matriciais h e a umidade volumétrica θ .

3.1.3 - Colunas de solo

Neste trabalho, as medidas de condutividade hidráulica foram realizadas em laboratório da Seção de Física de Solos do CENA (Centro de Energia Nuclear na Agricultura), da Universidade de São Paulo, utilizando a técnica de atenuação da radiação gama. Foram montadas colunas de solo em recipientes cilíndricos de acrílico, no total de 18 (dezoito) colunas, para os solos LVa, LVE e LRd (6 colunas para cada solo) com densidade do solo próxima à de campo. O recipiente de acrílico tinha a seguinte dimensão: altura de 0,50 m, diâmetro interno de 0,07 m e diâmetro externo de 0,08 m. A altura de solo nessa coluna foi de 0,47 m. Na figura 3.2 são mostradas algumas colunas com solo molhado.

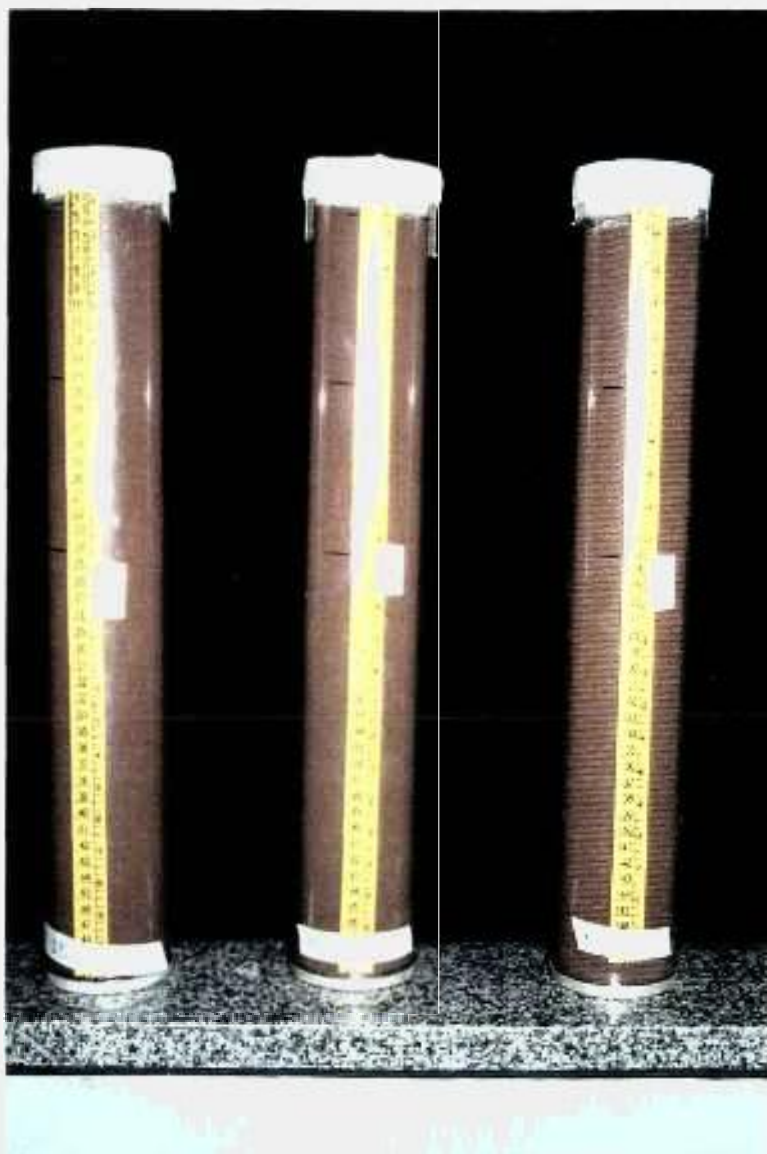


Figura 3.2: Colunas de solo utilizadas neste trabalho.

3.1.3.1 - Preparo de colunas

As amostras de solos coletadas foram, inicialmente secas ao ar por um período de $172,8 \times 10^3$ s. Após, foram passadas em peneiras de malha 2×10^{-3} m e colocadas para secarem ao ar, também por $172,8 \times 10^3$ s.

No recipiente de acrílico, foi colada na extremidade inferior uma tampa circular de alumínio com vários orifícios feitos por uma broca de 1×10^{-3} m de diâmetro. Antes de introduzir o solo peneirado (2×10^{-3} m) no recipiente de acrílico, círculos de papel de filtro (1 unidade) e de perfex (2), com diâmetro igual ao diâmetro interno do recipiente, foram acondicionados, respectivamente, na extremidade inferior. Os furos na tampa de alumínio, no papel de filtro e perfex tinham a função de permitirem a passagem de ar que está no interior do solo, quando do processo de infiltração e drenagem da água.

O empacotamento do solo no recipiente foi realizado utilizando um funil longo. Um segundo recipiente de acrílico idêntico, foi fixado com fita crepe sobre o primeiro, a fim de formar uma coluna de solo maior que 0,50 m (altura do primeiro recipiente). Ao atingir determinada altura de solo no segundo recipiente, utilizava-se um martelo de borracha para o processo de compactação e chegar à densidade de solo desejada. O segundo recipiente servia, basicamente, como uma forma de calibração da densidade de solo que se desejava obter para a coluna de solo. Feito isso, desconectava-se o segundo recipiente e retirava-se uma camada de 0,03 m de solo da coluna que seria utilizada nas medidas com feixe gama. Assim, a altura de solo foi de 0,47 m para todas as colunas que foram montadas. O espaço de 0,03 m acima da superfície do solo, era para manter uma lâmina de água de 0,02 m quando do processo de infiltração.

3.1.3.2 - Infiltração da água

A infiltração de água na coluna de solo foi por gotejamento, utilizando uma mangueira de diâmetro interno de 4×10^{-3} m, colocada em uma torneira. Na superfície do solo foi colocado um círculo de papel de filtro, a fim de controlar o fluxo de água no solo e permitir, também, manter uma lâmina de 0,02 m de água. Foi escolhida a profundidade de 0,30 m para encerrar a infiltração, pois, a princípio, o fluxo de água estava em equilíbrio dinâmico, ou seja, a umidade do solo na coluna no perfil (0-0,20 m) não variava com o tempo. A nossa coluna tinha uma altura de 0,47 m de solo, como já mencionado no item anterior. Desta forma, restava na coluna 0,17 m de solo seco para a redistribuição da água.

Encerrada a infiltração da água no solo, o espaço de 0,03 m foi preenchido com um molde de isopor e a extremidade superior da coluna, foi fechada com uma tampa de alumínio para evitar evaporação da água. Este procedimento, está de acordo com as condições de contorno dos métodos de HILLEL et al. (1972), LIBARDI et al.(1980) e SISSON et al. (1980) para a estimativa da condutividade hidráulica do solo.

O estudo da redistribuição da água no solo nessas colunas, que foi realizado através do processo de interação da radiação gama, será comentado no próximo item.

3.2 - Radiação gama

3.2.1 - Mesa de medidas

Uma mesa de medidas com movimentação vertical da coluna de solo, foi utilizada neste trabalho, conforme figura 3.3. A movimentação da coluna, em passos de 0,01 m, foi realizada através de uma manivela lateral à mesa. Sobre a mesa estavam o castelo de chumbo da fonte radioativa [^{137}Cs , $T_{1/2}$ (meia vida) de 30 anos, E_γ (energia da radiação gama) de 661,6 KeV e atividade aproximada de 74×10^8 Bq (Becquerel)] e o detetor de iodeto de sódio (3" x 3", tipo plano), ativado com tálio [NaI(Tl)] colocado no interior de um castelo cilíndrico de alumínio. A blindagem do detetor era constituída de alumínio (castelo), folhas e blocos de chumbo. O sistema fonte-detetor era móvel, podendo-se regular a distância fonte-amostra-detetor. A colimação do conjunto fonte-detetor foi de 3×10^{-3} m de diâmetro por 35×10^{-3} m de comprimento e a distância entre os colimadores de chumbo foi de 0,28 m. A coluna de solo tinha um diâmetro externo de 0,08 m e diâmetro interno de 0,07 m na direção do feixe gama. COREY et al. (1971) e MANSELL et al. (1973) nas medidas simultâneas de densidade e umidade em colunas de solo, utilizaram colimação de 10×10^{-3} m de diâmetro para as fontes e detetor. Para MANSELL et al. (1973) ambas as fontes radioativas (^{137}Cs e ^{241}Am) tinham atividade de 111×10^8 Bq e no trabalho de COREY et al. (1971) a de ^{137}Cs tinha uma atividade de 26×10^8 Bq e a de ^{241}Am , $7,4 \times 10^8$ Bq. Em nosso meio, CAVALCANTE (1978), utilizou uma fonte de ^{137}Cs (37×10^8 Bq) e colimação fonte-detetor de 2×10^{-3} m de diâmetro e OLIVEIRA (1991), trabalhando com ^{241}Am (37×10^8 Bq) determinou que a melhor colimação para seu sistema de medidas foi de 2×10^{-3} m de diâmetro para a fonte e 5×10^{-3} m de diâmetro para o detetor. Conforme FERRAZ & MANSELL (1979), para minimizar os efeitos de heterogeneidade em amostras de solo nas medidas de umidade e densidade, utiliza-se colimadores com diâmetros grandes ou colimação por fendas. Uma boa colimação do sistema fonte-detetor é importante,

tanto para feixe gama monoenergético quanto para feixe duplo. Sistemas mal colimados, são fontes de erros nos valores medidos de umidade e densidade em colunas de solo. Pode-se verificar a colimação do sistema fonte-detetor, quando o valor medido do coeficiente de atenuação de massa da água (ou outro material) está próximo ao seu valor teórico (FERRAZ & MANSELL, 1979).



Figura 3.3: Mesa de medidas mostrando o conjunto fonte radioativa de ^{137}Cs - coluna de solo - detetor de NaI(Tl).

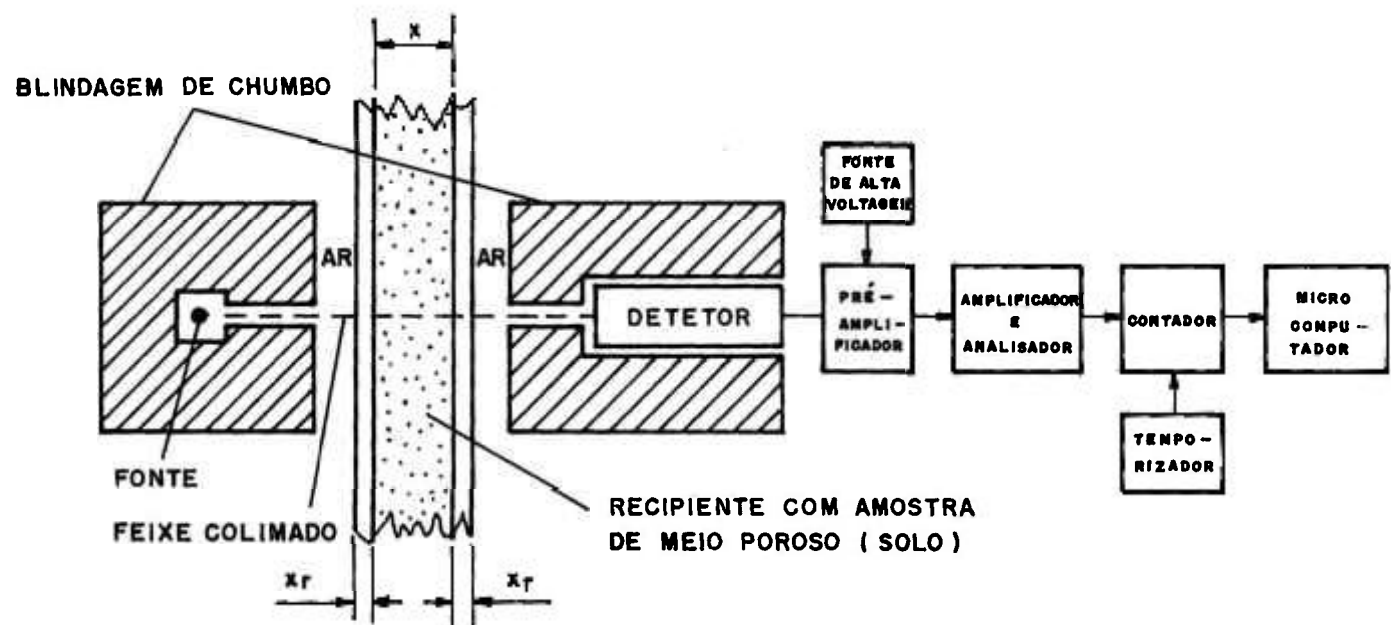
3.2.2 - Sistema de detecção da radiação gama

Um diagrama de blocos da eletrônica utilizada neste trabalho é apresentado na figura 3.4. Os módulos utilizados para a montagem do espectrômetro gama foram os seguintes:

a) detetor de iodeto de sódio ativado com tálio - NaI(Tl): (marca ORTEC) Este tipo de detetor surgiu nos anos de 1950, conforme KNOLL (1989) e também é conhecido como detetor de cintilação. O detetor consiste de um cristal com características fotoluminescentes e de um tubo fotomultiplicador. Quando um fóton de radiação X ou gama atravessa certas substâncias luminescentes, perde energia na excitação da sua luminescência, resultando numa emissão de luz visível ou ultravioleta. A luz resultante pode alcançar o catodo de uma fotomultiplicadora, resultando em um impulso elétrico em resposta à passagem da radiação gama ou raio X na substância luminescente.

Os detalhes descritos abaixo, fornecem uma básica explicação sobre o processo de cintilação:

As substâncias luminescentes mais comuns utilizadas em detetores de cintilação, podem ser cristais inorgânicos ou compostos orgânicos. O detetor de iodeto de sódio ativado com tálio é um cintilador inorgânico, sendo bastante utilizado em espectrometria gama devido à sua alta eficiência para medida de intensidades baixas de radiação gama. Maior volume do cristal cintilador, melhor a eficiência de detecção. O nosso detetor tinha um cristal de dimensão 3" x 3", tipo plano. Além disso, mais de oitenta por cento de sua massa está constituída de átomos de iodo ($Z=53$), e representa uma grande probabilidade de interação fotoelétrica com a radiação gama. Para este detetor, raios gama incidentes com energias menores que 100 KeV o efeito fotoelétrico é o mais provável. Com valores maiores de energia, a interação fotoelétrica diminui e o efeito Compton passa a ser dominante em energias de até centenas de KeV.



a 3.4: Diagrama de blocos de um espectrômetro gama monocanal (adaptado de CRESTANA, 1985).

Raios gama com energias maiores que 1 MeV, têm alta seção de choque para produção de pares. Estes processos de interação da radiação gama com a matéria, estão detalhadamente explicados no item 2.2. Em um cristal inorgânico puro, encontram-se as bandas de valência (onde elétrons estão ligados em determinadas posições da rede cristalina) e acima desta ocorre a banda de condução, onde os elétrons nela situados são livres para movimentar-se através do cristal. Existe uma banda intermediária a estas duas denominada de região proibida, na qual nenhum elétron pode ser encontrado no cristal puro. Nesse cristal, o retorno de um elétron à banda de valência e com a emissão de um fóton é um processo ineficiente, ou seja, produz fóton de energia que não sensibiliza o fotocatodo, onde se inicia o processo da multiplicação de elétrons na fotomultiplicadora. Para acentuar a probabilidade da emissão de um fóton visível durante o processo de desexcitação de elétrons, pequenas quantias de impureza, neste caso o Tálcio, são adicionadas aos cintiladores inorgânicos. Os ativadores, como são denominadas estas impurezas, fazem originar estados de energia na região proibida do cristal, onde elétrons podem desexcitar emitindo fóton de luz visível para retornar à banda de valência. Para o NaI(Tl), o comprimento de onda da radiação eletromagnética é da ordem de 415×10^{-9} metros.

A luz produzida no processo de cintilação, incide no fotocatodo da fotomultiplicadora, conforme esquema na figura 3.5. A energia do fóton da radiação eletromagnética ($h \cdot \nu$, onde h é a constante de Planck e ν a frequência) é transferida ao elétron do fotocatodo. Alguma parcela da energia inicial é perdida no processo de colisão do elétron, com outros elétrons do fotocatodo. Além disso, o elétron tem que possuir uma energia suficiente para sobrepor a barreira de potencial que existe na interface superfície interna do fotocatodo - vácuo no interior da fotomultiplicadora. O fotoelétron produzido colide com o primeiro dinodo da estrutura multiplicadora de elétrons. A fotomultiplicadora contém vários dinodos, que estão conectados a potenciais de tensão positiva crescentes. Acelerado por estes potenciais de tensão, cada elétron que colide com um dinodo arranca outros elétrons secundários. Todos estes elétrons são também acelerados e colidirão com o dinodo seguinte, formando-se então a chamada avalanche de elétrons. Ao colidirem com o último

dinodo, os elétrons resultantes serão coletados por um anodo de onde produzirá um sinal elétrico relacionado com a cintilação produzida. A carga total coletada, gerada por cada fóton gama detetado, é proporcional a energia absorvida no detetor.

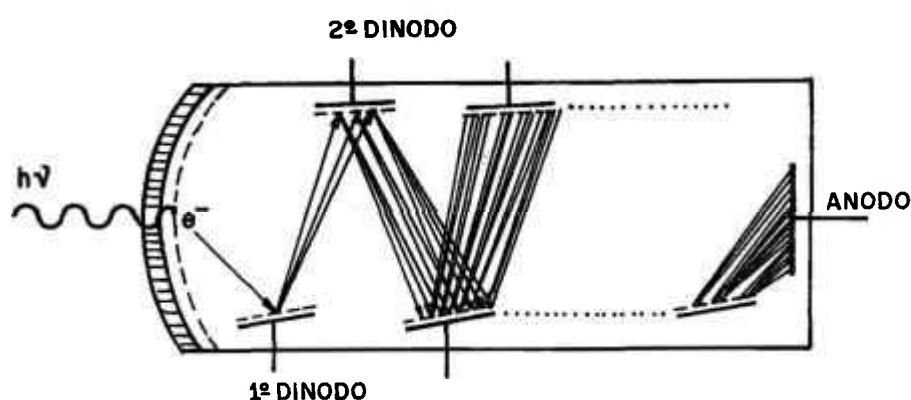


Figura 3.5: Esquema de funcionamento de uma fotomultiplicadora.

b) alta tensão: uma fonte externa de voltagem deve ser conectada à fotomultiplicadora, para manter os dinodos em potenciais de tensão crescentes. Como os fotoelétrons devem ser atraídos para o primeiro dinodo, este deve ser mantido em voltagem positiva em relação ao fotocátodo e a mesma situação em cada um do dinodo subsequente. Em nosso experimento, o detetor de NaI(Tl) tinha uma tensão de trabalho de +900 volts. O módulo de alta tensão era da marca ORTEC - modelo 556, com tensão de saída (positiva ou negativa) no intervalo de 50 a 3000 V.

c) amplificação do sinal elétrico: o sinal produzido no anodo, é convertido em um pulso linear cuja amplitude e forma contém informação do processo do qual se originou. A primeira fase nessa cadeia de processamento de sinal é o pré-amplificador. Funciona como uma interface entre o detetor e a eletrônica de análise de pulsos. Em seguida o pulso linear obtido passa por um segundo estágio de amplificação. A saída do amplificador fornece um pulso linear com maior amplitude e com forma para ser processado pelo analisador de monocanal. A amplitude do pulso é proporcional à energia da radiação gama. O pré-amplificador e o amplificador são da marca ORTEC. A base fotomultiplicadora, modelo 276, contém o circuito de pré-amplificação de sinal.

d) analisador de monocanal (SCA): o analisador de monocanal ou discriminador diferencial produz em sua saída um pulso lógico (pulso quadrado), somente se a amplitude do pulso linear fornecido pelo amplificador estiver entre a “janela” ou região de amplitudes. Estas amplitudes são definidas na unidade de monocanal através dos “trimpot” denominados de discriminador para o nível inferior (LLD) e discriminador para o nível superior (ULD) e são independentemente ajustáveis. O analisador de monocanal, pode ser utilizado para obter o espectro de energias de uma fonte de radiação gama. O procedimento consiste em fazer registros em série do número de contagens que passaram pelo monocanal, num determinado tempo, modificando a “janela” em cada medida a fim de discriminar todas as amplitudes dos pulsos. No espectro de energias, pode-se definir a “janela” correspondente à energia da radiação gama que se deseja trabalhar. Assim, em situações de medidas, o SCA pode servir para selecionar as amplitudes dos pulsos em determinada “janela” e não analisando as outras amplitudes geradas no detetor. Neste caso, uma determinada energia para uma radiação gama pode ser medida na presença de outras energias diferentes. O nosso SCA, marca ORTEC e modelo 550A, possui “janela” para o ^{137}Cs fixada em 4,4 a 6,6 Volts.

e) temporizador e contador de pulsos: os pulsos que foram discriminados na “janela” do analisador do monocanal serão convertidos em contagens durante um intervalo de tempo definido. Assim o contador de pulsos registra os pulsos lógicos obtidos da saída do analisador monocanal, e o temporizador funciona como um cronômetro com o objetivo de iniciar e parar a acumulação de dados no período determinado. Este módulo, modelo 994 (ORTEC), continha dois canais para as contagens e um para medida de tempo.

Todos os módulos da eletrônica estavam em um bastidor bin (*modular system bin*), modelo 4001A(ORTEC) O módulo contador-temporizador estava acoplado a um microcomputador 386 com 4 MegaRAM e 80 Megabytes de disco rígido para a aquisição dos dados, conforme figura 3.6. O módulo contador-temporizador foi ajustado através do microcomputador. Os arquivos gerados foram processados utilizando o programa EXCEL 5.0.

3.2.3. - Correção do tempo morto

O tempo morto de um sistema de contagens para raios gama é o tempo mínimo que pode separar dois consecutivos registros de fótons. E' um dos fatores responsáveis pelo número de contagens registradas ser menor que a quantia de eventos que alcançam o detetor. FRITTON (1969), considerou que um tempo morto de 1 μ s/contagem resultará em um erro de 0,7% no valor da umidade do solo para uma estatística de 10^6 cpm (contagens por minuto). Em STROOSNIDJER et al. (1974) a equação para correção do tempo morto é dada por:

$$I = \frac{R}{(1 - \tau \cdot R)} \quad (3.2)$$

onde

I é a intensidade (contagens por segundo) corrigida

R é a intensidade (contagens por segundo) observada

τ é o tempo morto

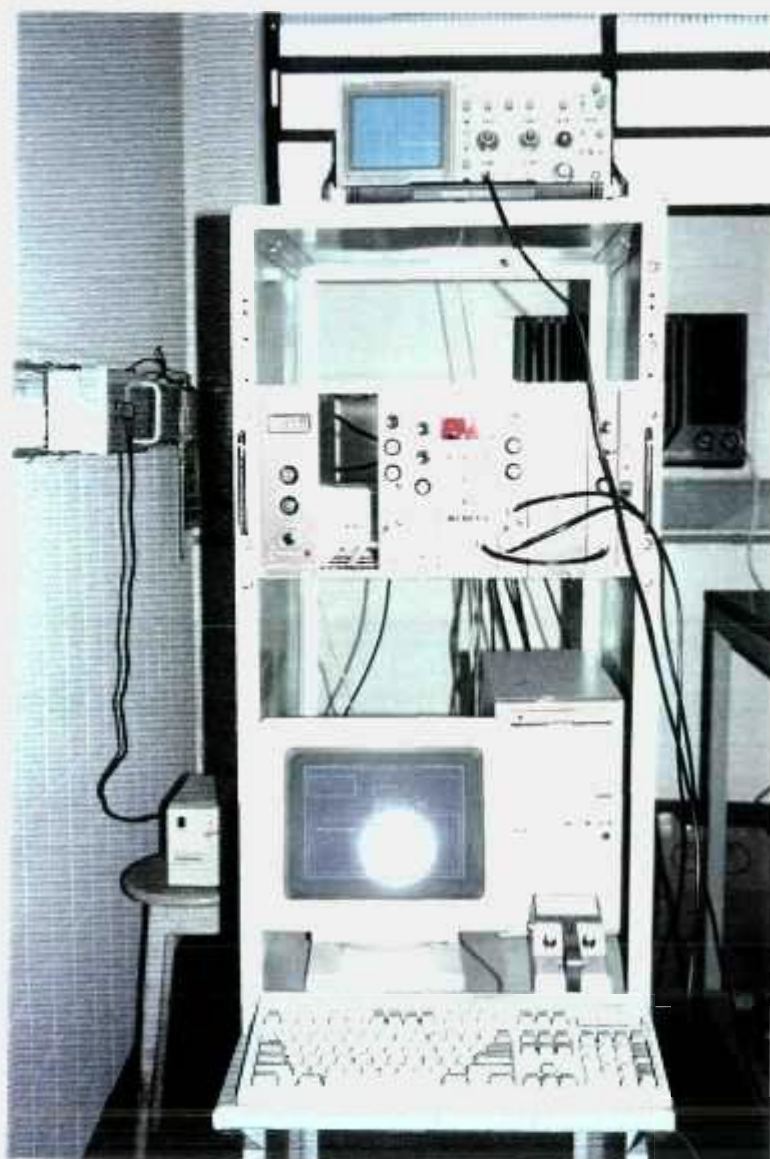


Figura 3.6: Eletrônica acoplada ao espectrômetro gama monocanal, osciloscópio e microcomputador.

A intensidade corrigida I que é maior que a intensidade observada R , foi utilizada nas equações (2.18) a (2.26). Assim para uma taxa de contagens observada de 60.000 cps e um tempo morto de 10^{-6} s ($1\mu\text{s}$), a equação acima fornece uma intensidade corrigida de aproximadamente 64.000 cps, portanto uma diferença percentual de 6,6%. GARDNER et al. (1972) sugeriram um método para a determinação do tempo morto τ . Utilizaram uma fonte de ^{137}Cs e dois absorvedores de ferro de igual espessura (0,024 m cada). O tempo morto é calculado pela equação abaixo:

$$\tau = \left(R_1^2 - R_0 R_2 \right) / \left[R_1^2 \cdot (R_0 + R_2) - 2 \cdot R_0 \cdot R_1 \cdot R_2 \right] \quad (3.3)$$

onde

R_0 é a intensidade (contagens por segundo) determinada para o ar (sem absorvedor entre a fonte de ^{137}Cs e o detetor),

R_1 é a média das intensidades (contagens por segundo), ou seja, uma intensidade é determinada para cada placa de ferro e depois faz-se a média,

R_2 é a intensidade (contagens por segundo) determinada para as duas placas de ferro juntas.

Em nosso trabalho aplicou-se o método acima para a determinação do tempo morto de nosso sistema de medidas. A geometria utilizada foi a mesma para as medidas das colunas de solos, ou seja : colimadores de diâmetro 3×10^{-3} m no conjunto fonte-detetor, distância entre colimadores de 0,28 m. A nossa fonte de ^{137}Cs tem uma atividade de 74×10^8 Bq. O tempo morto determinado para o nosso espectrômetro gama foi de $3,8 \mu\text{s}$ (microsegundos). Em nossas medidas das colunas com solos, as contagens não ultrapassaram o valor de 120.000 num tempo de 60 s. Aplicando a equação 3.2 encontra-se para nossas medidas, uma diferença percentual entre as intensidades corrigida e observada de 0,8 %.

3.2.4 - Coeficientes de atenuação de massa da água e do solo

Em todos os métodos de medidas comentados abaixo, de coeficientes de atenuação de massa, densidade do solo e umidade volumétrica, a colimação do sistema fonte-detetor tinha um diâmetro de 0,03 m e a distância entre os colimadores foi de 0,28 m. A fonte radioativa era a de ^{137}Cs com energia do fóton gama de 661,6 KeV e detetor de NaI(Tl) de 3" x 3", tipo plano. A "janela" do pico do ^{137}Cs estava fixada de 4,4 a 6,6 volts. Espectros de energias para essa configuração foram medidos, em intervalo de dois dias, para verificar a estabilidade do espectrômetro gama monocal. Na figura 3.7 apresenta-se um espectro de energias para o ^{137}Cs obtido para a nossa geometria. A radiação de fundo do laboratório estava em torno de 17 contagens por segundo e a temperatura ambiente foi controlada em torno de 294.15 ± 1 K.

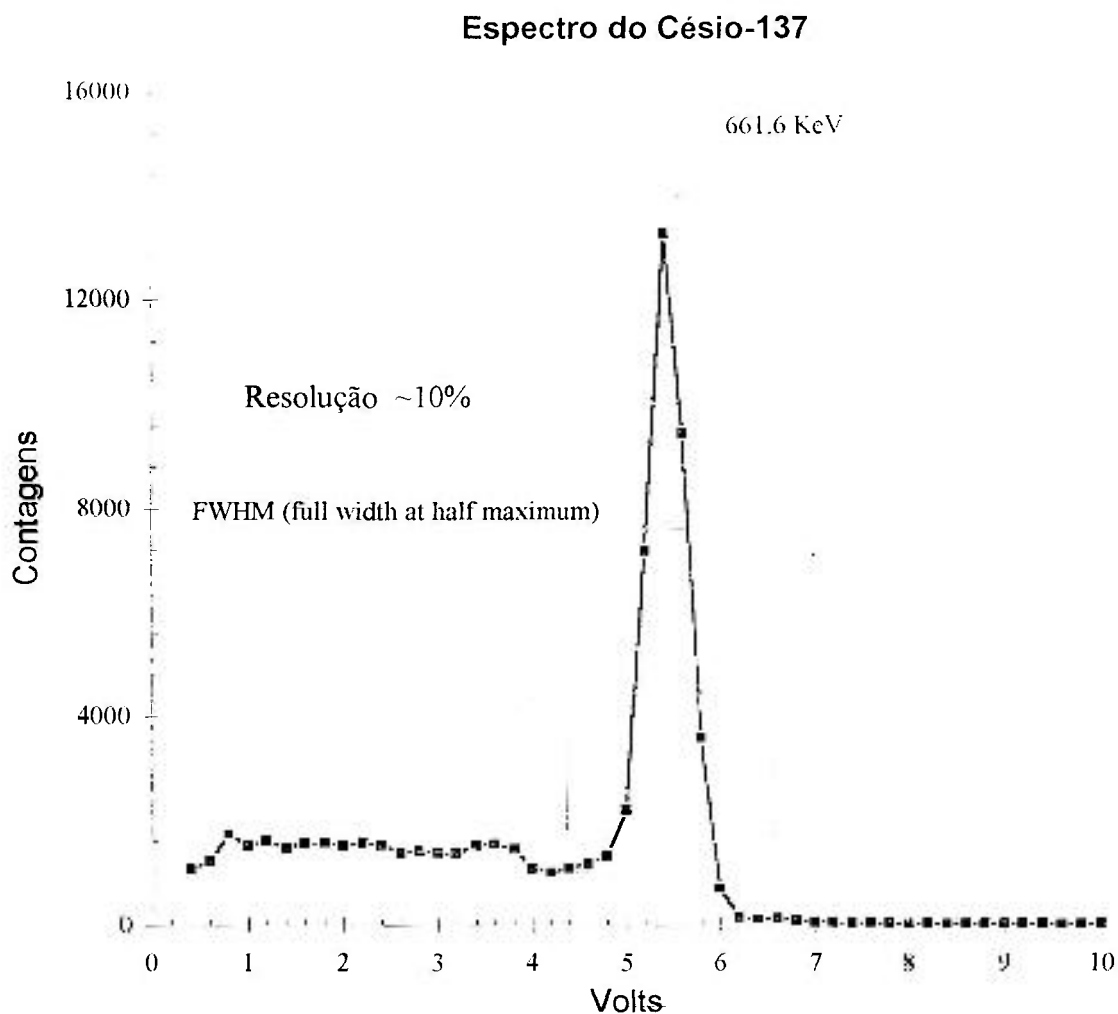


Figura 3.7: Espectro do ^{137}Cs , com o pico gama característico de energia de 661,6 KeV. A “janela” utilizada no monocanal está definida de 4,4 a 6,6 volts.

a) coeficiente de atenuação de massa da água (μ_a):

Utilizou-se um recipiente de acrílico com as seguintes dimensões: x (na direção do feixe gama, comprimento interno da caixa)= $4,97 \times 10^{-2}$ m; y= $4,92 \times 10^{-2}$ m e z (altura)= $6,0 \times 10^{-2}$ m. Na caixa de acrílico foi colocada água destilada para as medidas. Foram realizadas 20 (vinte) aquisições de dados, de 60 s cada, em diversas posições da caixa. Estes procedimentos,

foram repetidos mais duas vezes em outros dias, para verificar a reprodutibilidade das medidas. Sem a correção do tempo morto, os valores médios das contagens obtidas para a caixa vazia e com água são respectivamente 238.324 e 157.808 contagens. Medidas da caixa vazia e de radiação de fundo, foram realizadas antes e depois das medidas com água. A densidade da água foi considerada igual a 1000 Kg.m^{-3} . Aplicou-se a equação (2.18) para determinar o valor do coeficiente de atenuação de massa da água.

b) coeficiente de atenuação de massa do solo (μ_p):

Para as amostras de solos (LRd, LVa e LVE) utilizou-se uma caixa de acrílico que apresentava as seguintes dimensões: x (na direção do feixe, comprimento interno da caixa) = $5,99 \times 10^{-2} \text{ m}$; y = $5,07 \times 10^{-2} \text{ m}$; e z (altura) = $6,0 \times 10^{-2} \text{ m}$. O solo foi seco ao ar por $172,8 \times 10^3 \text{ s}$. Em seguida foi passado em peneira de malha $2 \times 10^{-3} \text{ m}$ e novamente seco ao ar por $172,8 \times 10^3 \text{ s}$. A densidade do solo na caixa foi calculada pela equação (2.2). Mediu-se a caixa (vazia e com solo) incidindo o feixe gama em diversas posições (20) no tempo de 60 s cada e, foram realizadas mais duas repetições em outros dias para cada solo, a fim de verificar a reprodutibilidade das medidas. Com a caixa vazia, medidas foram obtidas antes e depois das medidas com solo. A radiação de fundo foi obtida no início e final das medidas. O coeficiente de atenuação de massa do solo, foi calculado da equação (2.21).

3.2.5 - Densidade do solo na coluna

Cada coluna de solo seco, foi varrida pelo feixe gama a partir de 0,01 m da superfície do solo até a profundidade de 0,20 m, em passos de 0,01 m uma vez que se pretendia determinar a condutividade hidráulica do solo nesta camada. A coluna tinha um raio interno de 0,07 m e 0,01 m de espessura no total. Na figura 3.2 são mostradas colunas com solo molhado. O tempo de

medida foi de 60 s em cada profundidade. Para este tempo de medida, o erro percentual nas contagens, para a coluna com solo seco, foi em torno de 0,3% em qualquer profundidade e para a coluna vazia foi de 0,2%. As medidas da coluna vazia e da radiação de fundo foram realizadas no início e no final da aquisição de dados para a coluna de solo. Um total de 18 (dezoito) colunas de solos, foram varridas pelo feixe gama do ^{137}Cs . Os dados de contagens foram enviados ao microcomputador e depois processados através do programa EXCEL 5.0. Assim, utilizando a equação (2.23), foi determinada a densidade do solo na coluna, por atenuação da radiação gama, para cada profundidade, de 0,01 a 0,20 m. O valor da umidade residual θ_r , da equação (2.23), foi calculado pela equação (2.7) e o valor da densidade do solo utilizado para a determinação da umidade residual, foi obtido pelo método convencional, equação (2.2).

3.2.6 - Umidade volumétrica nas colunas de solo

A coluna de solo tinha um altura total de 0,50 m, onde 0,47 m era de solo e 0,03 m utilizado para manter uma lâmina de água de 0,02 m de altura, no processo de infiltração da água. Escolheu-se deixar a frente de molhamento atingir até a profundidade de 0,30 m na coluna de solo e parar a infiltração de água, ou seja, restando 0,17 m de solo seco para a redistribuição da água. A profundidade de 0,30 m foi escolhida porque, em princípio, o solo já havia atingido a situação de regime permanente, nesta condição, a umidade no perfil de solo na coluna (0-0,20 m) não estava variando com o tempo. Cessando a infiltração, eliminava-se a lâmina de água na superfície do solo e os 0,03 m foram preenchidos com um molde de isopor e em seguida fechava-se a extremidade superior da coluna com uma tampa de alumínio. A partir deste instante (denominado de tempo zero), o perfil de solo na coluna estava em processo de drenagem da água, sem nenhum fluxo de água na superfície do solo.

A coluna de solo foi levada para a mesa de medidas e colocada no feixe gama do ^{137}Cs (energia de 661,6 KeV). Foram realizadas as

medidas de umidade a partir de 0,01 m da superfície do solo até a profundidade de 0,20 m, em passos de 0,01 m. O tempo de aquisição dos dados era de 60 s em cada profundidade. Após terminada a primeira varredura do feixe gama na coluna com solo molhado, outras foram realizadas em seguida, a fim de acompanhar a drenagem da água no perfil de solo (0-0,20 m) na coluna. As tomadas de dados para a coluna vazia e da radiação de fundo, foram obtidas antes e depois das medidas com a coluna de solo em processo de redistribuição da água.

As medidas da drenagem da água na coluna de solo foram encerradas, quando os perfis de umidade (θ versus z), nos diversos tempos de redistribuição, começavam a se sobrepor, indicando que o teor de água em cada profundidade (0 a 0,20 m) do perfil de solo não apresentava grandes variações. No cálculo da umidade volumétrica, utilizou-se a equação (2.25). Três colunas de solo LRd foram perdidas devido a problemas eletrônicos que apareceram no sistema de medidas, que não foram resolvidos em tempo para que as três colunas restantes fossem processadas.

4 - RESULTADOS OBTIDOS

4.1 - Análises das amostras de solo

Nas tabelas 4.1 e 4.2 apresentam-se os resultados dos procedimentos experimentais descritos nos itens 3.1.1 e 3.2.4, realizados com os solos LVa (latossolo vermelho-amarelo) de Piracicaba-SP, LVE (latossolo vermelho-escuro) de Paranavaí - PR e LRd (latossolo roxo-distrófico) de Londrina - PR. Na tabela 4.1 tem-se os resultados da análise granulométrica, densidade de partícula d_p , umidade residual à base de massa U e na tabela 4.2 os coeficientes de atenuação de massa dos solos.

Tabela 4.1 - Análises dos solos segundo métodos convencionais.

Solo	Granulometria (%)			d_p ($\times 10^3$ Kg.m ⁻³)	U ($\times 10^{-4}$ Kg.Kg ⁻¹)
	areia	argila	silte		
	total				
LVa	62	29	9	$2,54 \pm 0,23$ (9)#	$82,19 \pm 0,79$ (1,0)#
LRd	4	75	21	$2,77 \pm 0,28$ (10)	$367,64 \pm 0,52$ (0,14)
LVE	89	10	1	$2,69 \pm 0,24$ (9)	$44,70 \pm 0,50$ (1,1)

entre parênteses apresenta-se o CV (%) (coeficiente de variação)

Verifica-se que os solos escolhidos apresentam diferentes distribuições do tamanho das partículas: o LVa pode ser enquadrado como de textura intermediária, o LVE como um solo arenoso e o LRd apresenta uma textura argilosa.

Tabela 4.2 - Coeficientes de atenuação de massa dos solos LVa, LVE e LRd para fótons de 661,6 KeV do ^{137}Cs , obtidos com a nossa geometria.

Solo	μ ($\text{m}^2.\text{Kg}^{-1}$)	$\sigma \mu$ ($\text{m}^2.\text{Kg}^{-1}$)	CV(%)
LVa	0,00748	0,00003	0,45
LVE	0,00745	0,00004	0,50
LRd	0,00738	0,00006	0,79

Os coeficientes de atenuação de massa para esses solos, estão em razoável concordância com os valores encontrados na literatura para amostras de solo das mesmas classes: $0,0080 \pm 0,0002 \text{ m}^2.\text{Kg}^{-1}$ (APPOLONI & RIOS, 1994), para o solo LRd e $0,007666 \pm 0,000062$ a $0,007838 \pm 0,000044 \text{ m}^2.\text{Kg}^{-1}$ (FERRAZ & MANSELL, 1979) para diferentes latossóis. REGINATO & VAN BAVEL (1964), determinaram coeficientes de atenuação de massa, utilizando o ^{137}Cs , para nove solos representativos dos Estados Unidos e obtiveram valores no intervalo de $0,00772$ a $0,00780 \text{ m}^2.\text{Kg}^{-1}$. A variação dos coeficientes de atenuação entre os solos foi pequena (1%) e, justificaria o uso de um valor médio representativo para estes solos, ou mesmo, para os solos que tivessem uma composição química bastante semelhante. VAN BAVEL (1959), utilizando a técnica de atenuação da radiação gama para medida de densidade de solo in situ, com ^{137}Cs , comentou que a natureza química do solo não afetou a medida do coeficiente de atenuação de massa. COPPOLA & REINIGER (1974),

analisaram a influência da composição química para o coeficiente de atenuação de massa dos solos e concluíram que acima de uma energia de 0,3 MeV, os coeficientes de atenuação de massa são insensíveis à composição mineral do solo. CRESTANA et al. (1986), mostraram que para fótons de baixas energias, como o da fonte de ^{241}Am (60 KeV) o coeficiente de atenuação de massa é fortemente dependente da composição química do solo e APPOLONI & RIOS (1994), mediram coeficientes de atenuação de massa para seis solos Brasileiros no intervalo de energias de 10 KeV a 10 GeV e concluíram que o efeito da composição química do solo sobre o coeficiente de atenuação de massa, é importante apenas para baixas energias.

LUO & WELLS (1992) citaram vários trabalhos (GURR, 1962; REGINATO & VAN BAVEL, 1964; DE VRIES, 1969; REGINATO & JACKSON, 1971; REGINATO, 1974; RAWITZ et al., 1982; VAN BAVEL et al., 1985; BERTUZZI et al., 1987) que apresentaram métodos para medidas do coeficiente de atenuação de massa da água para fótons gama da energia do ^{137}Cs (0,662 MeV). A tabela 4.3, obtida de LUO & WELLS (1992), apresenta valores de coeficiente de atenuação de massa da água com os respectivos métodos e autores dos trabalhos. Também encontram-se nesta tabela as distâncias de separação face da fonte radioativa - face do detetor (f-f) e centro da fonte radioativa - centro do detetor (c-c). O coeficiente de atenuação de massa da água obtido por FERRAZ & MANSELL (1979), o seu valor teórico que foi mencionado no trabalho de MANSELL et al. (1973) e o valor medido neste trabalho, estão em concordância com os valores apresentados por GURR (1962); DE VRIES (1969) com a medida feita com colimação; VAN BAVEL et al. (1985); BERTUZZI et al. (1987) e FERRAZ & MANSELL (1979). O valor do coeficiente de atenuação de massa da água obtido em nosso sistema de medidas indica uma boa geometria (FERRAZ & MANSELL, 1979). Conforme LUO & WELLS (1992), os valores dos coeficientes de atenuação de massa da água por eles apresentados na tabela 4.3, indicam uma dependência dos métodos de medidas, bem como, da distância entre fonte e detetor.

Tabela 4.3 - Coeficiente de atenuação de massa da água (LUO & WELLS, 1992)

Autor	Métodos	μ_w (m ² .Kg ⁻¹)	Distância separação, x10 ⁻³ m
GURR (1962)	caixa com água	0,00856	150,3
REGINATO & VAN BAVEL (1964)	vidro com água	0,00748	303,f-f
DE VRIES (1969)	caixa com água:	.	.
	sem colimação	0,00719	266
	com colimação	0,00838	186
REGINATO & JACKSON (1971)	tubos com água	0,00500	200
REGINATO (1974)	saco plástico com água	0,00480	100,f-f
RAWITZ et al. (1982)	saco plástico grande c/água	0,00586	306,c-c
	piscina de água	0,00563	306,c-c
VAN BAVEL et al. (1985)	vidro com água	0,00862	254,f-f
		0,00711	254,f-f
		0,00694	254,f-f
	porta amostra grande c/água	0,00711	254,f-f
BERTUZZI et al. (1987)	porta amostra grande c/água	0,00857	-
FERRAZ & MANSELL (1979)		0,00853	-
VALOR TEÓRICO#		0,00857	-
NESTE TRABALHO	caixa com água	0,00843	280

extraído de MANSELL et al. (1973).

Os coeficientes de atenuação de massa da água e do solo, foram calculados utilizando as equações (2.18) e (2.21) respectivamente. As variâncias foram determinadas, respectivamente, pelas equações (2.19) e (2.22). Para os solos os coeficientes de variação estão entre 0,45 e 0,79% e para a água o valor é de 0,83%, implicando, no caso deste último, em um desvio experimental de 0,00007 m².Kg⁻¹.

4.2 - Curvas de retenção da água no solo

Na tabela 4.4, são apresentados os parâmetros da curva de retenção da água no solo, conforme equação (3.1), que segue o modelo de VAN GENUCHTEN (1980). Os parâmetros destas tabelas foram fornecidos pelo programa SWRC - *Soil water retention curve* (DOURADO NETO et al., 1995). Os ajustes aos dados experimentais foram muito bons, conforme pode ser verificado pelos valores dos coeficientes de ajuste r e, também na figura 4.1, para os três solos estudados. Apesar destes bons ajustes, estes dados ao serem utilizados levaram a valores irreais de gradientes de potencial, pelo fato de não ter sido possível obter um arranjo poroso que fosse igual ou, pelo menos semelhante, às colunas de solo utilizadas nos testes de condutividade hidráulica.

Tabela 4.4 - Parâmetros das curvas de retenção da água nos três solos, conforme equação (3.1), obtidos do programa SWRC.

Solo	$\theta_r (m^3.m^{-3})$	$\theta_s (m^3.m^{-3})$	$\Omega (m^{-1})$	m	n	r
LVa	0,041	0,497	2,33	0,1925	1,2383	0,975
LVE	0,056	0,467	3,09	0,5846	2,4072	0,989
LRd	0,028	0,742	6,41	0,3110	1,4514	0,995

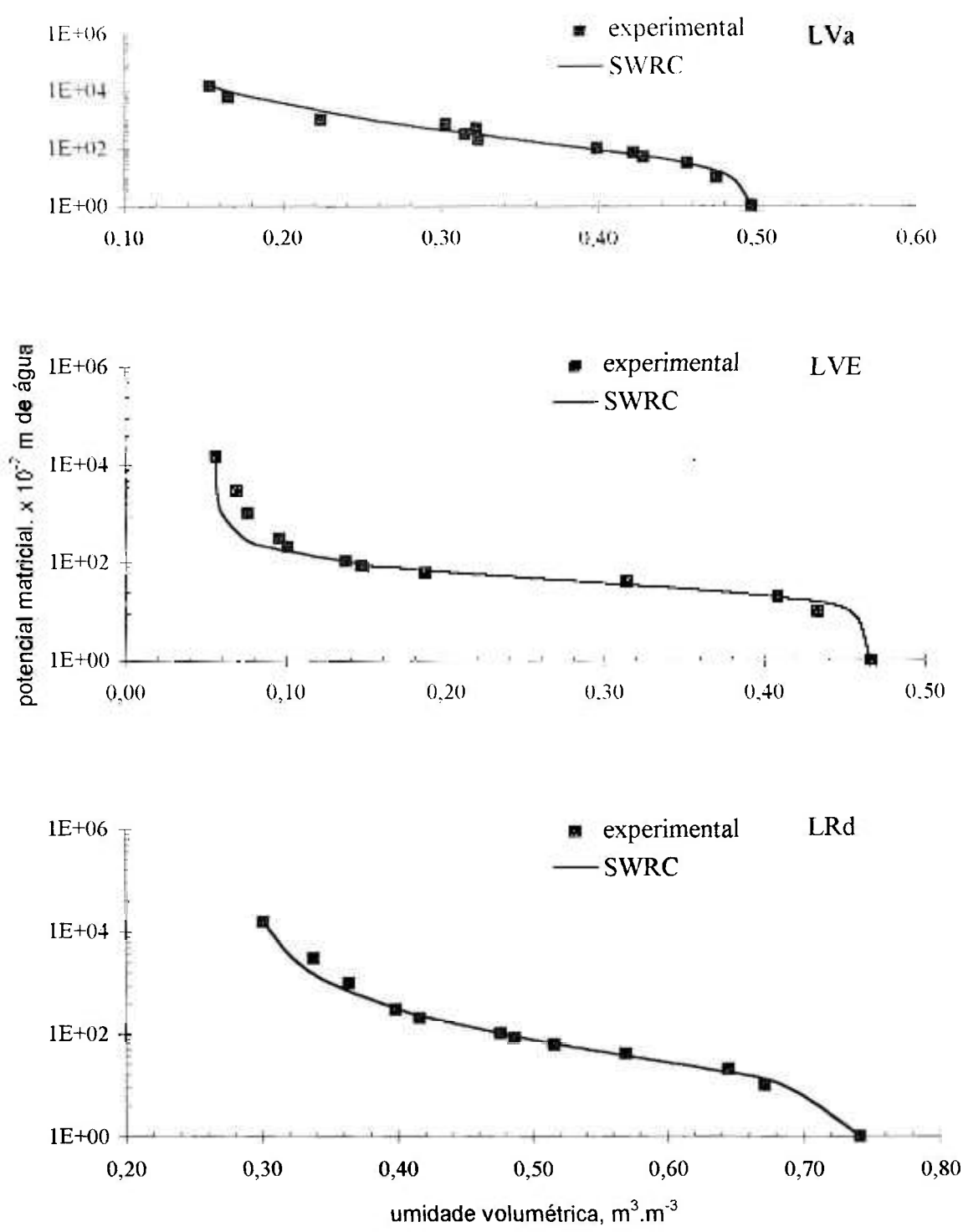


Figura 4.1 : Curvas de retenção da água nos solos LVa, LVE e LRd.
Pontos representam os dados experimentais e a linha contínua o resultado fornecido pelo SWRC.

Na tabela 4.5 abaixo, são apresentados, para cada solo, os dados da porosidade total e da umidade de saturação, em valores percentuais, os últimos obtidos pelo programa SWRC, iguais aos valores medidos em laboratório com as amostras de solos deformadas em cilindros volumétricos. Verifica-se, que os valores de teor de água na saturação são maiores que as porosidades totais calculadas. Este fato inviabilizou a utilização destas curvas h versus θ para o cálculo do gradiente do potencial total H da água no solo.

Tabela 4.5 - Porosidade total e umidade de saturação, em valores percentuais, para as amostras dos três solos.

Solo	Porosidade total (%)	Umidade de saturação (%)
LVa	42,1	49,7
LVE	41,6	46,7
LRd	56,4	74,2

Por este motivo, no método de HILLEL et al. (1972), a condutividade hidráulica do solo foi calculada considerando unitário o gradiente do potencial total, conforme equação (2.43).

4.3 - Colunas de solo: densidade e infiltração de água

Na tabela 4.6 são apresentados para os solos LVa, LVE e LRd e suas respectivas colunas, a massa de solo, sua densidade média na coluna a qual foi calculada pelo método convencional (equação 2.2) e o erro experimental na densidade do solo, que foi de aproximadamente de 3% em termos de C.V., para todas as colunas utilizadas. A densidade medida em campo dos solos LVa, LVE e LRd é, respectivamente: 1460 Kg.m^{-3} (ZEVALLOS, 1978), 1650 Kg.m^{-3} (FARIA et al., 1993) e 1140 Kg.m^{-3} (FARIA et al., 1993). Estes valores de densidade referem-se a uma média de densidades encontradas em um perfil de solo de 0 (zero) até 0,30 m de profundidade e evidenciam o fato de que a densidade das colunas preparadas, assemelhou-se bastante às condições naturais destes solos. As colunas de solo foram montadas conforme explicado no item 3.1.3.

Tabela 4.6 - Densidade nas colunas de solos LVa, LVE e LRd, montadas em laboratório.

Coluna	LVa			LVE			LRd		
	massa (Kg)	d_s (Kg.m^{-3})	σd_s (Kg.m^{-3})	massa (Kg)	d_s (Kg.m^{-3})	σd_s (Kg.m^{-3})	massa (Kg)	d_s (Kg.m^{-3})	σd_s (Kg.m^{-3})
A	2,715	1501	42	2,790	1542	45	2,165	1197	45
B	2,575	1424	42	2,845	1573	45	2,130	1178	45
C	2,625	1451	42	2,855	1578	45	2,135	1180	45
D	2,600	1437	42	2,855	1578	45	-	-	-
E	2,680	1484	42	2,860	1581	45	-	-	-
F	2,705	1496	42	2,840	1570	45	-	-	-

Nas tabelas 4.7, 4.8 e 4.9 são apresentados os valores da densidade do solo obtidos nas colunas de solo no perfil de 0,01 a 0,20 m (em passos de 0,01 m), obtidos pela técnica da atenuação da radiação gama. As seis colunas de solo LVA e LVE estão rotuladas de A a F. Para o solo LRd somente três colunas foram utilizadas, fato este já justificado anteriormente, rotuladas de A, B e C. O valor médio da densidade para cada coluna de solo, na região onde serão feitas as medidas de condutividade (0,01 a 0,20 m) e seu coeficiente de variação (CV) são também mostrados nas tabelas. As demais tabelas, 4.8 e 4.9, referem-se aos solos LVE e LRd, respectivamente. Para o solo LRd, o CV foi da ordem de 1%, enquanto que para os solos LVA e LVE, 0,71%. A figura 4.2 para os solos LVA, LVE e LRd, mostra que a variação da densidade em função da profundidade é pequena e está bem distribuída em torno do seu valor médio, que para o solo LVA é igual a 1501 Kg.m^{-3} , LVE; 1595 Kg.m^{-3} e LRd; 1168 Kg.m^{-3} .

Tabela 4.7 - Densidade nas colunas de solo LVA obtida por atenuação da radiação gama, nas profundidades de 0,01 a 0,20 m e os respectivos coeficientes de variação (CV).

z (x 10 ⁻² m)	Densidade (x 10 ³ Kg.m ⁻³) - solo LVA					
	Coluna					
	A	B	C	D	E	F
1	1,464	1,462	1,431	1,373	1,406	1,454
2	1,540	1,515	1,481	1,446	1,471	1,517
3	1,536	1,499	1,464	1,463	1,516	1,484
4	1,561	1,517	1,482	1,456	1,534	1,536
5	1,567	1,526	1,459	1,418	1,525	1,533
6	1,552	1,543	1,426	1,490	1,540	1,515
7	1,540	1,508	1,452	1,455	1,513	1,530
8	1,527	1,523	1,459	1,436	1,542	1,522
9	1,543	1,499	1,463	1,459	1,502	1,542
10	1,539	1,511	1,495	1,479	1,527	1,557
11	1,539	1,512	1,473	1,441	1,523	1,552
12	1,526	1,527	1,486	1,457	1,530	1,533
13	1,521	1,533	1,491	1,477	1,553	1,510
14	1,544	1,538	1,473	1,458	1,528	1,539
15	1,509	1,480	1,487	1,455	1,524	1,547
16	1,499	1,486	1,480	1,468	1,543	1,555
17	1,511	1,515	1,476	1,468	1,502	1,540
18	1,492	1,514	1,508	1,478	1,542	1,510
19	1,510	1,473	1,505	1,442	1,526	1,530
20	1,498	1,498	1,482	1,475	1,509	1,518
média	1,526	1,509	1,474	1,455	1,518	1,526

z (x 10 ⁻² m)	Coeficiente de variação (%) na densidade do solo					
	A	B	C	D	E	F
1	0,69	0,68	0,68	0,69	0,70	0,67
2	0,67	0,67	0,68	0,67	0,68	0,66
3	0,67	0,67	0,68	0,67	0,67	0,67
4	0,67	0,67	0,68	0,67	0,67	0,66
5	0,67	0,67	0,68	0,68	0,67	0,66
6	0,67	0,66	0,69	0,67	0,67	0,66
7	0,67	0,67	0,68	0,67	0,68	0,66
8	0,67	0,67	0,68	0,67	0,67	0,66
9	0,67	0,67	0,68	0,67	0,68	0,66
10	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,66
11	0,67	0,67	0,68	0,67	0,67	0,66
12	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,66
13	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,66
14	0,67	0,66	0,68	0,67	0,67	0,66
15	0,68	0,67	0,67	0,67	0,67	0,66
16	0,68	0,67	0,68	0,67	0,67	0,66
17	0,68	0,67	0,68	0,67	0,68	0,66
18	0,68	0,67	0,67	0,67	0,67	0,66
19	0,68	0,68	0,67	0,67	0,67	0,66
20	0,68	0,67	0,68	0,67	0,68	0,66
média	0,67	0,67	0,68	0,67	0,67	0,66

Tabela 4.8 - Densidade nas colunas de solo LVE obtida por atenuação da radiação gama, nas profundidades de 0,01 a 0,20 m e os respectivos coeficientes de variação (CV).

z (x 10 ⁻² m)	Densidade (x 10 ³ Kg.m ⁻³) - solo LVE					
	Coluna					
	A	B	C	D	E	F
1	1,470	1,569	1,559	1,558	1,530	1,566
2	1,541	1,577	1,585	1,595	1,584	1,589
3	1,546	1,583	1,615	1,605	1,575	1,604
4	1,534	1,612	1,587	1,615	1,570	1,632
5	1,514	1,589	1,576	1,574	1,593	1,646
6	1,557	1,579	1,585	1,596	1,587	1,632
7	1,533	1,601	1,604	1,596	1,591	1,638
8	1,570	1,609	1,553	1,619	1,583	1,629
9	1,567	1,617	1,604	1,620	1,603	1,626
10	1,567	1,620	1,615	1,619	1,581	1,598
11	1,563	1,613	1,625	1,607	1,594	1,583
12	1,580	1,637	1,612	1,620	1,611	1,619
13	1,598	1,611	1,583	1,621	1,591	1,614
14	1,584	1,614	1,596	1,645	1,599	1,616
15	1,608	1,610	1,570	1,604	1,609	1,604
16	1,591	1,615	1,601	1,593	1,608	1,606
17	1,600	1,629	1,571	1,611	1,572	1,605
18	1,573	1,629	1,581	1,616	1,604	1,615
19	1,602	1,613	1,583	1,615	1,597	1,596
20	1,593	1,627	1,563	1,611	1,605	1,596
média	1,565	1,608	1,588	1,607	1,589	1,611

z (x 10 ⁻² m)	Coeficiente de variação (%) na densidade do solo					
	A	B	C	D	E	F
1	0,71	0,69	0,70	0,70	0,71	0,71
2	0,70	0,69	0,70	0,70	0,70	0,70
3	0,70	0,69	0,70	0,70	0,71	0,70
4	0,70	0,69	0,70	0,70	0,71	0,70
5	0,70	0,69	0,70	0,70	0,70	0,70
6	0,69	0,69	0,70	0,70	0,70	0,70
7	0,70	0,69	0,70	0,70	0,70	0,70
8	0,69	0,69	0,71	0,70	0,70	0,70
9	0,69	0,69	0,70	0,70	0,70	0,70
10	0,69	0,69	0,70	0,70	0,70	0,70
11	0,69	0,69	0,70	0,70	0,70	0,70
12	0,69	0,68	0,70	0,70	0,70	0,70
13	0,69	0,69	0,70	0,70	0,70	0,70
14	0,69	0,69	0,70	0,69	0,70	0,70
15	0,69	0,69	0,70	0,70	0,70	0,70
16	0,69	0,69	0,70	0,70	0,70	0,70
17	0,69	0,69	0,70	0,70	0,71	0,70
18	0,69	0,69	0,70	0,70	0,70	0,70
19	0,69	0,69	0,70	0,70	0,70	0,70
20	0,69	0,69	0,70	0,70	0,70	0,70
média	0,69	0,69	0,70	0,70	0,70	0,70

Tabela 4.9 - Densidade nas colunas de solo LRd obtida por atenuação da radiação gama, nas profundidades de 0,01 a 0,20 m e os respectivos coeficientes de variação (CV).

z (x 10 ⁻² m)	Densidade (x 10 ³ Kg.m ⁻³) - solo LRd		
	Coluna		
	A	B	C
1	1,153	1,117	1,105
2	1,184	1,103	1,144
3	1,166	1,163	1,223
4	1,198	1,203	1,148
5	1,160	1,195	1,186
6	1,135	1,167	1,125
7	1,205	1,193	1,187
8	1,175	1,171	1,150
9	1,164	1,161	1,182
10	1,205	1,190	1,041
11	1,179	1,180	1,165
12	1,170	1,116	1,180
13	1,200	1,153	1,146
14	1,212	1,174	1,123
15	1,216	1,193	1,151
16	1,210	1,168	1,192
17	1,211	1,177	1,143
18	1,151	1,186	1,105
19	1,261	1,121	1,190
20	1,164	1,197	1,166
média	1,186	1,166	1,153

z (x 10 ⁻² m)	Coeficiente de variação (%) na densidade do solo		
	A	B	C
1	1,01	0,99	0,99
2	1,00	0,99	0,98
3	1,00	0,97	0,96
4	0,99	0,97	0,98
5	1,00	0,97	0,97
6	1,01	0,97	0,98
7	0,99	0,97	0,97
8	1,00	0,97	0,98
9	1,00	0,97	0,97
10	0,99	0,97	1,01
11	1,00	0,97	0,97
12	1,00	0,99	0,97
13	0,99	0,98	0,98
14	0,99	0,97	0,98
15	0,99	0,97	0,98
16	0,99	0,97	0,97
17	0,99	0,97	0,98
18	1,01	0,97	0,99
19	0,98	0,98	0,97
20	1,00	0,97	0,97
média	1,00	0,97	0,98

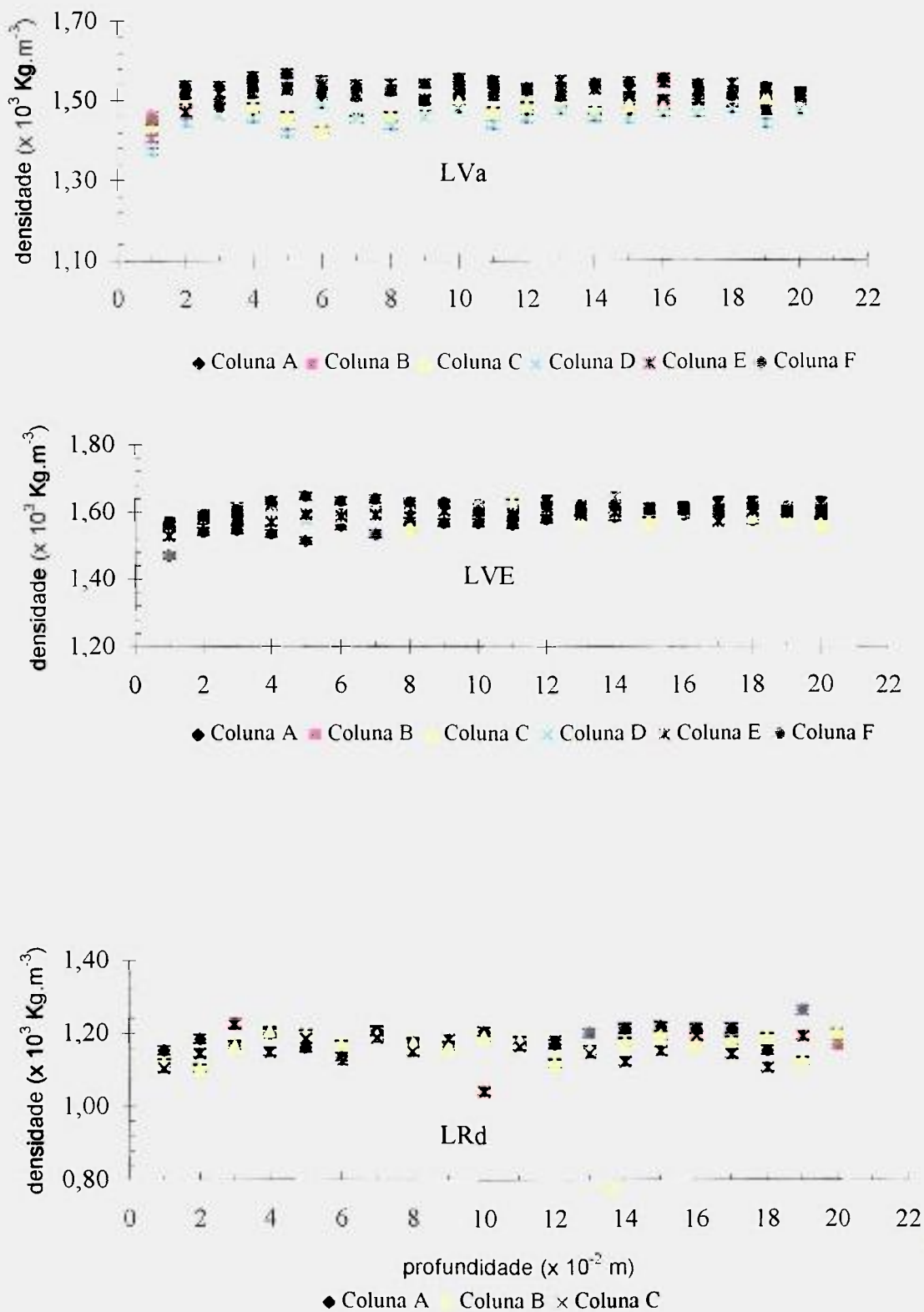


Figura 4.2 : Densidade do solo obtida por atenuação da radiação gama versus profundidade nas colunas de solos LVa, LVE e LRd.

Os tempos de infiltração da água nas colunas de solo variaram de acordo com a textura do solo, bem como, com a densidade do solo na coluna. Na tabela 4.10 estão indicados os tempos em segundos para que a frente de molhamento atingisse a posição de 0,30 m de profundidade. Na última linha da tabela, encontram-se os valores médios dos tempos de infiltração. O tempo mais longo de infiltração foi obtido para a coluna A do solo LVa, com valor de 6720 s e o mais rápido fluxo de água na infiltração foi medido para a coluna F do solo LVE, com valor de 540 s.

Tabela 4.10 - Tempos de infiltração da água nas colunas de solos LVa, LVE e LRd.

Colunas	LVa	LVE	LRd
		t(s)	
A	6720	960	5640
B	3120	1140	5160
C	2640	1020	4560
D	1980	1200	-
E	5760	1020	-
F	6360	540	-
Valor médio	4440	960	5100

Esta variabilidade, principalmente do LVa, indica a dificuldade de construir em laboratório amostras de solo homogêneas e semelhantes que sirvam como repetições e que é esperado que as condutividades hidráulicas das colunas tenham uma variabilidade pronunciada.

4.4 - Umidade volumétrica nas colunas de solo

Nas tabelas 4.11 a 4.25 estão os valores da umidade volumétrica $\theta(z, t)$ para as colunas de solo LVa, LVE e LRd, medidos entre $z = 0,01$ e $z = 0,20$ m, para vários tempos de redistribuição. Estes valores de umidade foram determinados utilizando a equação (2.25), pelo processo de atenuação da radiação gama. Para a coluna A (solo LVa), na tabela 4.11, a primeira varredura com feixe gama na coluna de solo, foi até a profundidade de 0,11 m devido à interrupção de energia elétrica no momento da medida.

A variância na umidade foi calculada utilizando a equação (2.26), e nas tabelas 4.26 a 4.31 estão os valores do coeficiente de variação na umidade apenas, a título de exemplo, para as colunas B e E do solo LVa, C e F do solo LVE e A e C do solo LRd. O erro experimental na umidade dado pela equação (2.26), para todas as colunas, independente da amostra de solo, ficou em torno de $\sigma\theta = 0,016 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$. À medida que o solo drena, sem evaporação na superfície, seu teor de água diminui e, conseqüentemente, o coeficiente de variação aumenta chegando até 17% para o solo LVE, coluna A. Considerando o valor médio de CV da umidade do solo para cada profundidade, calculado ao longo dos tempos de redistribuição, verifica-se que para o solo LVa seu valor oscila em torno de 6% para todas as colunas, para o solo LVE em torno de 8% e para o solo LRd em torno de 4%. Estes valores médios de CV mostram que o solo LVE (mais arenoso) tem uma drenagem mais rápida em relação ao demais solos LRd (argiloso) e LVa (de textura intermediária). Isto também pode ser observado para o solo LVE, que apresenta a menor umidade para o primeiro tempo de redistribuição da água com a coluna de solo no feixe gama, depois do tempo zero. Para o solo LVE, o valor médio da umidade nas colunas de solo para $0,01 \leq z \leq 0,20$ m é da ordem de $0,2964 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$, enquanto que os demais solos apresentam os valores seguintes: LVa ($0,3484 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$) e LRd ($0,4830 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$).

As figuras 4.3 a 4.8 mostram o comportamento da umidade θ

Tabela 4.11 - Umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama na coluna A do solo L Va, nos diversos tempos de redistribuição da água.

Umidade volumétrica (m ³ .m ⁻³) - solo L Va - coluna A													
z (m)	t (dias)												
	0,005	0,092	0,174	0,285	0,397	0,907	1,261	2,184	3,144	7,151	9,922	11,981	16,159
0,01	0,2983	0,2790	0,2614	0,2999	0,2978	0,2811	0,2779	0,2348	0,2556	0,2447	0,2593	0,2559	0,2379
0,02	0,2960	0,3007	0,2897	0,3167	0,3254	0,3000	0,2758	0,2815	0,2660	0,2637	0,2763	0,2751	0,2668
0,03	0,3156	0,3183	0,2901	0,3279	0,3245	0,3137	0,3047	0,2848	0,2989	0,2832	0,2927	0,2794	0,2714
0,04	0,3102	0,3044	0,2804	0,3225	0,3191	0,2939	0,3045	0,2677	0,2715	0,2727	0,2727	0,2650	0,2679
0,05	0,3142	0,3066	0,3046	0,3100	0,3037	0,2894	0,2849	0,2673	0,2869	0,2761	0,2585	0,2711	0,2579
0,06	0,3334	0,2970	0,2907	0,3186	0,3180	0,2938	0,2873	0,2766	0,2845	0,2781	0,2729	0,2668	0,2630
0,07	0,3372	0,3217	0,3037	0,3199	0,3021	0,3010	0,2887	0,2751	0,2899	0,2798	0,2701	0,2691	0,2636
0,08	0,3537	0,2853	0,2858	0,3179	0,3180	0,2781	0,2788	0,2503	0,2556	0,2482	0,2709	0,2506	0,2347
0,09	0,3459	0,3197	0,2943	0,2993	0,2895	0,2705	0,2721	0,2664	0,2659	0,2704	0,2413	0,2438	0,2580
0,10	0,3429	0,3450	0,3047	0,3002	0,2916	0,2671	0,2798	0,2711	0,2613	0,2583	0,2513	0,2565	0,2449
0,11	0,3190	0,3081	0,2692	0,2922	0,2805	0,2791	0,2707	0,2491	0,2659	0,2563	0,2549	0,2568	0,2399
0,12	-	0,2843	0,2801	0,2742	0,2743	0,2612	0,2651	0,2485	0,2552	0,2311	0,2499	0,2317	0,2239
0,13	-	0,2901	0,2784	0,2845	0,2774	0,2615	0,2674	0,2429	0,2593	0,2534	0,2476	0,2516	0,2372
0,14	-	0,2865	0,2605	0,2717	0,2587	0,2645	0,2706	0,2357	0,2581	0,2248	0,2333	0,2446	0,2185
0,15	-	0,2825	0,2605	0,2944	0,2843	0,2668	0,2459	0,2385	0,2584	0,2400	0,2436	0,2390	0,2475
0,16	-	0,2869	0,2702	0,3039	0,2921	0,2626	0,2640	0,2322	0,2718	0,2410	0,2528	0,2557	0,2396
0,17	-	0,3038	0,2883	0,2809	0,2907	0,2616	0,2582	0,2684	0,2436	0,2433	0,2364	0,2348	0,2363
0,18	-	0,3193	0,3106	0,2945	0,3027	0,2875	0,2738	0,2539	0,2592	0,2608	0,2631	0,2489	0,2323
0,19	-	0,3035	0,2983	0,2976	0,2899	0,2733	0,2653	0,2438	0,2600	0,2356	0,2406	0,2379	0,2297
0,20	-	0,2907	0,2894	0,2888	0,2804	0,2516	0,2502	0,2397	0,2477	0,2359	0,2286	0,2366	0,2263

Tabela 4.12 - Umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama na coluna B do solo LVa, nos diversos tempos de redistribuição da água.

Umidade volumétrica (m ³ .m ⁻³) - solo LVa - coluna B																				
z (m)	t (dias)																			
	0,005	0,028	0,052	0,076	0,154	0,286	0,432	0,942	1,252	2,040	3,258	4,267	8,240	11,156	13,056	17,233				
0,01	0,2795	0,2451	0,2206	0,2342	0,2001	0,2129	0,2157	0,1900	0,2087	0,2022	0,1666	0,1893	0,1777	0,1918	0,1968	0,1769				
0,02	0,3258	0,2970	0,2778	0,2854	0,2635	0,2477	0,2592	0,2453	0,2545	0,2403	0,2225	0,2138	0,2391	0,2273	0,2226	0,2154				
0,03	0,3708	0,3438	0,3172	0,3212	0,2989	0,2916	0,2872	0,2831	0,2605	0,2525	0,2614	0,2482	0,2450	0,2384	0,2413	0,2406				
0,04	0,3571	0,3339	0,3175	0,3016	0,2832	0,2816	0,2783	0,2621	0,2581	0,2554	0,2377	0,2490	0,2431	0,2353	0,2347	0,2381				
0,05	0,3521	0,3416	0,3348	0,3124	0,3138	0,2956	0,2856	0,2779	0,2333	0,2119	0,2477	0,2523	0,2243	0,2201	0,2433	0,2360				
0,06	0,3094	0,3183	0,3193	0,3298	0,2995	0,2818	0,2738	0,2499	0,2494	0,2380	0,2340	0,2239	0,2357	0,2371	0,2314	0,2313				
0,07	0,3662	0,3410	0,3482	0,3532	0,3343	0,3152	0,3034	0,2742	0,2637	0,2576	0,2515	0,2558	0,2538	0,2461	0,2401	0,2546				
0,08	0,3325	0,3261	0,3175	0,3162	0,2761	0,2986	0,2817	0,2392	0,2685	0,2639	0,2242	0,2416	0,2295	0,2088	0,2387	0,2337				
0,09	0,3580	0,3288	0,3271	0,3091	0,3124	0,2766	0,2721	0,2601	0,2613	0,2615	0,2504	0,2531	0,2359	0,2489	0,2466	0,2257				
0,10	0,3426	0,3208	0,2938	0,2861	0,2692	0,2670	0,2529	0,2199	0,2477	0,2479	0,2392	0,2378	0,2362	0,2422	0,2423	0,2172				
0,11	0,3538	0,3261	0,3218	0,3084	0,2846	0,3051	0,2803	0,2621	0,2664	0,2397	0,2285	0,2436	0,2253	0,2278	0,2324	0,2325				
0,12	0,3436	0,3253	0,3183	0,3138	0,2935	0,2920	0,2821	0,2609	0,2509	0,2421	0,2363	0,2310	0,2289	0,2334	0,2423	0,2258				
0,13	0,3390	0,3388	0,3301	0,3328	0,3316	0,3001	0,2999	0,2679	0,2639	0,2534	0,2545	0,2334	0,2280	0,2287	0,2341	0,2235				
0,14	0,3553	0,3373	0,3222	0,3292	0,3119	0,3054	0,2840	0,2721	0,2810	0,2582	0,2427	0,2517	0,2431	0,2505	0,2440	0,2389				
0,15	0,3804	0,3736	0,3489	0,3509	0,3483	0,3327	0,3166	0,3079	0,2836	0,2639	0,2906	0,2932	0,2558	0,2524	0,2576	0,2633				
0,16	0,3583	0,3537	0,3439	0,3326	0,3186	0,3105	0,2905	0,2885	0,2612	0,2592	0,2550	0,2720	0,2388	0,2452	0,2447	0,2489				
0,17	0,3548	0,3482	0,3409	0,3394	0,3401	0,3122	0,3216	0,3064	0,2707	0,2779	0,2882	0,2730	0,2664	0,2673	0,2721	0,2754				
0,18	0,3490	0,3453	0,3384	0,3448	0,3261	0,3334	0,3051	0,2946	0,2711	0,2627	0,2559	0,2608	0,2378	0,2370	0,2444	0,2350				
0,19	0,3414	0,3283	0,3230	0,3148	0,3087	0,3006	0,2801	0,2697	0,2595	0,2629	0,2575	0,2398	0,2569	0,2305	0,2430	0,2237				
0,20	0,3525	0,3329	0,3228	0,3279	0,3287	0,3190	0,3053	0,2919	0,2781	0,2698	0,2474	0,2515	0,2470	0,2417	0,2479	0,2370				

Tabela 4.13 - Umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama na coluna C do solo LVa, nos diversos tempos de redistribuição da água.

z (m)	Umidade volumétrica (m ³ .m ⁻³) - solo LVa - coluna C														t (dias)
	0,005	0,038	0,140	0,288	0,453	0,957	1,285	1,400	2,202	5,126	8,257	10,210	14,238	19,060	
0,01	0,3073	0,2518	0,2386	0,2139	0,2280	0,2125	0,2052	0,2080	0,1851	0,1737	0,2070	0,2020	0,2260	0,1938	
0,02	0,3549	0,2939	0,2636	0,2482	0,2470	0,2508	0,2462	0,2258	0,2188	0,2196	0,2281	0,2225	0,2305	0,2248	
0,03	0,3617	0,3040	0,2679	0,2654	0,2623	0,2633	0,2464	0,2297	0,2354	0,2428	0,2333	0,2338	0,2357	0,2356	
0,04	0,3349	0,3012	0,2801	0,2631	0,2557	0,2579	0,2469	0,2325	0,2435	0,2398	0,2308	0,2417	0,2264	0,2399	
0,05	0,3515	0,2984	0,2924	0,2608	0,2492	0,2526	0,2474	0,2352	0,2515	0,2367	0,2283	0,2495	0,2171	0,2443	
0,06	0,3670	0,3280	0,3033	0,2814	0,2741	0,2472	0,2618	0,2588	0,2542	0,2659	0,2398	0,2233	0,2301	0,2346	
0,07	0,3576	0,3141	0,2835	0,2820	0,2505	0,2520	0,2602	0,2518	0,2546	0,2554	0,2496	0,2380	0,2385	0,2416	
0,08	0,3482	0,3002	0,2636	0,2826	0,2270	0,2567	0,2586	0,2447	0,2551	0,2450	0,2593	0,2527	0,2468	0,2487	
0,09	0,3540	0,3156	0,2836	0,2673	0,2773	0,2592	0,2514	0,2408	0,2401	0,2429	0,2555	0,2514	0,2559	0,2464	
0,10	0,3146	0,3151	0,2682	0,2856	0,2677	0,2635	0,2569	0,2402	0,2540	0,2448	0,2496	0,2391	0,2332	0,2510	
0,11	0,3479	0,3131	0,2940	0,2773	0,2639	0,2596	0,2526	0,2407	0,2262	0,2492	0,2482	0,2277	0,2427	0,2408	
0,12	0,3303	0,3120	0,2988	0,2700	0,2456	0,2665	0,2672	0,2603	0,2544	0,2411	0,2299	0,2371	0,2482	0,2553	
0,13	0,3418	0,3336	0,2913	0,2693	0,2663	0,2581	0,2594	0,2363	0,2531	0,2416	0,2388	0,2426	0,2421	0,2357	
0,14	0,3772	0,3391	0,3237	0,2995	0,2819	0,2833	0,2712	0,2744	0,2641	0,2663	0,2608	0,2565	0,2482	0,2541	
0,15	0,3575	0,3184	0,3013	0,2810	0,2572	0,2695	0,2706	0,2627	0,2509	0,2447	0,2616	0,2522	0,2718	0,2417	
0,16	0,3527	0,3399	0,3110	0,3114	0,2773	0,2890	0,2773	0,2819	0,2751	0,2626	0,2599	0,2583	0,2610	0,2555	
0,17	0,3558	0,3232	0,2886	0,2691	0,2676	0,2585	0,2596	0,2679	0,2429	0,2514	0,2547	0,2479	0,2633	0,2565	
0,18	0,3663	0,3490	0,3414	0,3153	0,2916	0,2895	0,2747	0,2755	0,2626	0,2710	0,2591	0,2506	0,2610	0,2640	
0,19	0,3402	0,3420	0,3330	0,3191	0,3078	0,3079	0,2871	0,2896	0,2821	0,2740	0,2586	0,2649	0,2810	0,2600	
0,20	0,3749	0,3426	0,3060	0,2850	0,2818	0,2824	0,2799	0,2744	0,2600	0,2709	0,2675	0,2762	0,2841	0,2712	

Tabela 4.14 - Umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama na coluna D do solo LVa, nos diversos tempos de redistribuição da água.

z (m)	Umidade volumétrica ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) - solo LVa - coluna D														t (dias)				
	0,007	0,049	0,137	0,213	0,322	0,443	0,946	1,397	2,442	3,181	3,412	6,165	9,952	21,088					
0,01	0,3080	0,2951	0,2458	0,2254	0,2231	0,2259	0,2002	0,2054	0,2433	0,2119	0,2249	0,2082	0,2016	0,2010					
0,02	0,2817	0,2570	0,2528	0,2334	0,2410	0,2311	0,2080	0,2174	0,2202	0,1987	0,2025	0,2107	0,2017	0,2006					
0,03	0,3664	0,3245	0,2811	0,2666	0,2679	0,2933	0,2504	0,2466	0,2568	0,2448	0,2541	0,2362	0,2293	0,2342					
0,04	0,3667	0,3251	0,2744	0,2668	0,2685	0,2555	0,2579	0,2387	0,2419	0,2390	0,2423	0,2221	0,2113	0,2198					
0,05	0,3122	0,2836	0,2652	0,2536	0,2689	0,2612	0,2516	0,2452	0,2303	0,2309	0,2305	0,2209	0,2262	0,2225					
0,06	0,3614	0,3372	0,3141	0,2903	0,2832	0,2859	0,2719	0,2582	0,2699	0,2587	0,2527	0,2428	0,2336	0,2378					
0,07	0,3624	0,3359	0,3001	0,2889	0,2891	0,2824	0,2576	0,2391	0,2521	0,2385	0,2475	0,2302	0,2274	0,2271					
0,08	0,3797	0,3464	0,2999	0,2973	0,3042	0,2883	0,2978	0,2775	0,2798	0,2591	0,2737	0,2552	0,2472	0,2382					
0,09	0,3216	0,3066	0,2836	0,2582	0,2731	0,2628	0,2380	0,2483	0,2471	0,2530	0,2648	0,2555	0,2453	0,2318					
0,10	0,3457	0,3290	0,2958	0,2657	0,2737	0,2711	0,2536	0,2320	0,2450	0,2394	0,2431	0,2316	0,2175	0,2282					
0,11	0,3462	0,3124	0,3112	0,2937	0,2873	0,2830	0,2738	0,2580	0,2703	0,2634	0,2527	0,2471	0,2547	0,2390					
0,12	0,3722	0,3278	0,3078	0,2836	0,2841	0,2758	0,2843	0,2619	0,2631	0,2611	0,2592	0,2512	0,2310	0,2360					
0,13	0,3634	0,3384	0,3100	0,2981	0,2942	0,2899	0,2865	0,2621	0,2685	0,2545	0,2607	0,2421	0,2225	0,2269					
0,14	0,3580	0,3551	0,3029	0,2807	0,2995	0,2844	0,2695	0,2367	0,2745	0,2594	0,2644	0,2657	0,2416	0,2327					
0,15	0,3094	0,3341	0,2598	0,2472	0,2563	0,2715	0,2207	0,1998	0,2384	0,2343	0,2349	0,2277	0,2362	0,2350					
0,16	0,3618	0,3468	0,3092	0,3011	0,3028	0,2705	0,2776	0,2608	0,2609	0,2666	0,2461	0,2565	0,2297	0,2364					
0,17	0,3689	0,3268	0,3374	0,3357	0,3152	0,2952	0,3029	0,2650	0,2816	0,2665	0,2710	0,2617	0,2592	0,2415					
0,18	0,3349	0,3264	0,3168	0,2918	0,2948	0,3062	0,2711	0,2321	0,2616	0,2539	0,2496	0,2503	0,2387	0,2245					
0,19	0,3243	0,3322	0,2846	0,2738	0,2700	0,2592	0,2401	0,2408	0,2250	0,2303	0,2184	0,2197	0,2251	0,2083					
0,20	0,3587	0,3536	0,3411	0,3216	0,3072	0,3220	0,2926	0,2750	0,2809	0,2733	0,2770	0,2618	0,2504	0,2469					

Tabela 4.15 - Umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama na coluna E do solo L Va, nos diversos tempos de redistribuição da água.

Umidade volumétrica (m ³ .m ⁻³) - solo L Va - coluna E																					
z (m)	t (dias)																				
	0,005	0,033	0,062	0,162	0,273	0,413	0,944	1,290	2,192	3,321	4,164	5,159	7,297	11,204	14,020	16,117					
0,01	0,3736	0,2910	0,2785	0,2682	0,2591	0,2537	0,2315	0,2354	0,2402	0,2296	0,2157	0,2363	0,2378	0,2311	0,2331	0,2289					
0,02	0,3712	0,3340	0,3114	0,2902	0,2867	0,2802	0,2678	0,2617	0,2632	0,2444	0,2533	0,2610	0,2475	0,2618	0,2522	0,2513					
0,03	0,3532	0,2660	0,2813	0,2373	0,2614	0,2416	0,2536	0,2274	0,2203	0,2145	0,2062	0,2112	0,2113	0,2247	0,2053	0,2098					
0,04	0,3618	0,3345	0,3392	0,2942	0,3016	0,2935	0,2832	0,2804	0,2548	0,2353	0,2563	0,2644	0,2545	0,2564	0,2583	0,2517					
0,05	0,3355	0,3134	0,2997	0,2771	0,2855	0,2621	0,2557	0,2536	0,2434	0,2273	0,2313	0,2217	0,2269	0,2257	0,2365	0,2420					
0,06	0,3540	0,3306	0,3160	0,3233	0,3082	0,3049	0,2932	0,2507	0,2566	0,2561	0,2502	0,2551	0,2551	0,2526	0,2491	0,2436					
0,07	0,3537	0,3188	0,2858	0,2721	0,2644	0,2684	0,2552	0,2473	0,2440	0,2325	0,2433	0,2541	0,2380	0,2376	0,2410	0,2251					
0,08	0,3601	0,3472	0,3361	0,3014	0,3244	0,3213	0,3037	0,2814	0,2709	0,2538	0,2625	0,2593	0,2560	0,2546	0,2548	0,2684					
0,09	0,3619	0,3495	0,3319	0,3210	0,2975	0,2807	0,2562	0,2631	0,2588	0,2428	0,2441	0,2403	0,2293	0,2367	0,2389	0,2424					
0,10	0,3558	0,3605	0,3509	0,3328	0,3408	0,3203	0,3002	0,2954	0,2643	0,2557	0,2578	0,2602	0,2587	0,2480	0,2511	0,2603					
0,11	0,3718	0,3465	0,3412	0,3345	0,3269	0,3105	0,2911	0,2834	0,2645	0,2494	0,2706	0,2548	0,2747	0,2621	0,2449	0,2554					
0,12	0,3393	0,3113	0,3089	0,2807	0,2693	0,2774	0,2688	0,2522	0,2331	0,2367	0,2247	0,2209	0,2246	0,2301	0,2224	0,2274					
0,13	0,3326	0,3374	0,3399	0,3400	0,3455	0,3258	0,3072	0,2932	0,2680	0,2626	0,2621	0,2551	0,2557	0,2530	0,2447	0,2484					
0,14	0,3373	0,3454	0,3366	0,3551	0,3212	0,3105	0,3019	0,2861	0,2540	0,2659	0,2384	0,2593	0,2392	0,2473	0,2402	0,2393					
0,15	0,3657	0,3335	0,3318	0,3181	0,3131	0,3013	0,2961	0,2668	0,2599	0,2497	0,2576	0,2676	0,2733	0,2557	0,2647	0,2695					
0,16	0,3513	0,3473	0,3484	0,3221	0,3213	0,3099	0,2882	0,2800	0,2630	0,2621	0,2658	0,2596	0,2620	0,2507	0,2543	0,2509					
0,17	0,3613	0,3470	0,3456	0,3278	0,3026	0,2928	0,2728	0,2915	0,2834	0,2753	0,2628	0,2661	0,2551	0,2619	0,2536	0,2610					
0,18	0,3362	0,3461	0,3267	0,3264	0,3159	0,3063	0,2811	0,2772	0,2712	0,2485	0,2499	0,2522	0,2424	0,2395	0,2368	0,2548					
0,19	0,3464	0,3331	0,3352	0,3108	0,3127	0,3102	0,2833	0,2934	0,2724	0,2528	0,2643	0,2661	0,2594	0,2450	0,2500	0,2661					
0,20	0,3467	0,3268	0,3351	0,3240	0,3176	0,3036	0,2845	0,2814	0,2753	0,2699	0,2658	0,2642	0,2663	0,2668	0,2587	0,2502					

Tabela 4.16 - Umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama na coluna F do solo LVa, nos diversos tempos de redistribuição da água.

Umidade volumétrica (m ³ .m ⁻³) - solo LVa - coluna F														
z (m)	t (dias)													
	0,006	0,053	0,182	0,308	0,410	0,867	1,234	3,115	5,178	7,003	8,920	13,102	15,984	18,031
0,01	0,3338	0,2621	0,2355	0,2271	0,2153	0,2225	0,2149	0,2135	0,1604	0,1854	0,1818	0,1695	0,1932	0,1919
0,02	0,3489	0,2967	0,2638	0,2608	0,2455	0,2399	0,2568	0,2294	0,1897	0,2295	0,2149	0,2169	0,2127	0,2157
0,03	0,3640	0,3001	0,2670	0,2668	0,2535	0,2556	0,2617	0,2634	0,2171	0,2295	0,2321	0,2398	0,2441	0,2380
0,04	0,3446	0,3198	0,2959	0,2937	0,2757	0,2759	0,2772	0,2529	0,2440	0,2483	0,2330	0,2473	0,2348	0,2397
0,05	0,3367	0,3029	0,2696	0,2721	0,2600	0,2505	0,2576	0,2499	0,1933	0,2379	0,2230	0,2252	0,2243	0,2207
0,06	0,3551	0,3214	0,2939	0,2874	0,2776	0,2899	0,2840	0,2684	0,2283	0,2386	0,2369	0,2480	0,2324	0,2386
0,07	0,3506	0,3232	0,3049	0,2884	0,2754	0,2685	0,2799	0,2599	0,2408	0,2392	0,2451	0,2423	0,2311	0,2378
0,08	0,3495	0,3223	0,2957	0,2917	0,2891	0,2592	0,2683	0,2664	0,2263	0,2475	0,2459	0,2408	0,2487	0,2460
0,09	0,3592	0,3553	0,3365	0,3020	0,2884	0,2786	0,2853	0,2658	0,2238	0,2384	0,2343	0,2394	0,2150	0,2573
0,10	0,3509	0,3430	0,3035	0,2987	0,2876	0,2751	0,2737	0,2634	0,2208	0,2341	0,2269	0,2278	0,2300	0,2254
0,11	0,3673	0,3397	0,3223	0,3313	0,3010	0,2872	0,2951	0,2751	0,2424	0,2421	0,2564	0,2525	0,2369	0,2478
0,12	0,3487	0,3224	0,2937	0,3018	0,3088	0,2841	0,2739	0,2537	0,2271	0,2308	0,2463	0,2500	0,2332	0,2201
0,13	0,3662	0,3568	0,3492	0,3299	0,3346	0,3233	0,2966	0,2832	0,2681	0,2703	0,2843	0,2723	0,2670	0,2639
0,14	0,3461	0,3350	0,3185	0,3057	0,2972	0,2847	0,2822	0,2731	0,2294	0,2473	0,2346	0,2437	0,2404	0,2500
0,15	0,3399	0,3422	0,3352	0,3122	0,3094	0,3098	0,2852	0,2630	0,2383	0,2538	0,2346	0,2570	0,2383	0,2433
0,16	0,3346	0,3274	0,3043	0,3224	0,2911	0,2757	0,2763	0,2622	0,2357	0,2292	0,2288	0,2333	0,2164	0,2387
0,17	0,3367	0,3116	0,2937	0,2827	0,2817	0,2820	0,2579	0,2528	0,2096	0,2142	0,2081	0,2237	0,2037	0,2108
0,18	0,3694	0,3445	0,3217	0,3295	0,3073	0,2997	0,2910	0,2858	0,2542	0,2570	0,2530	0,2586	0,2689	0,2582
0,19	0,3488	0,3469	0,3288	0,3124	0,3218	0,3126	0,3009	0,2611	0,2653	0,2711	0,2591	0,2513	0,2752	0,2593
0,20	0,3374	0,3384	0,3363	0,3324	0,3143	0,2974	0,2990	0,2838	0,2698	0,2711	0,2659	0,2625	0,2680	0,2570

Tabela 4.17 - Umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama na coluna A do solo LVE, nos diversos tempos de redistribuição da água.

z (m)	Umidade volumétrica ($m^3 \cdot m^{-3}$) - solo LVE - coluna A														
	t (dias)														
	0,0014	0,022	0,043	0,064	0,086	0,197	0,288	0,425	0,974	2,417	4,168	9,183	14,047	22,998	30,210
0,01	0,3749	0,2430	0,1810	0,1661	0,1818	0,1610	0,1362	0,1432	0,1586	0,1209	0,1059	0,1341	0,0875	0,1041	0,1504
0,02	0,3070	0,1872	0,1713	0,1642	0,1696	0,1517	0,1398	0,1334	0,1415	0,1192	0,1214	0,1420	0,0923	0,0905	0,1487
0,03	0,3316	0,2571	0,2196	0,2214	0,2150	0,2138	0,1794	0,1871	0,1916	0,1808	0,1684	0,1761	0,1574	0,1200	0,1978
0,04	0,2809	0,2045	0,1546	0,1629	0,1416	0,1577	0,1535	0,1448	0,1690	0,1411	0,1523	0,1515	0,1325	0,1163	0,1702
0,05	0,2729	0,2047	0,2094	0,1908	0,1889	0,1714	0,1752	0,1734	0,1916	0,1749	0,1748	0,1833	0,1468	0,1503	0,1866
0,06	0,3225	0,2452	0,2154	0,1877	0,2036	0,1780	0,1888	0,1669	0,1783	0,1430	0,1590	0,1783	0,1292	0,1217	0,1802
0,07	0,2908	0,2078	0,2053	0,1971	0,1911	0,1875	0,1669	0,1764	0,1914	0,1777	0,1665	0,1824	0,1635	0,1607	0,1745
0,08	0,3186	0,2573	0,2234	0,2279	0,2238	0,2012	0,1900	0,1963	0,1761	0,1813	0,1787	0,1868	0,1415	0,1250	0,1795
0,09	0,3183	0,2703	0,2512	0,2174	0,2125	0,1717	0,1838	0,1810	0,1814	0,1626	0,1705	0,1776	0,1528	0,1515	0,1853
0,10	0,3107	0,2774	0,2519	0,2282	0,2227	0,1909	0,1886	0,1826	0,1798	0,1746	0,1761	0,1994	0,1546	0,1387	0,1992
0,11	0,2877	0,2547	0,2351	0,1952	0,2024	0,1800	0,1932	0,1690	0,1873	0,1752	0,1786	0,1905	0,1496	0,1749	0,1770
0,12	0,2975	0,2662	0,2452	0,2008	0,2048	0,1725	0,1770	0,1745	0,1761	0,1748	0,1667	0,1789	0,1576	0,1467	0,1776
0,13	0,2993	0,2686	0,2674	0,2486	0,2623	0,2174	0,2088	0,2004	0,2116	0,1993	0,1946	0,1983	0,1707	0,1777	0,1909
0,14	0,3079	0,2770	0,2766	0,2634	0,2608	0,2500	0,2532	0,2299	0,2280	0,2209	0,2359	0,2286	0,1976	0,2011	0,2236
0,15	0,2841	0,2651	0,2562	0,2506	0,2499	0,1859	0,1831	0,1633	0,1703	0,1471	0,1608	0,1603	0,1236	0,1428	0,1461
0,16	0,3118	0,2949	0,2903	0,2856	0,2772	0,2576	0,2390	0,2131	0,2108	0,2062	0,2092	0,2004	0,1710	0,1888	0,2081
0,17	0,3019	0,2842	0,2880	0,2677	0,2729	0,2543	0,2474	0,2341	0,2259	0,2444	0,2407	0,2174	0,2147	0,2033	0,2189
0,18	0,3287	0,2916	0,2903	0,2800	0,2795	0,2418	0,2476	0,2362	0,2368	0,2122	0,2198	0,2373	0,2020	0,2120	0,2391
0,19	0,3065	0,2885	0,3022	0,2796	0,2736	0,2725	0,2517	0,2463	0,2296	0,2139	0,2201	0,2100	0,1879	0,2037	0,1807
0,20	0,3104	0,2905	0,2945	0,2859	0,2716	0,2740	0,2721	0,2540	0,2705	0,2616	0,2559	0,2360	0,2231	0,2182	0,2337

Tabela 4.18 - Umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama na coluna B do solo LVE, nos diversos tempos de redistribuição da água.

Umidade volumétrica (m ³ ·m ⁻³) - solo LVE - coluna B														
z (m)	t (dias)													
	0,0014	0,022	0,042	0,078	0,222	0,424	0,933	2,272	4,184	9,140	13,169	21,996	29,208	
0,01	0,3154	0,2204	0,1852	0,1907	0,1567	0,1507	0,1360	0,1229	0,1311	0,1300	0,1499	0,1278	0,1325	
0,02	0,3023	0,2232	0,2099	0,1801	0,1581	0,1682	0,1644	0,1658	0,1449	0,1548	0,1440	0,1536	0,1440	
0,03	0,2851	0,2314	0,2255	0,2021	0,1793	0,1787	0,1813	0,1595	0,1540	0,1692	0,1599	0,1347	0,1617	
0,04	0,2824	0,2365	0,2161	0,1969	0,1902	0,1624	0,1609	0,1367	0,1466	0,1553	0,1439	0,1370	0,1419	
0,05	0,3140	0,2349	0,2245	0,1917	0,1754	0,1735	0,1719	0,1631	0,1694	0,1608	0,1650	0,1570	0,1667	
0,06	0,2933	0,2029	0,1834	0,1974	0,1609	0,1501	0,1508	0,1314	0,1390	0,1565	0,1467	0,1309	0,1522	
0,07	0,3081	0,2436	0,2176	0,1992	0,1799	0,1710	0,1745	0,1496	0,1644	0,1614	0,1550	0,1593	0,1645	
0,08	0,2933	0,2631	0,2276	0,2219	0,1839	0,1704	0,1774	0,1872	0,1769	0,1680	0,1701	0,1705	0,1639	
0,09	0,2911	0,2547	0,2445	0,2297	0,1839	0,1727	0,1795	0,1823	0,1844	0,2034	0,1814	0,1751	0,1770	
0,10	0,3020	0,2736	0,2516	0,2293	0,1946	0,1961	0,1860	0,1672	0,1692	0,1805	0,1689	0,1439	0,1684	
0,11	0,2712	0,2587	0,2228	0,1988	0,1804	0,1728	0,1793	0,1548	0,1625	0,1709	0,1671	0,1457	0,1544	
0,12	0,2912	0,2856	0,2664	0,2426	0,2103	0,1948	0,1957	0,1706	0,1706	0,1688	0,1575	0,1498	0,1464	
0,13	0,3020	0,2787	0,2532	0,2442	0,2217	0,2149	0,2020	0,2101	0,2086	0,2152	0,2134	0,2161	0,2029	
0,14	0,3003	0,2903	0,2773	0,2776	0,2258	0,1908	0,1961	0,1871	0,2009	0,1975	0,1942	0,1862	0,1852	
0,15	0,2996	0,2714	0,2819	0,2510	0,2218	0,1817	0,1932	0,1875	0,1925	0,1908	0,1875	0,1954	0,1892	
0,16	0,2900	0,2696	0,2763	0,2609	0,2056	0,1945	0,1964	0,1847	0,1819	0,1823	0,1756	0,1690	0,1708	
0,17	0,3001	0,2960	0,2954	0,2682	0,2646	0,2493	0,2503	0,2188	0,2406	0,2301	0,2207	0,2011	0,2217	
0,18	0,3065	0,2973	0,2828	0,2878	0,2692	0,2489	0,2433	0,2077	0,2222	0,2185	0,2114	0,1981	0,1948	
0,19	0,3089	0,3032	0,2693	0,2743	0,2342	0,2370	0,2239	0,2249	0,2228	0,2079	0,2052	0,2066	0,2057	
0,20	0,2902	0,2849	0,2671	0,2673	0,2321	0,2345	0,2106	0,2124	0,2061	0,2111	0,2098	0,2097	0,2094	

Tabela 4.19 - Umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama na coluna C do solo LVE, nos diversos tempos de redistribuição da água.

z (m)	Umidade volumétrica (m ³ .m ⁻³) - solo LVE - coluna C														
	t (dias)														
	0,0014	0,022	0,044	0,071	0,100	0,231	0,444	0,996	2,197	4,028	9,112	13,011	22,167	29,173	
0,01	0,3284	0,2696	0,2467	0,2439	0,2239	0,1984	0,1911	0,1789	0,1739	0,1929	0,1809	0,2007	0,1565	0,1930	
0,02	0,3077	0,2327	0,2201	0,2069	0,1969	0,1814	0,1764	0,1710	0,1484	0,1639	0,1464	0,1643	0,1357	0,1552	
0,03	0,3153	0,2529	0,2285	0,1968	0,2011	0,1690	0,1492	0,1530	0,1404	0,1627	0,1638	0,1618	0,1429	0,1539	
0,04	0,2877	0,2258	0,2123	0,1778	0,1843	0,1681	0,1703	0,1719	0,1688	0,1672	0,1726	0,1735	0,1725	0,1741	
0,05	0,2984	0,2441	0,2262	0,2121	0,1946	0,1829	0,1701	0,1550	0,1540	0,1689	0,1528	0,1505	0,1586	0,1651	
0,06	0,3096	0,2646	0,2510	0,2480	0,2335	0,2034	0,1893	0,1812	0,1869	0,1810	0,1736	0,1818	0,1759	0,1753	
0,07	0,3054	0,2967	0,2527	0,2345	0,2209	0,2115	0,2003	0,1914	0,1871	0,1970	0,1954	0,1837	0,1776	0,1843	
0,08	0,2837	0,2643	0,2287	0,2217	0,2057	0,1909	0,1837	0,1755	0,1737	0,1826	0,1782	0,1702	0,1627	0,1643	
0,09	0,2812	0,2319	0,2047	0,2089	0,1906	0,1703	0,1671	0,1596	0,1603	0,1683	0,1610	0,1568	0,1479	0,1443	
0,10	0,3061	0,2891	0,2792	0,2628	0,2535	0,2410	0,2196	0,2086	0,2049	0,2088	0,1965	0,2042	0,1882	0,1951	
0,11	0,2894	0,2624	0,2718	0,2605	0,2490	0,2189	0,1894	0,1918	0,1930	0,1862	0,1918	0,1872	0,1865	0,1887	
0,12	0,3022	0,2916	0,2824	0,2738	0,2603	0,2246	0,2049	0,2087	0,2059	0,2111	0,1971	0,2083	0,2000	0,2031	
0,13	0,3075	0,2775	0,2775	0,2537	0,2427	0,1981	0,1882	0,1821	0,1800	0,1851	0,1713	0,1760	0,1568	0,1648	
0,14	0,2923	0,2700	0,2665	0,2661	0,2635	0,2442	0,2438	0,2297	0,2254	0,2204	0,2219	0,2283	0,2041	0,2154	
0,15	0,3192	0,3044	0,2935	0,2815	0,2884	0,2744	0,2563	0,2554	0,2445	0,2460	0,2320	0,2290	0,2325	0,2265	
0,16	0,2972	0,2812	0,2852	0,2643	0,2377	0,2246	0,1864	0,2020	0,1998	0,1926	0,1828	0,1937	0,1733	0,1811	
0,17	0,3074	0,2806	0,2831	0,2691	0,2628	0,2318	0,2216	0,2152	0,2177	0,2039	0,2136	0,2193	0,2146	0,2139	
0,18	0,2892	0,2730	0,2570	0,2436	0,2333	0,2171	0,1780	0,1904	0,1892	0,1853	0,1982	0,1910	0,1843	0,1954	
0,19	0,3083	0,2936	0,2869	0,2819	0,2827	0,2689	0,2809	0,2730	0,2687	0,2273	0,2465	0,2443	0,2507	0,2279	
0,20	0,3171	0,2912	0,2790	0,2543	0,2725	0,2306	0,2281	0,2254	0,2272	0,2183	0,2071	0,2107	0,2187	0,2186	

Tabela 4.20 - Umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama na coluna D do solo LVE, nos diversos tempos de redistribuição da água.

z(m)	Umidade volumétrica (m ³ .m ⁻³) - solo LVE - coluna D													
	t (dias)													
	0,0014	0,022	0,045	0,072	0,107	0,183	0,443	0,996	2,210	5,193	10,031	19,188	26,192	
0,01	0,3291	0,2164	0,1833	0,1934	0,1852	0,1918	0,1491	0,1763	0,1539	0,1566	0,1507	0,1624	0,1312	
0,02	0,2633	0,2067	0,1837	0,1752	0,1679	0,1543	0,1526	0,1503	0,1456	0,1388	0,1319	0,1350	0,1320	
0,03	0,2880	0,2349	0,2018	0,1842	0,1822	0,1712	0,1634	0,1655	0,1613	0,1702	0,1584	0,1700	0,1636	
0,04	0,2884	0,2410	0,1944	0,2037	0,1837	0,1836	0,1705	0,1617	0,1603	0,1581	0,1554	0,1669	0,1719	
0,05	0,2762	0,2111	0,1996	0,1990	0,1685	0,1747	0,1601	0,1610	0,1506	0,1514	0,1430	0,1657	0,1405	
0,06	0,3031	0,2216	0,2148	0,2020	0,1977	0,1840	0,1721	0,1674	0,1624	0,1652	0,1627	0,1644	0,1223	
0,07	0,2898	0,2491	0,2250	0,1960	0,2095	0,1711	0,1650	0,1516	0,1690	0,1514	0,1609	0,1629	0,1669	
0,08	0,2954	0,2533	0,2202	0,2168	0,2054	0,1821	0,1793	0,1756	0,1731	0,1684	0,1613	0,1653	0,1588	
0,09	0,3065	0,2713	0,2543	0,2372	0,2290	0,2033	0,1905	0,1813	0,1818	0,1759	0,1766	0,1766	0,1673	
0,10	0,2874	0,2735	0,2565	0,2488	0,2401	0,2244	0,2017	0,1871	0,1906	0,1834	0,1920	0,1879	0,1757	
0,11	0,2934	0,2558	0,2416	0,2282	0,2165	0,1927	0,1794	0,1793	0,1693	0,1857	0,1801	0,1678	0,1806	
0,12	0,3007	0,2756	0,2724	0,2604	0,2444	0,2199	0,1883	0,1860	0,1811	0,1797	0,1803	0,1846	0,1604	
0,13	0,2911	0,2554	0,2554	0,2353	0,2377	0,2205	0,2089	0,1741	0,2007	0,1988	0,1902	0,1983	0,1939	
0,14	0,2779	0,2776	0,2685	0,2639	0,2533	0,2571	0,1999	0,2030	0,1897	0,1893	0,1741	0,2041	0,1669	
0,15	0,2921	0,2606	0,2505	0,2466	0,2311	0,2221	0,1864	0,1821	0,1646	0,1764	0,1727	0,1845	0,1804	
0,16	0,2966	0,2625	0,2469	0,2299	0,2245	0,1996	0,1744	0,1814	0,1863	0,1743	0,1813	0,1668	0,1755	
0,17	0,2899	0,2834	0,2578	0,2650	0,2337	0,2471	0,2029	0,2224	0,1844	0,1965	0,1808	0,2282	0,2095	
0,18	0,2993	0,2812	0,2735	0,2787	0,2805	0,2602	0,2248	0,2217	0,2105	0,2096	0,2062	0,2059	0,1894	
0,19	0,3110	0,2927	0,2929	0,2916	0,2742	0,2616	0,2526	0,2354	0,2281	0,2321	0,2195	0,2149	0,2300	
0,20	0,2982	0,2902	0,2946	0,2791	0,2789	0,2862	0,2526	0,2368	0,2316	0,2182	0,2012	0,2101	0,2089	

Tabela 4.21 - Umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama na coluna E do solo LVE, nos diversos tempos de redistribuição da água.

Umidade volumétrica (m ³ .m ⁻³) - solo LVE - coluna E													
z (m)	t (dias)												
	0,0007	0,020	0,041	0,061	0,081	0,106	0,199	0,444	0,984	2,221	7,106	16,060	23,276
0,01	0,3456	0,3004	0,2548	0,2365	0,2107	0,1975	0,1989	0,1835	0,1843	0,1653	0,1670	0,1501	0,1651
0,02	0,2806	0,2335	0,1775	0,1699	0,1547	0,2036	0,1904	0,1759	0,1964	0,1988	0,1938	0,1795	0,1758
0,03	0,2690	0,2041	0,1497	0,1534	0,1317	0,1781	0,1594	0,1743	0,1748	0,1702	0,1634	0,1560	0,1551
0,04	0,2780	0,2249	0,1926	0,2015	0,1805	0,1988	0,2026	0,1582	0,1564	0,1642	0,1457	0,1336	0,1310
0,05	0,2974	0,2732	0,2365	0,2205	0,2058	0,2263	0,2123	0,1884	0,1961	0,1792	0,1832	0,1819	0,1883
0,06	0,2892	0,2600	0,2169	0,2175	0,2021	0,1974	0,1743	0,1652	0,1750	0,1647	0,1710	0,1583	0,1561
0,07	0,2675	0,2440	0,2010	0,1955	0,1797	0,2003	0,1956	0,1854	0,1858	0,1953	0,1973	0,1746	0,1808
0,08	0,2907	0,2937	0,2524	0,2286	0,2196	0,2251	0,2057	0,1874	0,2067	0,1993	0,2088	0,1786	0,2024
0,09	0,2896	0,2330	0,1927	0,1825	0,1645	0,1727	0,1572	0,1609	0,1223	0,1557	0,1447	0,1356	0,1486
0,10	0,2673	0,2639	0,2184	0,2040	0,2011	0,2106	0,2077	0,1812	0,1673	0,1606	0,1691	0,1582	0,1588
0,11	0,2989	0,2882	0,2491	0,2428	0,2328	0,2428	0,2187	0,2127	0,2114	0,2039	0,2022	0,1888	0,1919
0,12	0,2842	0,3017	0,2642	0,2610	0,2313	0,2688	0,2359	0,2145	0,1954	0,1934	0,1804	0,2108	0,1935
0,13	0,3030	0,3079	0,2762	0,2692	0,2483	0,2244	0,2174	0,1924	0,1905	0,1939	0,1871	0,1954	0,1937
0,14	0,2808	0,2771	0,2522	0,2578	0,2288	0,2484	0,2254	0,1972	0,1673	0,1884	0,1668	0,1799	0,1655
0,15	0,2947	0,2861	0,2609	0,2609	0,2461	0,2655	0,2493	0,2459	0,2372	0,2321	0,2463	0,2214	0,2167
0,16	0,2927	0,3087	0,2881	0,2873	0,2841	0,2773	0,2531	0,2445	0,2370	0,2211	0,2292	0,1916	0,2058
0,17	0,2884	0,2668	0,2386	0,2369	0,2134	0,2390	0,2180	0,2226	0,2184	0,1993	0,2110	0,1956	0,1911
0,18	0,2981	0,2888	0,2810	0,2774	0,2689	0,2805	0,2718	0,2703	0,2481	0,2471	0,2301	0,2213	0,2153
0,19	0,3000	0,3084	0,3063	0,2941	0,3026	0,2848	0,2845	0,2505	0,2507	0,2216	0,2274	0,2070	0,2215
0,20	0,2874	0,3004	0,2765	0,2748	0,2632	0,2894	0,2920	0,2807	0,2810	0,2699	0,2629	0,2466	0,2280

Tabela 4.22 - Umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama na coluna F do solo LVE, nos diversos tempos de redistribuição da água.

Umidade volumétrica (m ³ .m ⁻³) - solo LVE - coluna F											
z (m)	t (dias)										
	0,0014	0,019	0,037	0,055	0,076	0,192	0,401	1,076	7,058	16,213	23,217
0,01	0,2927	0,1973	0,1717	0,1578	0,1358	0,1250	0,1398	0,1389	0,1357	0,1426	0,1223
0,02	0,2837	0,1906	0,1853	0,1788	0,1570	0,1490	0,1590	0,1377	0,1513	0,1411	0,1339
0,03	0,2777	0,1832	0,1703	0,1645	0,1421	0,1368	0,1461	0,1492	0,1467	0,1528	0,1367
0,04	0,2652	0,2005	0,1799	0,1700	0,1391	0,1412	0,1331	0,1412	0,1375	0,1337	0,1296
0,05	0,2956	0,2393	0,2186	0,2014	0,1768	0,1635	0,1659	0,1653	0,1586	0,1638	0,1539
0,06	0,2902	0,2164	0,2037	0,1871	0,1576	0,1434	0,1710	0,1618	0,1534	0,1534	0,1465
0,07	0,2956	0,2449	0,2225	0,2002	0,1810	0,1721	0,1751	0,1715	0,1480	0,1719	0,1534
0,08	0,2787	0,2085	0,1925	0,1802	0,1436	0,1358	0,1431	0,1469	0,1373	0,1380	0,1393
0,09	0,2832	0,2269	0,2262	0,2175	0,2000	0,1927	0,1935	0,1854	0,1904	0,1900	0,1901
0,10	0,2201	0,1785	0,1727	0,1537	0,1399	0,1358	0,1412	0,1402	0,1369	0,1430	0,1368
0,11	0,2385	0,1979	0,1746	0,1736	0,1764	0,1597	0,1635	0,1671	0,1686	0,1708	0,1554
0,12	0,2752	0,2398	0,2281	0,2127	0,1901	0,1851	0,1753	0,1790	0,1850	0,1782	0,1617
0,13	0,2994	0,2591	0,2259	0,2154	0,2193	0,2043	0,2045	0,2026	0,1910	0,1862	0,2077
0,14	0,2968	0,2563	0,2430	0,2287	0,2102	0,2121	0,2133	0,2011	0,1920	0,1964	0,1773
0,15	0,2837	0,2363	0,2196	0,2190	0,1857	0,1945	0,1994	0,1846	0,1941	0,1818	0,1853
0,16	0,3106	0,2827	0,2628	0,2542	0,2382	0,2278	0,2300	0,2208	0,2297	0,2282	0,2064
0,17	0,3142	0,2656	0,2264	0,2208	0,2111	0,1998	0,2105	0,2083	0,2060	0,2001	0,2091
0,18	0,3217	0,2963	0,2922	0,2527	0,2271	0,2087	0,2219	0,2126	0,2196	0,2221	0,2159
0,19	0,2756	0,2548	0,2294	0,2323	0,2154	0,2091	0,2053	0,2044	0,1950	0,2057	0,1949
0,20	0,3200	0,3268	0,2875	0,2778	0,2447	0,2481	0,2406	0,2274	0,2295	0,2288	0,2317

Tabela 4.23 - Umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama na coluna A do solo LRd, nos diversos tempos de redistribuição da água.

z (m)	Umidade volumétrica (m ³ .m ⁻³) - solo LRd - coluna A									
	t (dias)									
	0,0014	0,049	0,179	0,451	1,167	2,187	3,990	6,982	13,192	22,983
0,01	0,4207	0,2975	0,3081	0,2792	0,2480	0,2879	0,2885	0,2545	0,2647	0,2235
0,02	0,4382	0,3398	0,3467	0,3040	0,3003	0,3053	0,3161	0,2951	0,2834	0,2477
0,03	0,4663	0,3698	0,3445	0,3287	0,3259	0,3138	0,3038	0,3178	0,3011	0,2954
0,04	0,4666	0,3998	0,3927	0,3878	0,3733	0,3699	0,3444	0,3279	0,3415	0,3106
0,05	0,4788	0,3821	0,3502	0,3559	0,3353	0,3393	0,3426	0,3079	0,3309	0,2840
0,06	0,5217	0,4334	0,4175	0,4022	0,3899	0,4022	0,4121	0,3916	0,3894	0,3759
0,07	0,4680	0,3991	0,3920	0,3710	0,3502	0,3600	0,3576	0,3208	0,3373	0,2992
0,08	0,4778	0,4388	0,4279	0,3914	0,3801	0,3671	0,3753	0,3554	0,3411	0,3554
0,09	0,5145	0,4481	0,4325	0,4079	0,4000	0,4036	0,3762	0,3785	0,3741	0,3579
0,10	0,4912	0,4562	0,4313	0,4106	0,3841	0,3855	0,3895	0,3564	0,3572	0,3387
0,11	0,5128	0,4296	0,4105	0,3911	0,3956	0,3654	0,3601	0,3713	0,3566	0,3628
0,12	0,5198	0,4457	0,4535	0,4148	0,3991	0,4116	0,3996	0,3747	0,3756	0,3559
0,13	0,4977	0,4569	0,4568	0,4307	0,4147	0,4054	0,4216	0,3804	0,3715	0,3465
0,14	0,5181	0,5001	0,4899	0,4735	0,4533	0,4499	0,4183	0,4193	0,3970	0,3898
0,15	0,4962	0,5066	0,4848	0,4605	0,4476	0,4185	0,4322	0,4100	0,3914	0,3915
0,16	0,5136	0,5014	0,4837	0,4681	0,4532	0,4327	0,4213	0,4085	0,3893	0,3788
0,17	0,5062	0,4613	0,4699	0,4603	0,4403	0,4121	0,4114	0,3989	0,3773	0,3647
0,18	0,5388	0,4889	0,4273	0,4484	0,4446	0,4015	0,3925	0,4123	0,3971	0,3905
0,19	0,4937	0,4983	0,4977	0,5058	0,4847	0,4862	0,4787	0,4421	0,4178	0,3841
0,20	0,5205	0,4583	0,4183	0,4428	0,4074	0,4083	0,3691	0,3945	0,3699	0,3729

Tabela 4.24 - Umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama na coluna B do solo LRd, nos diversos tempos de redistribuição da água.

z (m)	Umidade volumétrica ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) - solo LRd - coluna B									
	t (dias)									
	0,0021	0,043	0,185	1,024	2,039	5,031	11,251	21,035		
0,01	0,4561	0,3645	0,3377	0,3277	0,3169	0,2969	0,2754	0,2611		
0,02	0,4670	0,3734	0,3476	0,3286	0,3428	0,3311	0,3342	0,3213		
0,03	0,4704	0,3995	0,3849	0,3650	0,3434	0,3333	0,3313	0,3077		
0,04	0,5121	0,4649	0,4457	0,4286	0,4134	0,3964	0,3913	0,3644		
0,05	0,4973	0,4474	0,4151	0,4076	0,3932	0,3806	0,3581	0,3380		
0,06	0,4921	0,4463	0,4273	0,4103	0,3962	0,3933	0,3815	0,3506		
0,07	0,4921	0,4611	0,4474	0,4152	0,4029	0,3844	0,3785	0,3578		
0,08	0,5013	0,4688	0,4526	0,4186	0,4161	0,4001	0,3848	0,3668		
0,09	0,5098	0,4637	0,4389	0,4053	0,4146	0,4001	0,3890	0,3772		
0,10	0,5118	0,4659	0,4634	0,4336	0,4248	0,3970	0,3923	0,3749		
0,11	0,4899	0,4460	0,4192	0,3962	0,3714	0,3694	0,3448	0,3385		
0,12	0,4973	0,4583	0,4281	0,3949	0,3935	0,3757	0,3655	0,3616		
0,13	0,4655	0,4437	0,4268	0,3846	0,3857	0,3658	0,3558	0,3238		
0,14	0,4862	0,4686	0,4397	0,4224	0,3873	0,3966	0,3662	0,3549		
0,15	0,4745	0,4304	0,4273	0,3916	0,3726	0,3664	0,3493	0,3371		
0,16	0,4982	0,4337	0,4059	0,3967	0,3791	0,3548	0,3491	0,3242		
0,17	0,5015	0,4792	0,4586	0,4282	0,4213	0,4076	0,3856	0,3657		
0,18	0,4672	0,4496	0,4449	0,4002	0,3691	0,3661	0,3421	0,3162		
0,19	0,4575	0,4067	0,4130	0,3871	0,3716	0,3651	0,3441	0,3528		
0,20	0,4740	0,4619	0,4616	0,4194	0,4152	0,4003	0,3856	0,3554		

Tabela 4.25 - Umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama na coluna C do solo LRD, nos diversos tempos de redistribuição da água.

z (m)	Umidade volumétrica ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) - solo LRD - coluna C									
	t (dias)									
	0,0014	0,058	0,182	0,426	0,985	4,059	10,278	20,063		
0,01	0,4409	0,3783	0,3463	0,3536	0,3430	0,3175	0,3194	0,2860		
0,02	0,4582	0,3735	0,3594	0,3772	0,3569	0,3461	0,3257	0,2834		
0,03	0,4462	0,4055	0,3833	0,3996	0,3806	0,3623	0,3406	0,2877		
0,04	0,4417	0,3949	0,3687	0,3578	0,3644	0,3418	0,3311	0,3087		
0,05	0,4754	0,4273	0,4016	0,4146	0,4135	0,3779	0,3588	0,3244		
0,06	0,4259	0,3696	0,3482	0,3436	0,3607	0,3437	0,3372	0,2967		
0,07	0,4629	0,4334	0,4039	0,4064	0,3842	0,3781	0,3586	0,3435		
0,08	0,4804	0,4259	0,4182	0,3997	0,3994	0,3786	0,3770	0,3523		
0,09	0,4683	0,4413	0,4366	0,4291	0,4067	0,3902	0,3704	0,3534		
0,10	0,4432	0,3884	0,3711	0,3715	0,3751	0,3466	0,3313	0,3322		
0,11	0,4949	0,4340	0,4106	0,4252	0,4143	0,3987	0,3783	0,3506		
0,12	0,4899	0,4548	0,4178	0,4184	0,4067	0,3952	0,3745	0,3376		
0,13	0,4834	0,4223	0,3955	0,3934	0,4026	0,3765	0,3676	0,3418		
0,14	0,4543	0,3946	0,3795	0,3821	0,3964	0,3778	0,3741	0,3335		
0,15	0,4817	0,4493	0,4397	0,4065	0,4257	0,4020	0,3838	0,3451		
0,16	0,4803	0,4611	0,4533	0,4476	0,4433	0,4003	0,3811	0,3588		
0,17	0,5064	0,4757	0,4531	0,4326	0,4211	0,3930	0,3734	0,3645		
0,18	0,4567	0,4127	0,3690	0,3797	0,3826	0,3714	0,3321	0,3272		
0,19	0,5151	0,4950	0,4777	0,4503	0,4374	0,4033	0,3753	0,3767		
0,20	0,4924	0,4534	0,4386	0,4300	0,4324	0,4072	0,3819	0,3609		

Tabela 4.26 - Coeficiente de variação na umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama, na coluna B do solo LVA durante a redistribuição da água.

Coeficiente de Variação (%) - solo LVa - coluna B																	
z (m)	t (dias)																
	0,005	0,028	0,052	0,076	0,154	0,286	0,432	0,942	1,252	2,040	3,258	4,267	8,240	11,156	13,056	17,233	média
0,01	5,55	6,24	6,87	6,51	7,46	7,06	6,98	7,89	7,17	7,40	8,91	7,91	8,33	7,75	7,57	8,69	7,39
0,02	4,93	5,35	5,68	5,54	5,91	6,26	6,01	6,35	6,10	6,44	6,94	7,20	6,45	6,75	6,88	7,12	6,24
0,03	4,38	4,68	5,02	4,97	5,25	5,38	5,46	5,55	5,94	6,12	5,96	6,25	6,28	6,43	6,36	6,45	5,65
0,04	4,55	4,83	5,05	5,28	5,54	5,58	5,64	5,99	6,02	6,09	6,54	6,26	6,36	6,54	6,56	6,37	5,82
0,05	4,62	4,75	4,83	5,13	5,07	5,36	5,53	5,70	6,62	7,25	6,32	6,21	6,86	6,98	6,37	6,36	5,87
0,06	5,21	5,08	5,06	4,92	5,32	5,63	5,78	6,30	6,27	6,55	6,69	6,96	6,60	6,55	6,70	6,71	6,02
0,07	4,44	4,73	4,64	4,58	4,77	5,04	5,21	5,73	5,89	6,03	6,19	6,10	6,10	6,26	6,40	5,98	5,50
0,08	4,86	4,94	5,06	5,07	5,68	5,31	5,59	6,52	5,83	5,93	6,91	6,45	6,71	7,31	6,47	6,66	5,96
0,09	4,52	4,86	4,89	5,13	5,05	5,64	5,73	5,99	5,92	5,93	6,20	6,14	6,50	6,18	6,23	6,89	5,74
0,10	4,71	4,99	5,39	5,52	5,79	5,84	6,14	7,01	6,24	6,25	6,49	6,52	6,52	6,36	6,36	7,14	6,08
0,11	4,58	4,92	4,98	5,17	5,51	5,19	5,60	5,98	5,85	6,44	6,76	6,38	6,80	6,73	6,61	6,60	5,88
0,12	4,72	4,95	5,05	5,11	5,38	5,42	5,60	6,03	6,20	6,42	6,60	6,73	6,74	6,61	6,39	6,86	5,93
0,13	4,79	4,79	4,90	4,87	4,84	5,30	5,31	5,90	5,94	6,17	6,18	6,68	6,78	6,75	6,61	6,98	5,80
0,14	4,60	4,82	5,02	4,92	5,12	5,23	5,58	5,83	5,62	6,08	6,46	6,25	6,40	6,22	6,37	6,52	5,69
0,15	4,26	4,33	4,59	4,57	4,56	4,75	4,97	5,12	5,47	5,84	5,39	5,34	6,00	6,06	5,95	5,91	5,19
0,16	4,49	4,54	4,66	4,80	4,94	5,07	5,38	5,44	5,90	5,95	6,07	5,73	6,40	6,24	6,25	6,28	5,51
0,17	4,58	4,65	4,74	4,76	4,71	5,09	4,96	5,20	5,77	5,64	5,49	5,76	5,85	5,82	5,73	5,67	5,28
0,18	4,64	4,68	4,77	4,69	4,88	4,80	5,20	5,39	5,76	5,94	6,11	6,00	6,48	6,49	6,32	6,66	5,55
0,19	4,67	4,83	4,90	5,01	5,06	5,19	5,53	5,75	5,91	5,85	5,99	6,39	5,96	6,57	6,26	7,00	5,68
0,20	4,58	4,81	4,94	4,87	4,82	4,97	5,17	5,40	5,60	5,76	6,26	6,17	6,23	6,34	6,20	6,60	5,54

Tabela 4.27 - Coeficiente de variação na umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama, na coluna E do solo LVA durante a redistribuição da água.

Coeficiente de variação (%) - solo LVa - coluna E																	
z (m)	t (dias)															média	
	0,005	0,033	0,062	0,162	0,273	0,413	0,944	1,290	2,192	3,321	4,164	5,159	7,297	11,204	14,020		16,117
0,01	4,21	5,23	5,47	5,62	5,83	5,92	6,45	6,36	6,24	6,47	6,87	6,31	6,29	6,41	6,35	6,46	6,03
0,02	4,33	4,73	5,07	5,35	5,44	5,54	5,78	5,91	5,88	6,25	6,07	5,89	6,20	5,86	6,05	6,07	5,65
0,03	4,58	5,88	5,63	6,51	6,00	6,42	6,17	6,81	7,01	7,15	7,43	7,25	7,28	6,83	7,41	7,27	6,60
0,04	4,52	4,82	4,80	5,40	5,31	5,43	5,62	5,67	6,18	6,61	6,13	5,95	6,18	6,09	6,04	6,19	5,68
0,05	4,81	5,09	5,34	5,68	5,56	5,99	6,14	6,19	6,42	6,80	6,71	6,96	6,84	6,82	6,53	6,40	6,14
0,06	4,61	4,88	5,12	4,98	5,22	5,26	5,46	6,28	6,15	6,13	6,28	6,15	6,18	6,19	6,26	6,39	5,72
0,07	4,57	5,00	5,54	5,75	5,93	5,84	6,12	6,31	6,38	6,63	6,38	6,12	6,52	6,48	6,39	6,81	6,05
0,08	4,55	4,68	4,85	5,30	4,99	5,02	5,29	5,67	5,86	6,19	6,02	6,07	6,16	6,15	6,14	5,86	5,55
0,09	4,47	4,59	4,84	4,94	5,32	5,59	6,08	5,94	6,03	6,35	6,34	6,42	6,72	6,48	6,42	6,34	5,80
0,10	4,57	4,51	4,65	4,83	4,76	5,01	5,32	5,40	5,96	6,11	6,09	6,02	6,07	6,27	6,19	5,99	5,48
0,11	4,40	4,66	4,76	4,80	4,93	5,14	5,46	5,60	5,95	6,24	5,82	6,13	5,75	5,95	6,32	6,09	5,50
0,12	4,77	5,13	5,20	5,62	5,87	5,70	5,88	6,23	6,69	6,56	6,90	7,00	6,92	6,72	6,92	6,78	6,18
0,13	4,89	4,82	4,82	4,78	4,74	4,98	5,26	5,48	5,94	6,02	6,05	6,18	6,19	6,21	6,39	6,31	5,57
0,14	4,79	4,68	4,82	4,57	5,01	5,15	5,30	5,56	6,18	5,90	6,53	6,04	6,52	6,29	6,44	6,47	5,64
0,15	4,46	4,82	4,88	5,02	5,12	5,28	5,38	5,91	6,05	6,24	6,08	5,86	5,78	6,09	5,90	5,80	5,54
0,16	4,65	4,68	4,70	5,00	5,03	5,19	5,55	5,69	6,02	6,01	5,95	6,07	6,04	6,24	6,15	6,23	5,58
0,17	4,47	4,62	4,67	4,85	5,23	5,38	5,75	5,42	5,55	5,67	5,93	5,85	6,10	5,91	6,08	5,93	5,46
0,18	4,83	4,69	4,97	4,94	5,11	5,24	5,67	5,74	5,86	6,31	6,29	6,22	6,48	6,50	6,56	6,14	5,72
0,19	4,68	4,83	4,84	5,13	5,13	5,15	5,60	5,43	5,80	6,17	5,95	5,90	6,06	6,34	6,21	5,87	5,57
0,20	4,65	4,88	4,81	4,92	5,03	5,22	5,55	5,60	5,71	5,79	5,88	5,90	5,88	5,83	5,99	6,17	5,49

Tabela 4.28 - Coeficiente de variação na umidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama, na coluna C do solo LVE durante a redistribuição da água.

z (m)	Coeficiente de variação (%) - solo LVE - coluna C														média
	t (dias)														
	0,0014	0,022	0,044	0,071	0,100	0,231	0,444	0,996	2,197	4,028	9,112	13,011	22,167	29,173	
0,01	5,06	6,04	6,54	6,61	7,15	8,00	8,30	8,87	9,09	8,25	8,76	7,91	10,03	8,21	7,77
0,02	5,41	6,96	7,33	7,76	8,12	8,78	9,01	9,33	10,63	9,69	10,78	9,62	11,58	10,16	8,94
0,03	5,34	6,51	7,14	8,20	8,04	9,46	10,66	10,46	11,31	9,85	9,79	9,85	11,13	10,33	9,15
0,04	5,74	7,16	7,58	8,94	8,64	9,43	9,32	9,29	9,42	9,52	9,24	9,14	9,23	9,12	8,70
0,05	5,54	6,64	7,13	7,56	8,19	8,68	9,30	10,20	10,24	9,39	10,33	10,42	9,96	9,56	8,80
0,06	5,38	6,19	6,50	6,57	6,94	7,89	8,44	8,84	8,56	8,83	9,18	8,75	9,06	9,06	7,87
0,07	5,47	5,62	6,49	6,95	7,34	7,65	8,05	8,44	8,60	8,21	8,27	8,72	9,04	8,69	7,68
0,08	5,76	6,00	6,92	7,12	7,66	8,32	8,66	9,11	9,20	8,70	8,98	9,37	9,80	9,69	8,23
0,09	5,89	7,02	7,88	7,73	8,42	9,36	9,54	10,01	9,95	9,51	9,91	10,11	10,73	10,95	9,07
0,10	5,48	5,77	5,95	6,29	6,50	6,81	7,42	7,82	7,93	7,80	8,26	7,92	8,59	8,27	7,20
0,11	5,78	6,31	6,12	6,36	6,62	7,46	8,54	8,48	8,41	8,70	8,47	8,61	8,69	8,56	7,65
0,12	5,54	5,72	5,89	6,05	6,34	7,26	7,91	7,81	7,89	7,72	8,22	7,77	8,11	7,96	7,16
0,13	5,41	5,93	5,93	6,43	6,69	8,08	8,48	8,79	8,86	8,64	9,29	9,01	10,09	9,59	7,94
0,14	5,68	6,10	6,17	6,18	6,24	6,69	6,70	7,11	7,22	7,38	7,33	7,10	7,92	7,50	6,81
0,15	5,21	5,43	5,61	5,83	5,70	5,97	6,35	6,40	6,65	6,62	6,98	7,03	6,96	7,10	6,27
0,16	5,60	5,89	5,81	6,23	6,86	7,23	8,60	8,02	8,09	8,37	8,79	8,29	9,23	8,83	7,56
0,17	5,39	5,85	5,80	6,07	6,20	6,96	7,26	7,50	7,40	7,87	7,54	7,32	7,50	7,49	6,87
0,18	5,71	6,01	6,35	6,67	6,93	7,42	8,93	8,43	8,45	8,63	8,10	8,34	8,66	8,17	7,63
0,19	5,39	5,63	5,75	5,84	5,83	6,10	5,87	6,05	6,13	7,14	6,63	6,65	6,52	7,09	6,19
0,20	5,23	5,64	5,86	6,37	5,99	6,98	7,05	7,16	7,09	7,37	7,73	7,57	7,35	7,33	6,77

Tabela 4.29 - Coeficiente de variação na unidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama, na coluna F do solo LVE durante a redistribuição da água.

z (m)	Coeficiente de variação (%) - solo LVE - coluna F												média
	t (dias)												
	0,0014	0,019	0,037	0,055	0,076	0,192	0,401	1,076	7,058	16,213	23,217	%	
0,01	5,63	8,07	9,20	9,96	11,48	12,46	11,14	11,25	11,46	10,98	12,65	10,39	
0,02	5,83	8,40	8,62	8,91	10,08	10,62	9,93	11,42	10,41	11,17	11,69	9,74	
0,03	5,97	8,76	9,38	9,69	11,13	11,57	10,81	10,64	10,77	10,41	11,52	10,06	
0,04	6,28	8,12	8,99	9,47	11,46	11,32	11,92	11,31	11,55	11,92	12,23	10,42	
0,05	5,72	6,93	7,53	8,12	9,18	9,90	9,72	9,79	10,14	9,88	10,44	8,85	
0,06	5,79	7,57	8,00	8,66	10,18	11,16	9,40	9,94	10,41	10,46	10,88	9,31	
0,07	5,71	6,77	7,39	8,15	8,96	9,41	9,21	9,43	10,79	9,41	10,44	8,70	
0,08	6,00	7,83	8,43	8,96	11,11	11,74	11,11	10,88	11,56	11,55	11,41	10,05	
0,09	5,91	7,23	7,25	7,52	8,13	8,44	8,36	8,73	8,49	8,54	8,50	7,92	
0,10	7,37	8,95	9,24	10,31	11,28	11,63	11,15	11,26	11,47	11,06	11,49	10,47	
0,11	6,82	8,10	9,10	9,15	9,02	9,93	9,66	9,50	9,38	9,31	10,14	9,10	
0,12	6,05	6,86	7,18	7,66	8,50	8,74	9,15	9,00	8,70	9,05	9,87	8,25	
0,13	5,60	6,38	7,23	7,56	7,44	7,96	7,91	8,01	8,43	8,67	7,80	7,54	
0,14	5,65	6,45	6,77	7,16	7,74	7,69	7,61	8,07	8,39	8,25	9,05	7,53	
0,15	5,86	6,92	7,40	7,42	8,65	8,31	8,08	8,71	8,28	8,84	8,65	7,92	
0,16	5,41	5,88	6,28	6,47	6,88	7,18	7,08	7,38	7,09	7,16	7,82	6,78	
0,17	5,35	6,22	7,20	7,37	7,69	8,10	7,68	7,79	7,83	8,09	7,73	7,37	
0,18	5,25	5,65	5,73	6,53	7,21	7,81	7,34	7,66	7,41	7,36	7,53	6,86	
0,19	6,00	6,44	7,09	7,01	7,52	7,75	7,84	7,90	8,22	7,86	8,23	7,44	
0,20	5,25	5,15	5,78	5,96	6,69	6,62	6,77	7,16	7,07	7,12	7,01	6,42	

Tabela 4.30 - Coeficiente de variação na unidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama, na coluna A do solo LRd durante a redistribuição da água.

z (m)	Coeficiente de variação (%) - solo LRd - coluna A										média
	t (dias)										
	0,0014	0,049	0,179	0,451	1,167	2,187	3,990	6,982	13,192	22,983	
0,01	3,71	5,04	4,87	5,32	5,95	5,19	5,17	5,81	5,59	6,55	5,32
0,02	3,62	4,52	4,43	4,97	5,04	4,96	4,80	5,13	5,30	6,01	4,88
0,03	3,42	4,17	4,43	4,61	4,66	4,82	4,95	4,77	4,99	5,10	4,59
0,04	3,45	3,93	3,99	4,03	4,17	4,20	4,47	4,68	4,51	4,92	4,23
0,05	3,33	4,04	4,36	4,29	4,54	4,48	4,44	4,90	4,58	5,27	4,42
0,06	3,08	3,60	3,71	3,83	3,94	3,84	3,75	3,93	3,94	4,08	3,77
0,07	3,44	3,95	4,00	4,19	4,42	4,31	4,33	4,79	4,56	5,10	4,31
0,08	3,36	3,61	3,68	3,97	4,08	4,20	4,12	4,33	4,48	4,33	4,02
0,09	3,14	3,53	3,63	3,82	3,89	3,86	4,09	4,09	4,12	4,29	3,85
0,10	3,31	3,52	3,68	3,84	4,08	4,06	4,02	4,36	4,34	4,56	3,98
0,11	3,17	3,68	3,82	3,97	3,94	4,22	4,27	4,17	4,31	4,26	3,98
0,12	3,12	3,55	3,50	3,77	3,91	3,80	3,89	4,13	4,11	4,32	3,81
0,13	3,27	3,51	3,50	3,68	3,81	3,88	3,75	4,11	4,18	4,46	3,82
0,14	3,17	3,26	3,32	3,41	3,54	3,56	3,79	3,79	3,96	4,04	3,58
0,15	3,29	3,23	3,35	3,49	3,59	3,80	3,69	3,87	4,02	4,03	3,64
0,16	3,19	3,26	3,35	3,44	3,54	3,68	3,76	3,88	4,03	4,14	3,63
0,17	3,23	3,49	3,43	3,49	3,63	3,84	3,84	3,96	4,14	4,28	3,73
0,18	3,02	3,27	3,66	3,50	3,54	3,86	3,93	3,78	3,89	3,96	3,64
0,19	3,35	3,32	3,32	3,27	3,40	3,39	3,43	3,68	3,85	4,15	3,51
0,20	3,11	3,46	3,74	3,56	3,83	3,82	4,16	3,94	4,16	4,14	3,79

Tabela 4.31 - Coeficiente de variação na unidade volumétrica medida por atenuação da radiação gama, na coluna C do solo LRd durante a redistribuição da água.

z (m)	Coeficiente de variação (%) - solo LRd - coluna C								média %
	t (dias)								
	0,0014	0,058	0,182	0,426	0,985	4,059	10,278	20,063	
0,01	3,40	3,87	4,18	4,08	4,19	4,50	4,46	4,94	4,20
0,02	3,33	3,96	4,10	3,91	4,10	4,22	4,44	5,04	4,14
0,03	3,49	3,78	3,97	3,81	3,97	4,16	4,38	5,10	4,08
0,04	3,44	3,78	4,01	4,09	4,03	4,28	4,38	4,68	4,09
0,05	3,27	3,58	3,77	3,65	3,66	3,97	4,13	4,53	3,82
0,06	3,52	3,97	4,18	4,21	4,03	4,22	4,28	4,81	4,15
0,07	3,35	3,54	3,75	3,71	3,90	3,97	4,14	4,31	3,83
0,08	3,21	3,55	3,60	3,72	3,72	3,91	3,92	4,17	3,72
0,09	3,31	3,48	3,51	3,54	3,70	3,85	4,02	4,20	3,70
0,10	3,31	3,71	3,85	3,83	3,80	4,08	4,24	4,24	3,88
0,11	3,14	3,51	3,68	3,55	3,63	3,76	3,92	4,20	3,67
0,12	3,19	3,39	3,64	3,61	3,70	3,81	3,98	4,37	3,71
0,13	3,19	3,57	3,77	3,77	3,69	3,93	4,00	4,27	3,77
0,14	3,33	3,75	3,88	3,84	3,72	3,89	3,91	4,33	3,83
0,15	3,20	3,39	3,45	3,67	3,53	3,72	3,86	4,24	3,63
0,16	3,25	3,36	3,41	3,43	3,45	3,78	3,93	4,15	3,60
0,17	3,06	3,23	3,36	3,47	3,55	3,78	3,94	4,03	3,55
0,18	3,30	3,59	3,95	3,83	3,81	3,92	4,31	4,38	3,89
0,19	3,07	3,17	3,26	3,41	3,49	3,76	3,98	3,98	3,51
0,20	3,16	3,38	3,48	3,52	3,50	3,70	3,89	4,10	3,59

em função da profundidade z nas colunas dos solos LVa (B e E), LVE (C e F) e LRd (A e C), para os diversos tempos, medidos em dias, de drenagem da água. Observa-se nestas figuras que o solo LVE apresenta o maior decréscimo de umidade na maioria das profundidades.

A título de exemplo, é mostrado nas figuras 4.9 a 4.14 o decréscimo da umidade em função do tempo de redistribuição da água, para as profundidades de 0,10 e 0,20 m, que são duas profundidades representativas, não próximas à superfície, onde ocorrem problemas de interface.

Com os dados experimentais de umidade θ medidos nas colunas de solo, estimou-se a umidade de saturação θ_s para cada profundidade de interesse em cada coluna de solo (0,01 a 0,20 m em passos de 0,01 m), uma vez que o arranjo experimental não permitiu sua medida por atenuação da radiação gama, no final do processo de infiltração. A umidade θ_s foi estimada através da regressão linear dos dados de θ obtidos durante a redistribuição versus $\ln t$, para um tempo curto, aqui considerado 60 s ($\sim 0,0007$ dia, praticamente zero, uma vez que $\ln 0 = -\infty$). Com o objetivo de padronizar as tabelas dos dados experimentais de umidade (tabelas 4.11 a 4.25) e facilitar os cálculos da condutividade hidráulica, construíram-se tabelas de umidade θ , em função da profundidade na coluna de solo, para tempos de redistribuição definidos no intervalo de 0 (zero) a 15 dias. As tabelas 4.32 a 4.37, mostram a título de exemplo, respectivamente, para os solos LVa (colunas B e E), LVE (colunas C e F) e LRd (colunas A e C), as umidades calculadas nas profundidades de 0,01 a 0,20 m de acordo com os tempos de redistribuição indicados na primeira coluna das tabelas. A primeira linha, referente ao tempo zero (0,0007 dia), é o valor assumido para a umidade de saturação θ_s calculado para cada profundidade, conforme já comentado. Os demais valores de umidade θ também foram obtidos através da regressão linear θ versus $\ln t$, utilizada

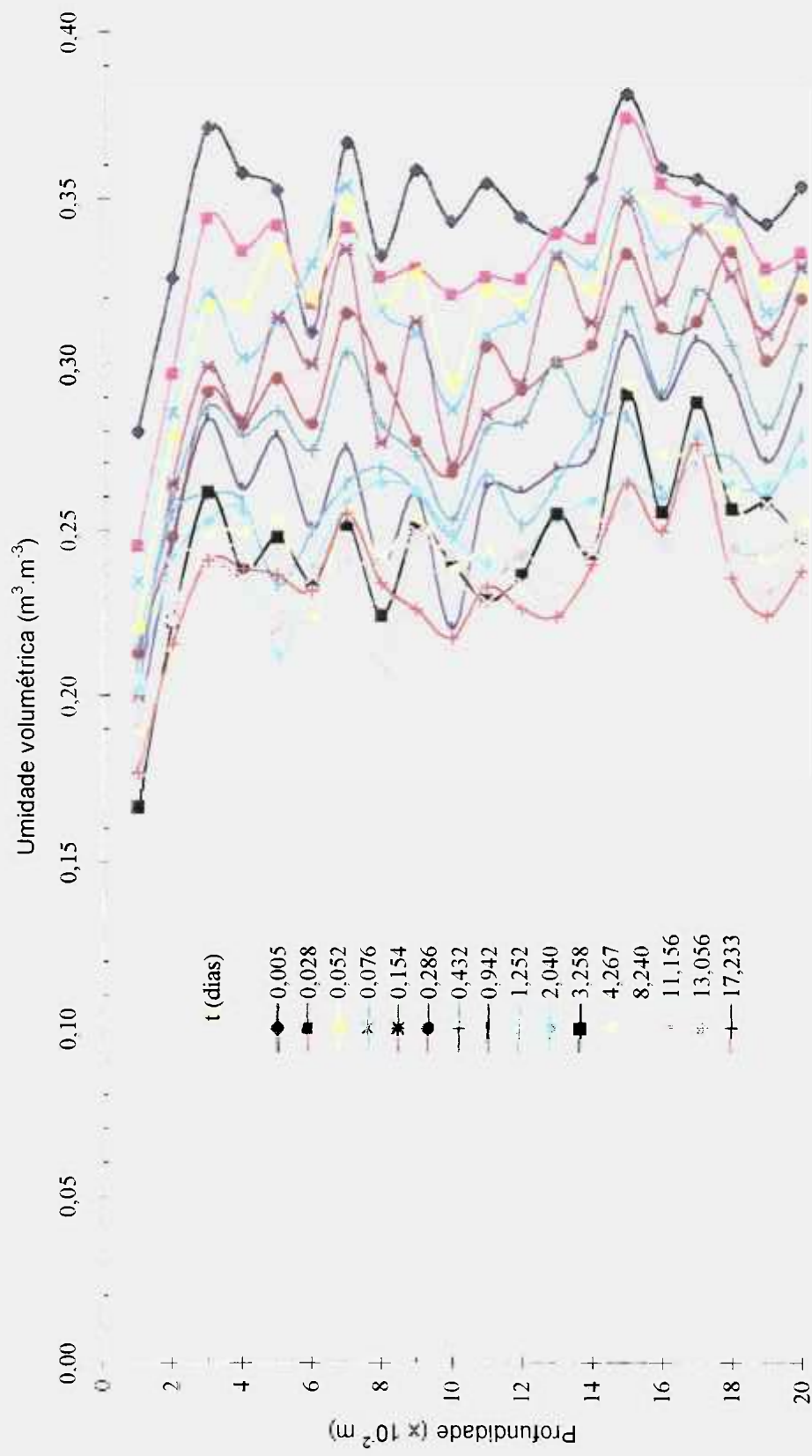


Figura 4.3: Umidade volumétrica medida por atenuação gama versus profundidade na coluna B do solo LVa.

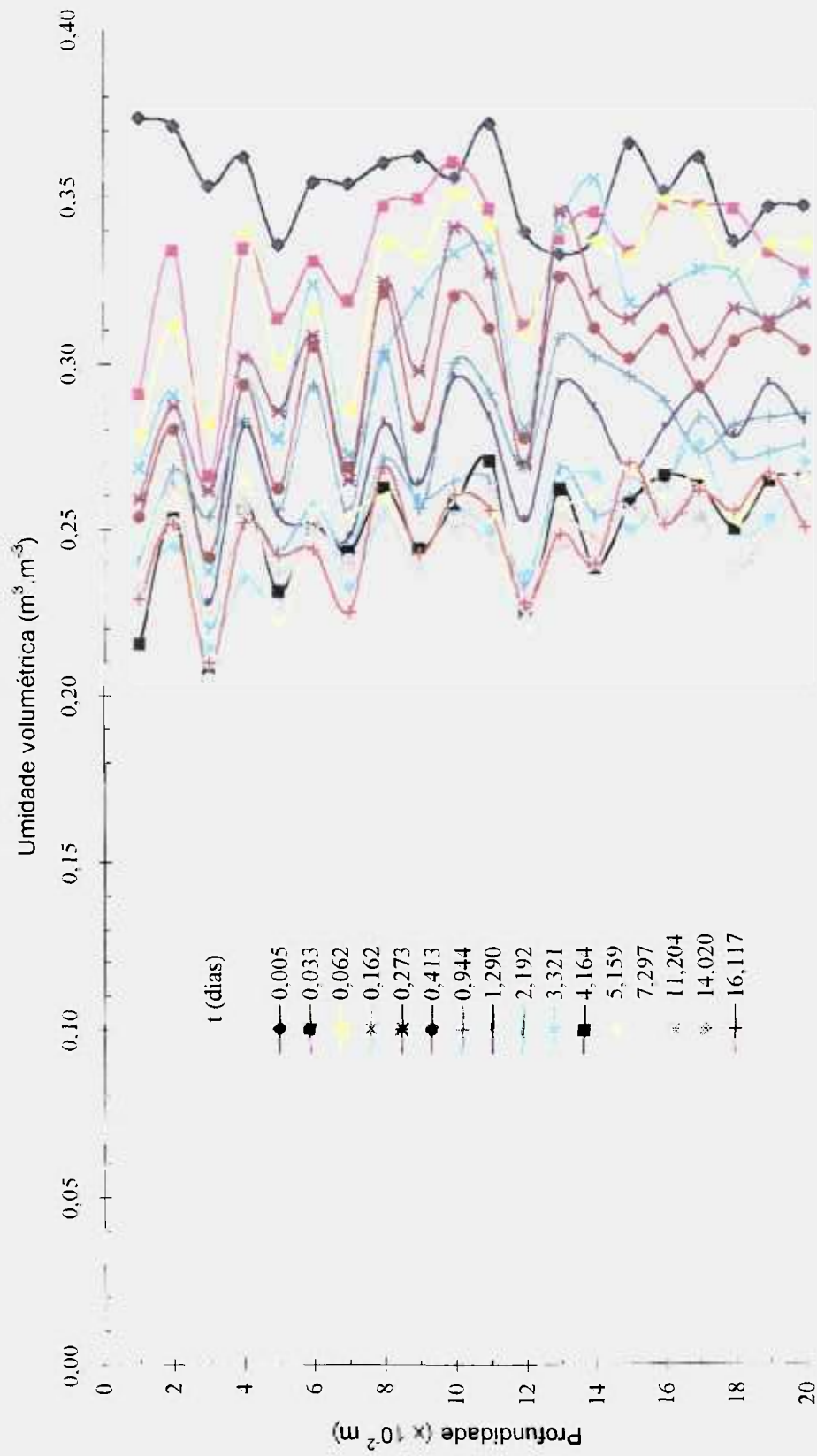


Figura 4.4: Umidade volumétrica medida por atenuação gama versus profundidade na coluna E do solo L Va.

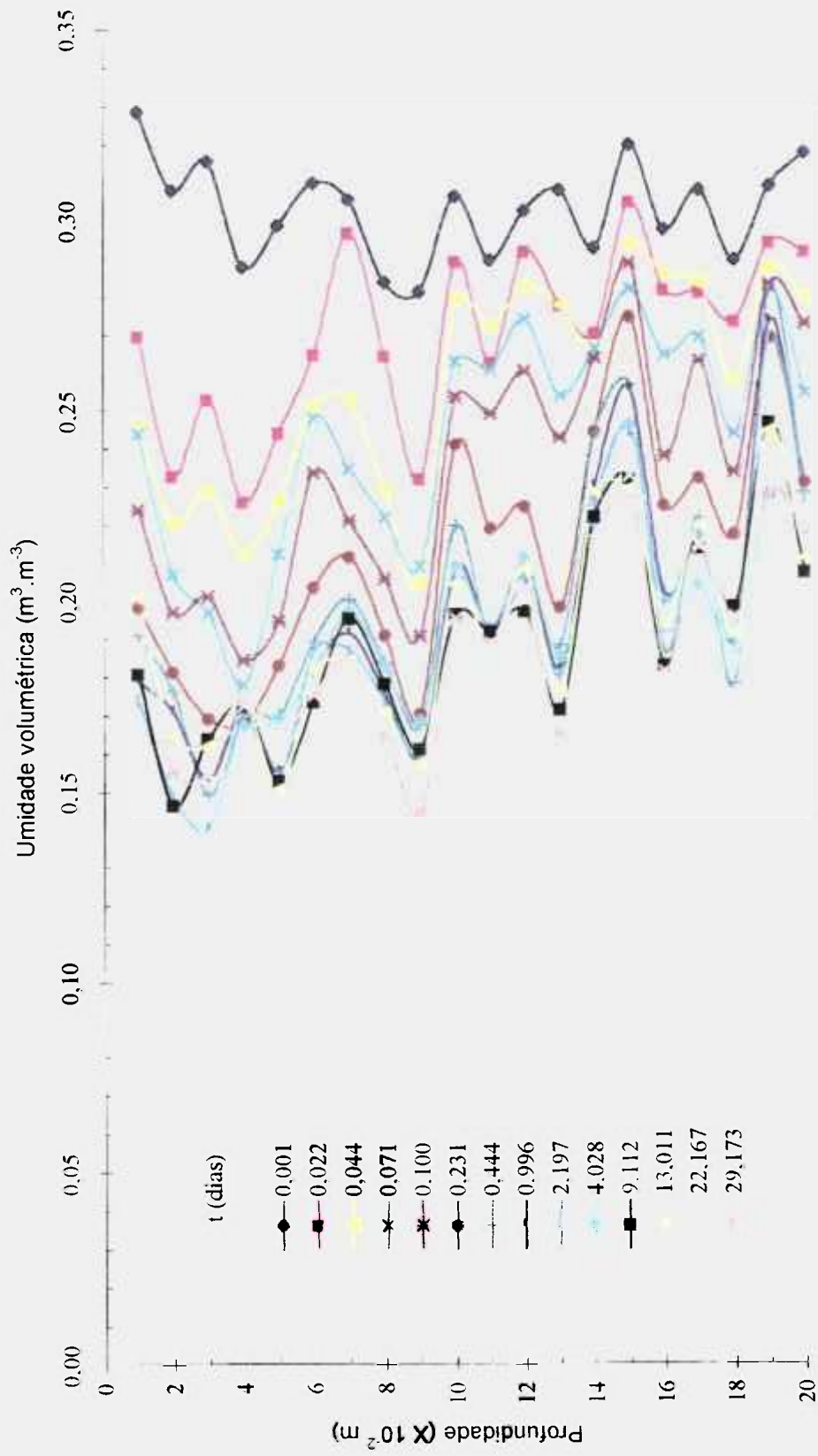


Figura 4.5: Umidade volumétrica medida por atenuação gama versus profundidade na coluna C do solo LVE.

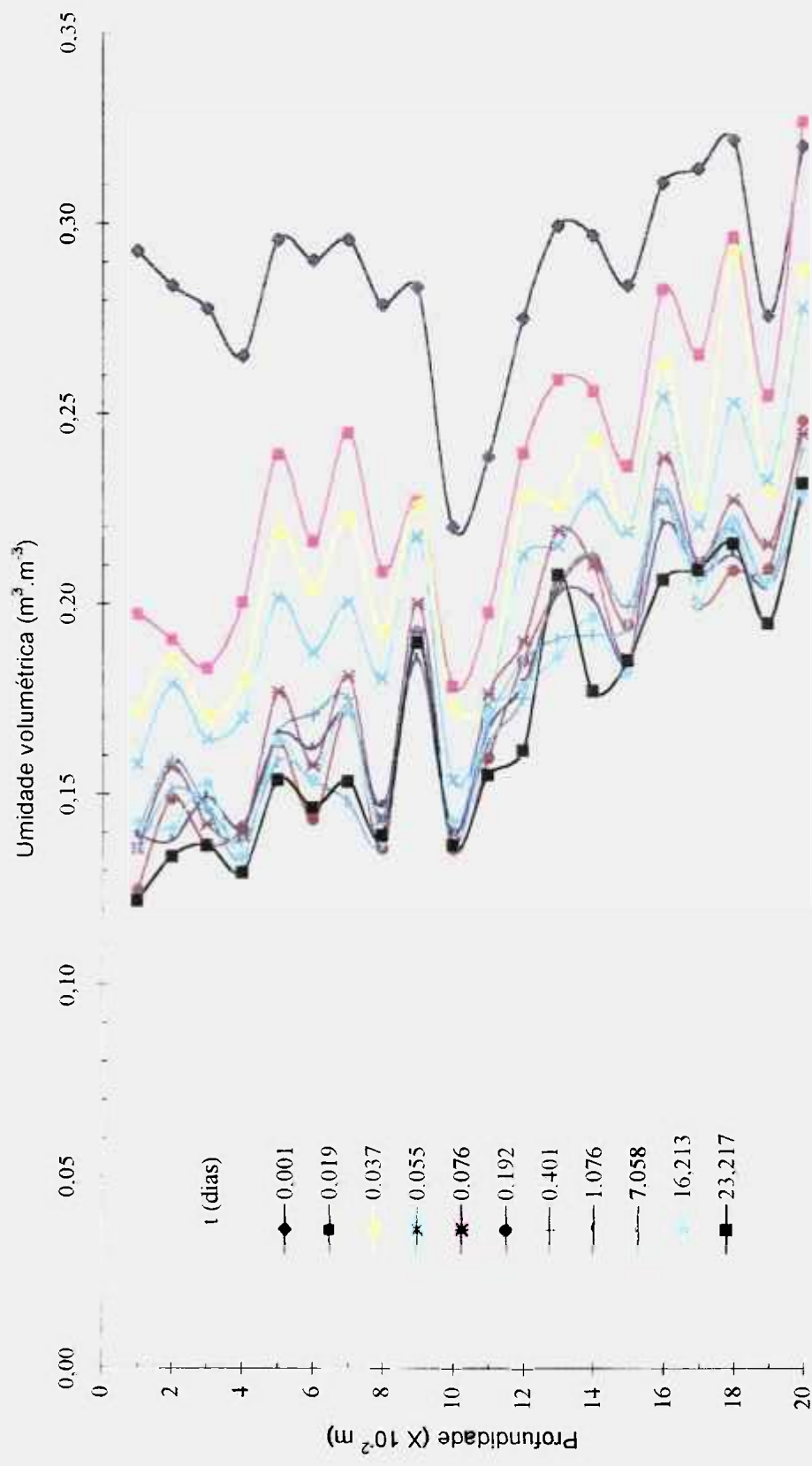


Figura 4.6: Umidade volumétrica medida por atenuação gama versus profundidade na coluna F do solo LVE.

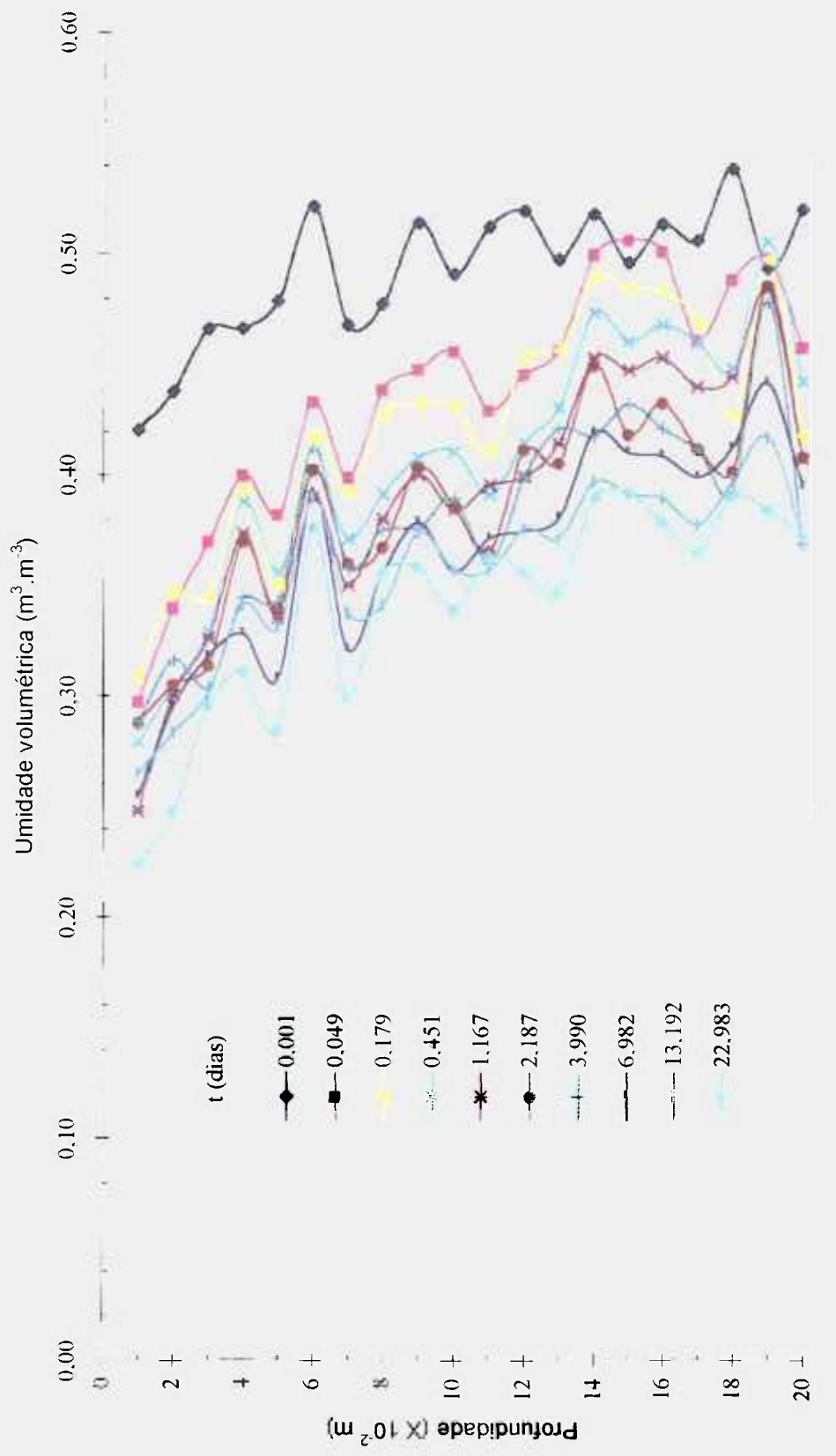


Figura 4 7: Umidade volumétrica medida por atenuação gama versus profundidade na coluna A do solo LRd.

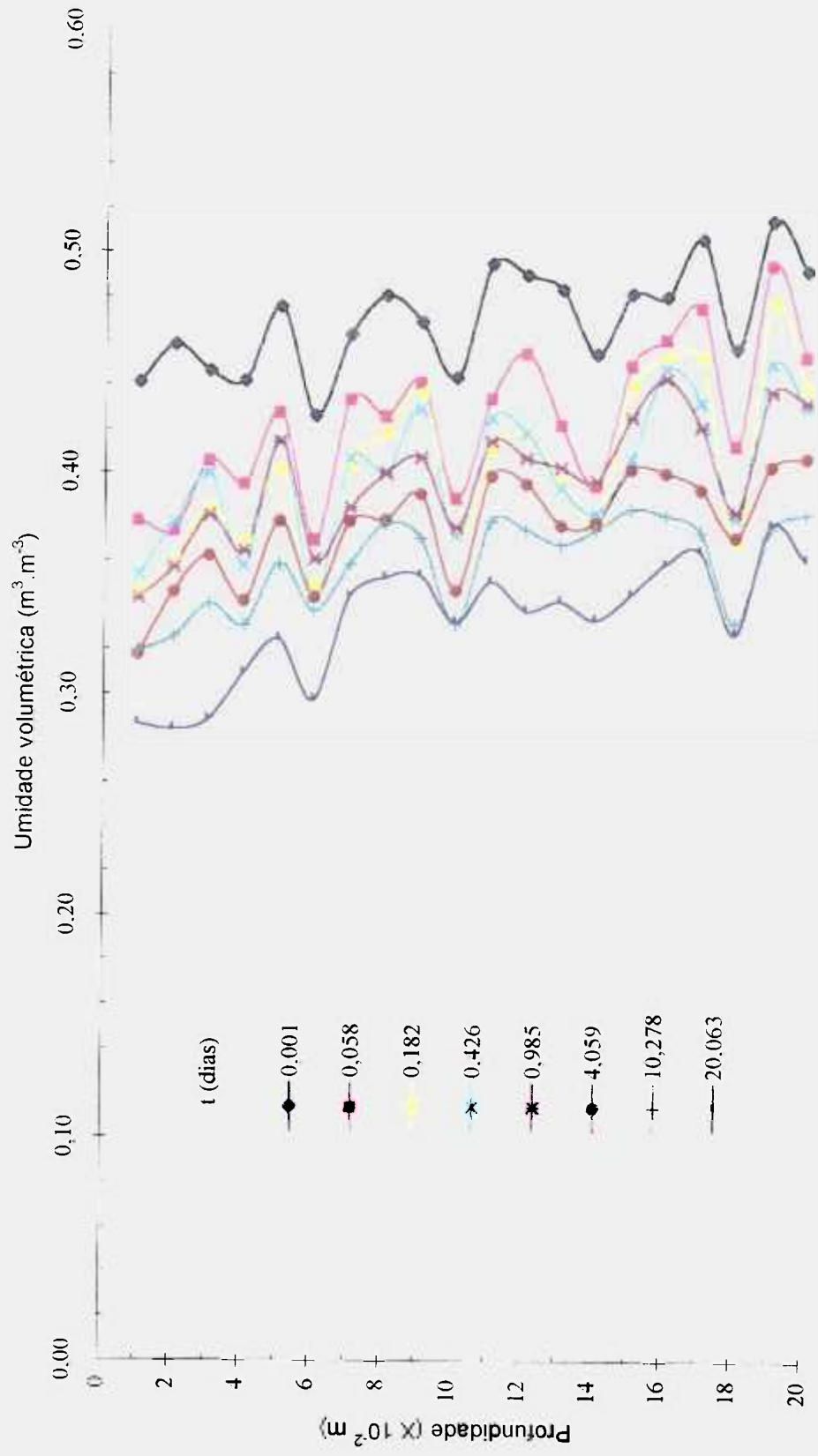


Figura 4.8: Umidade volumétrica medida por atenuação gama versus profundidade na coluna C do solo LRD.

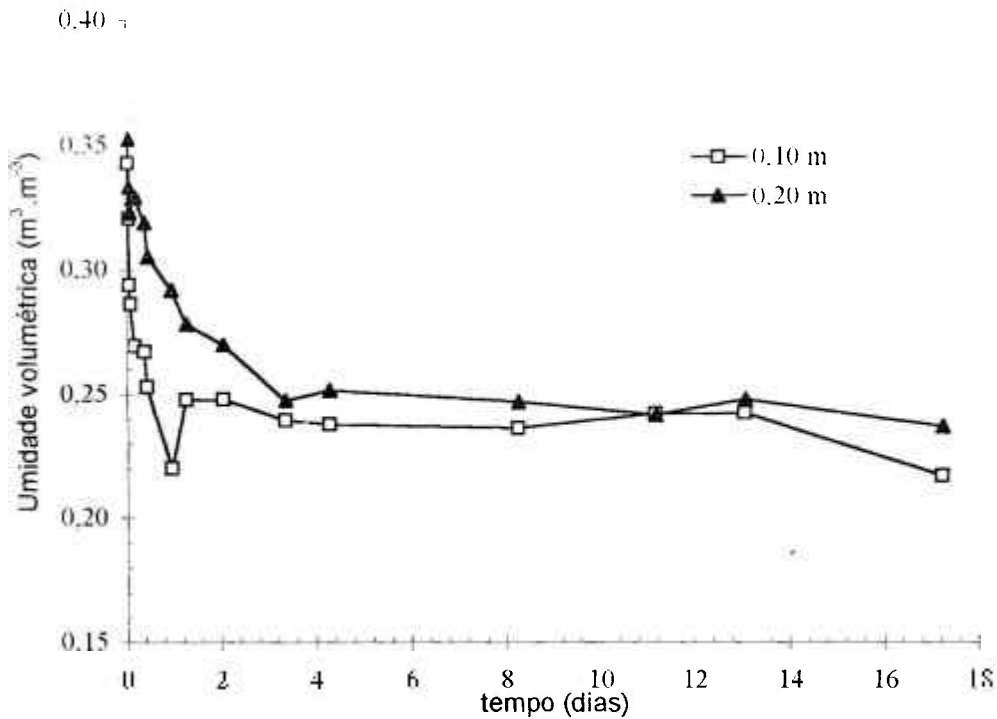


Figura 4.9: Umidade volumétrica em função do tempo de redistribuição para duas profundidades na coluna B do solo LVA.

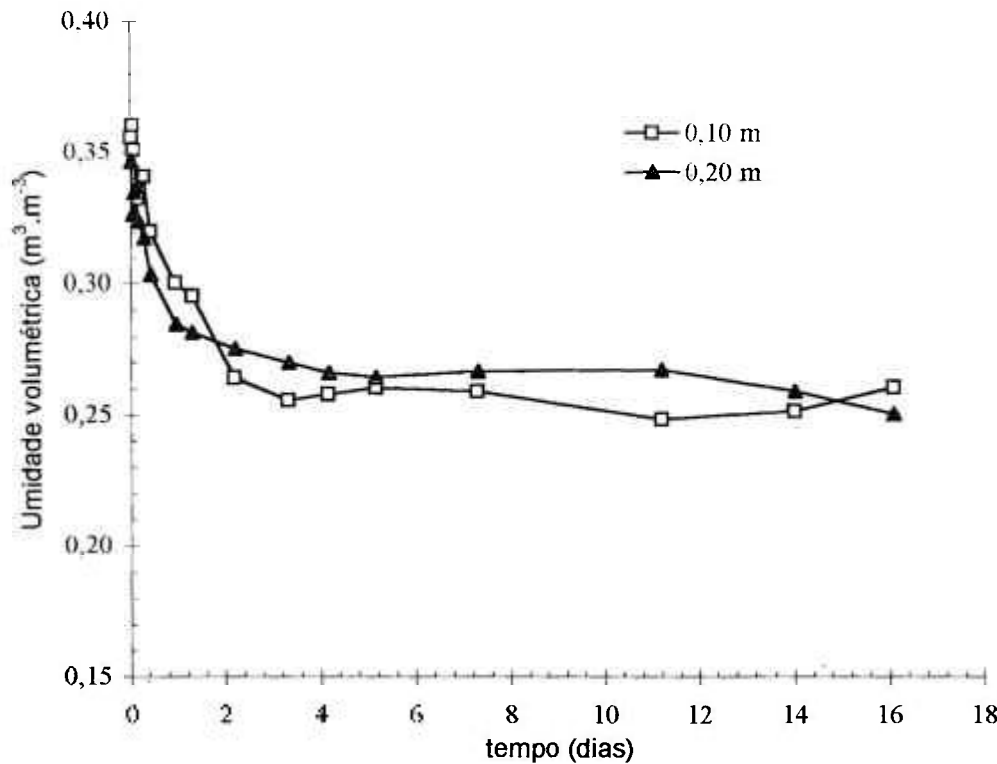


Figura 4.10: Umidade volumétrica em função do tempo de redistribuição para duas profundidades na coluna E do solo LVA.

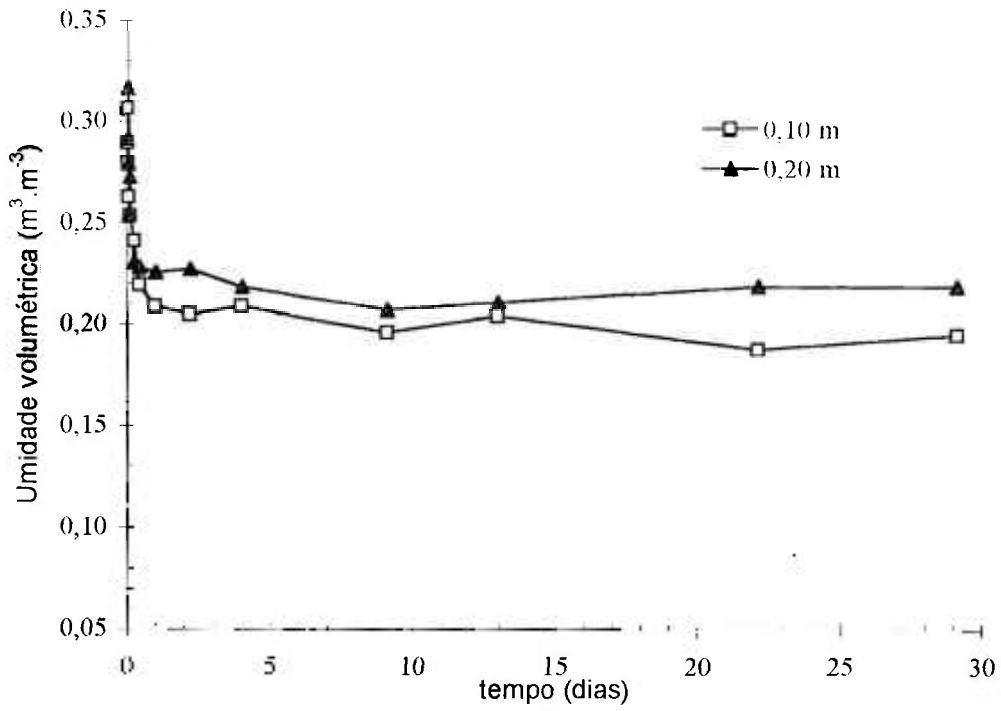


Figura 4.11: Umidade volumétrica em função do tempo de redistribuição para duas profundidades na coluna C do solo LVE.

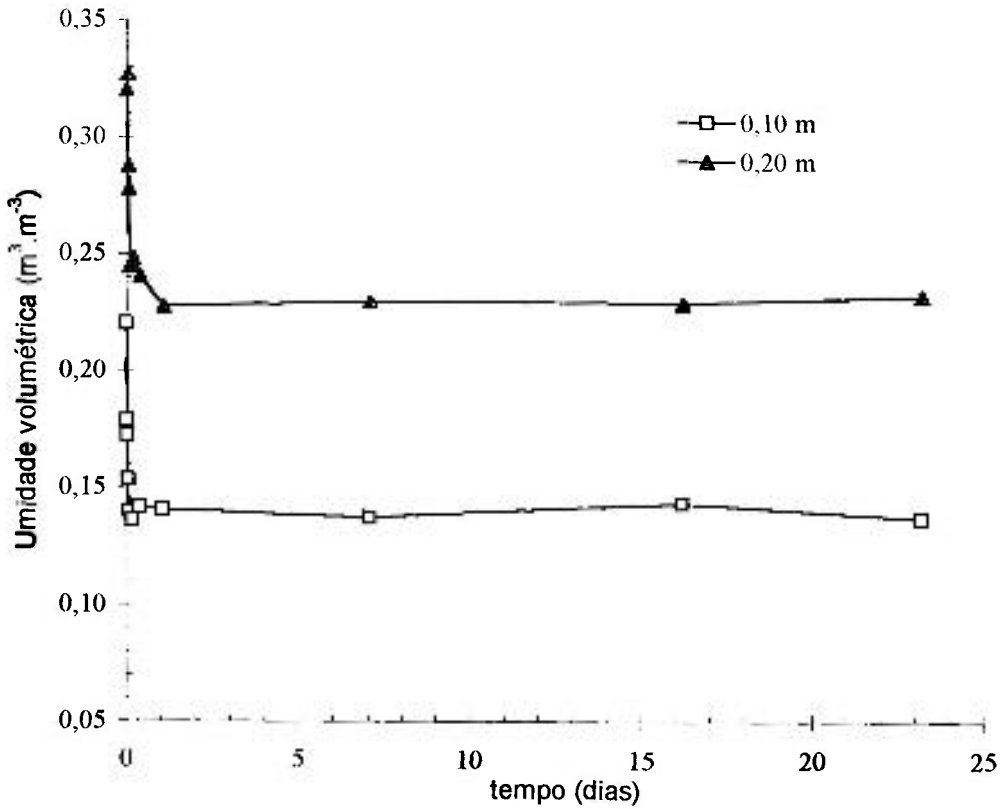


Figura 4.12: Umidade volumétrica em função do tempo de redistribuição para duas profundidades na coluna F do solo LVE.

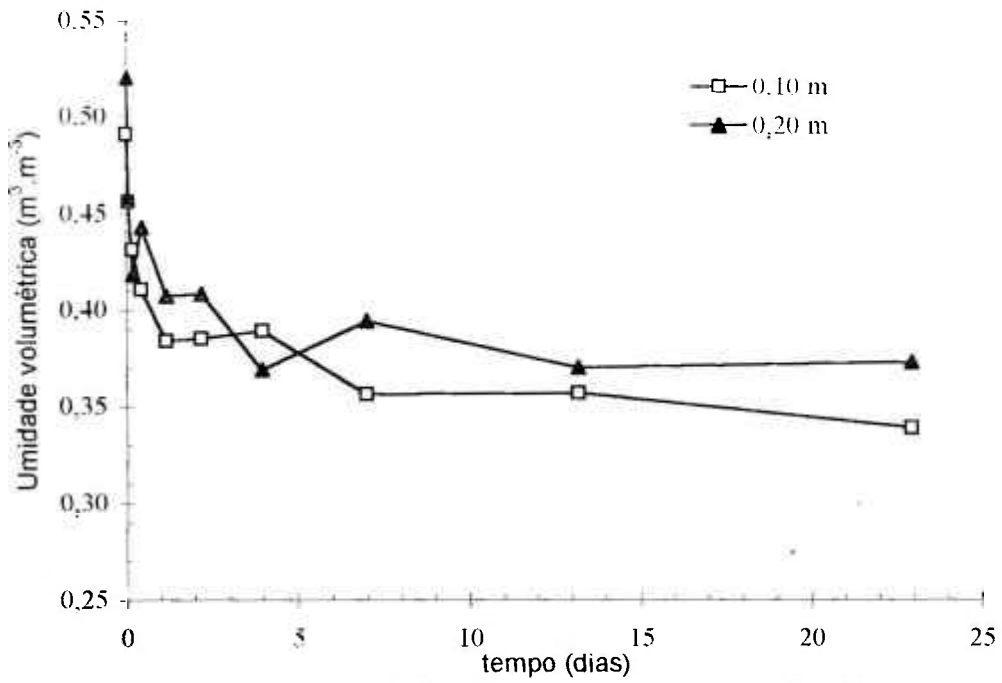


Figura 4.13: Umidade volumétrica em função do tempo de redistribuição para duas profundidades na coluna A do solo LRd.

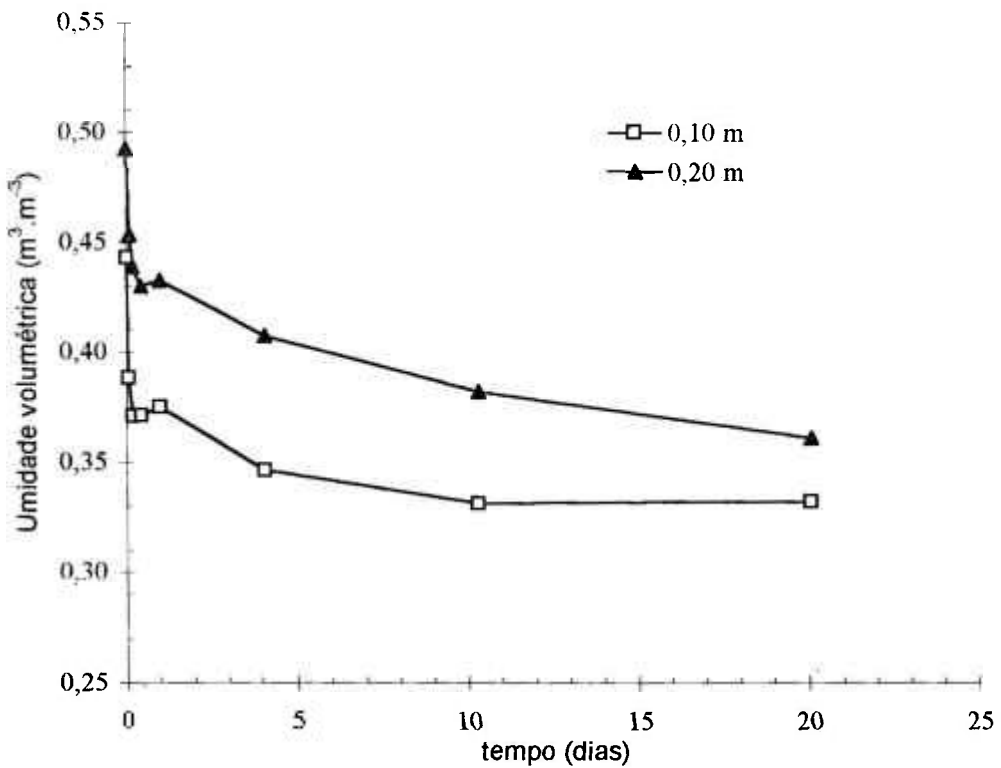


Figura 4.14: Umidade volumétrica em função do tempo de redistribuição para duas profundidades na coluna C do solo LRd.

Tabela 4.33 - Umidade volumétrica calculada pela regressão linear θ versus $\ln t$, para a coluna E do solo LVa, com os tempos de redistribuição previamente definidos.

t (dias)	Umidade volumétrica ($m^3 \cdot m^{-3}$) - coluna E - solo LVa																			
	profundidade (m)																			
	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20
0	0,3561	0,3796	0,3478	0,3915	0,3641	0,3935	0,3628	0,4037	0,4147	0,4256	0,4223	0,3794	0,4147	0,4222	0,3687	0,4155	0,4055	0,4107	0,3986	0,3954
0,05	0,2962	0,3194	0,2839	0,3275	0,3022	0,3278	0,3034	0,3386	0,3330	0,3508	0,3467	0,3087	0,3433	0,3435	0,3350	0,3425	0,3406	0,3368	0,3343	0,3343
0,1	0,2853	0,3097	0,2735	0,3171	0,2922	0,3171	0,2938	0,3278	0,3197	0,3390	0,3346	0,2972	0,3317	0,3306	0,3246	0,3307	0,3289	0,3237	0,3232	0,3245
0,2	0,2754	0,2999	0,2632	0,3068	0,2822	0,3064	0,2842	0,3189	0,3065	0,3253	0,3222	0,2855	0,3201	0,3178	0,3143	0,3189	0,3187	0,3117	0,3134	0,3144
0,3	0,2697	0,2942	0,2577	0,3007	0,2753	0,3002	0,2785	0,3136	0,2987	0,3175	0,3151	0,2790	0,3133	0,3101	0,3083	0,3119	0,3112	0,3047	0,3073	0,3088
0,4	0,2656	0,2902	0,2536	0,2964	0,2721	0,2958	0,2746	0,3081	0,2932	0,3125	0,3100	0,2743	0,3085	0,3047	0,3040	0,3070	0,3078	0,2997	0,3030	0,3045
0,5	0,2624	0,2870	0,2495	0,2931	0,2690	0,2923	0,2715	0,3026	0,2888	0,3064	0,3050	0,2705	0,3048	0,3005	0,3006	0,3032	0,3040	0,2958	0,2993	0,3013
0,7	0,2576	0,2823	0,2445	0,2880	0,2641	0,2872	0,2665	0,2973	0,2825	0,3022	0,3001	0,2650	0,2992	0,2943	0,2958	0,2975	0,2988	0,2899	0,2945	0,2955
0,9	0,2540	0,2786	0,2407	0,2843	0,2604	0,2833	0,2633	0,2933	0,2777	0,2976	0,2956	0,2605	0,2950	0,2903	0,2919	0,2932	0,2946	0,2856	0,2909	0,2929
1	0,2525	0,2773	0,2391	0,2827	0,2589	0,2817	0,2616	0,2917	0,2757	0,2956	0,2936	0,2591	0,2932	0,2876	0,2903	0,2914	0,2929	0,2837	0,2892	0,2914
2	0,2426	0,2675	0,2288	0,2723	0,2489	0,2710	0,2522	0,2826	0,2664	0,2859	0,2815	0,2477	0,2817	0,2747	0,2800	0,2798	0,2817	0,2717	0,2784	0,2815
3	0,2368	0,2618	0,2227	0,2663	0,2430	0,2648	0,2466	0,2745	0,2547	0,2754	0,2744	0,2410	0,2740	0,2677	0,2740	0,2776	0,2752	0,2647	0,2727	0,2757
4	0,2327	0,2578	0,2184	0,2620	0,2388	0,2604	0,2426	0,2700	0,2492	0,2701	0,2693	0,2352	0,2701	0,2618	0,2697	0,2677	0,2703	0,2597	0,2683	0,2710
5	0,2296	0,2547	0,2157	0,2595	0,2356	0,2589	0,2386	0,2665	0,2446	0,2650	0,2653	0,2325	0,2684	0,2578	0,2683	0,2659	0,2670	0,2568	0,2653	0,2684
6	0,2270	0,2521	0,2123	0,2569	0,2330	0,2541	0,2370	0,2656	0,2414	0,2626	0,2621	0,2285	0,2653	0,2542	0,2636	0,2608	0,2641	0,2528	0,2622	0,2659
7	0,2248	0,2499	0,2100	0,2533	0,2306	0,2517	0,2348	0,2622	0,2385	0,2598	0,2594	0,2270	0,2607	0,2473	0,2613	0,2582	0,2616	0,2499	0,2586	0,2636
8	0,2229	0,2480	0,2080	0,2516	0,2285	0,2497	0,2330	0,2591	0,2359	0,2573	0,2570	0,2248	0,2585	0,2469	0,2583	0,2559	0,2585	0,2478	0,2578	0,2617
9	0,2212	0,2464	0,2063	0,2499	0,2271	0,2479	0,2313	0,2573	0,2337	0,2552	0,2545	0,2228	0,2565	0,2467	0,2578	0,2559	0,2578	0,2458	0,2557	0,2600
10	0,2197	0,2448	0,2047	0,2483	0,2256	0,2463	0,2289	0,2556	0,2317	0,2532	0,2531	0,2211	0,2548	0,2447	0,2580	0,2521	0,2559	0,2437	0,2541	0,2585
12	0,2171	0,2423	0,2020	0,2455	0,2230	0,2435	0,2273	0,2528	0,2292	0,2499	0,2496	0,2181	0,2517	0,2413	0,2603	0,2480	0,2530	0,2406	0,2515	0,2559
15	0,2139	0,2392	0,1987	0,2422	0,2197	0,2400	0,2242	0,2493	0,2239	0,2457	0,2459	0,2144	0,2480	0,2371	0,2500	0,2452	0,2494	0,2367	0,2485	0,2527

Tabela 4.34 - Umidade volumétrica calculada pela regressão linear θ versus Int, para a coluna C do solo LVE, com os tempos de redistribuição previamente definidos.

Umidade volumétrica (m ³ .m ⁻³) - coluna C - solo LVE																				
t (dias)	profundidade (m)																			
	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20
0	0,3067	0,2850	0,2884	0,2487	0,2832	0,3104	0,3108	0,2863	0,2694	0,3302	0,3111	0,3266	0,3346	0,3086	0,3436	0,3299	0,3211	0,3013	0,3291	0,3268
0,05	0,2475	0,2220	0,2237	0,2706	0,2240	0,2467	0,2527	0,2323	0,2105	0,2700	0,2744	0,2486	0,2300	0,2070	0,2636	0,2713	0,2493	0,2314	0,2736	
0,1	0,2379	0,2129	0,2133	0,2344	0,2144	0,2387	0,2432	0,2235	0,2009	0,2603	0,2432	0,2003	0,2467	0,2013	0,2663	0,2528	0,2632	0,2408	0,2653	0,2673
0,2	0,2283	0,2029	0,2028	0,1982	0,2048	0,2287	0,2339	0,2147	0,1982	0,2006	0,2090	0,2310	0,2345	0,2047	0,2263	0,2427	0,2324	0,2751	0,2590	
0,3	0,2227	0,1970	0,1937	0,1949	0,1992	0,2219	0,2263	0,2066	0,1931	0,1949	0,2003	0,2409	0,2273	0,1908	0,2195	0,2304	0,2274	0,2755	0,2611	
0,4	0,2187	0,1928	0,1823	0,1921	0,1952	0,2187	0,2244	0,203	0,1894	0,1943	0,2008	0,2416	0,2222	0,1901	0,2103	0,2470	0,2236	0,2750	0,2607	
0,5	0,2156	0,1895	0,1889	0,1921	0,1921	0,2154	0,2213	0,2032	0,1898	0,2378	0,2236	0,2385	0,2183	0,1950	0,2137	0,2444	0,2212	0,2710	0,2490	
0,7	0,2110	0,1847	0,1839	0,1871	0,1874	0,2103	0,2162	0,1989	0,1824	0,2323	0,2184	0,2343	0,2123	0,1925	0,2338	0,2405	0,2171	0,2681	0,2410	
0,9	0,2075	0,1810	0,1807	0,1848	0,1840	0,2070	0,2133	0,1957	0,1790	0,2264	0,2181	0,2310	0,2075	0,1904	0,2185	0,2375	0,2147	0,2659	0,2410	
1	0,2060	0,1766	0,1785	0,1839	0,1835	0,2067	0,2118	0,1944	0,1775	0,2279	0,2147	0,2263	0,2060	0,1964	0,2177	0,2364	0,2128	0,2649	0,2367	
2	0,1964	0,1666	0,1680	0,1777	0,1728	0,1964	0,2026	0,1853	0,1692	0,2181	0,2036	0,2203	0,1938	0,1838	0,2064	0,2253	0,2043	0,2568	0,2314	
3	0,1908	0,1635	0,1619	0,1747	0,1673	0,1893	0,1970	0,1805	0,1647	0,2124	0,2001	0,2143	0,1893	0,1869	0,2101	0,2235	0,1964	0,2552	0,2256	
4	0,1868	0,1594	0,1575	0,1715	0,1603	0,1834	0,1900	0,1736	0,1605	0,2094	0,1923	0,2111	0,1815	0,1802	0,1936	0,2072	0,1869	0,2527	0,2231	
5	0,1838	0,1562	0,1541	0,1665	0,1602	0,1822	0,1900	0,1741	0,1577	0,2032	0,1933	0,2081	0,1778	0,2241	0,1922	0,2148	0,1902	0,2507	0,2205	
6	0,1812	0,1535	0,1514	0,1679	0,1577	0,1796	0,1875	0,1718	0,1554	0,2027	0,1909	0,2057	0,1743	0,2223	0,1893	0,2155	0,1910	0,2491	0,2183	
7	0,1791	0,1513	0,1491	0,1665	0,1555	0,1774	0,1854	0,1698	0,1534	0,2005	0,1889	0,2036	0,1716	0,2209	0,1870	0,2137	0,1891	0,2478	0,2164	
8	0,1773	0,1484	0,1470	0,1654	0,1537	0,1754	0,1835	0,1681	0,1518	0,1936	0,1871	0,2018	0,1693	0,2196	0,1840	0,2127	0,1875	0,2450	0,2148	
9	0,1756	0,1477	0,1452	0,1643	0,1521	0,1737	0,1820	0,1666	0,1503	0,1970	0,1865	0,2003	0,1672	0,2185	0,1831	0,2103	0,1890	0,2435	0,2134	
10	0,1742	0,1461	0,1437	0,1634	0,1506	0,1722	0,1806	0,1653	0,1489	0,1955	0,1841	0,1989	0,1653	0,2175	0,2332	0,1814	0,2096	0,2446	0,2122	
12	0,1716	0,1435	0,1409	0,1617	0,1481	0,1696	0,1781	0,163	0,1467	0,1929	0,1817	0,1964	0,1621	0,2157	0,2311	0,1786	0,2074	0,2430	0,2100	
15	0,1686	0,1403	0,1375	0,1597	0,1450	0,1664	0,1751	0,1602	0,1438	0,1898	0,1788	0,1935	0,1581	0,2136	0,2285	0,1751	0,2048	0,2410	0,2073	

Tabela 4.35 - Umidade volumétrica calculada pela regressão linear θ versus $\ln t$, para a coluna F do solo LVE, com os tempos de redistribuição previamente definidos.

Umidade volumétrica (m³.m⁻³) - coluna F - solo LVE																				
t (dias)	profundidade (m)																			
	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20
0	0,2344	0,2407	0,2217	0,2313	0,2705	0,2532	0,2765	0,2438	0,2591	0,1974	0,2126	0,2667	0,2788	0,2909	0,2620	0,3043	0,2801	0,3162	0,2719	0,3346
0,05	0,1818	0,1909	0,1815	0,1824	0,2155	0,2029	0,2198	0,1915	0,2246	0,1680	0,1883	0,2219	0,2386	0,2433	0,2252	0,2640	0,2428	0,2680	0,2371	0,2847
0,1	0,1733	0,1829	0,1750	0,1745	0,2066	0,1948	0,2106	0,1830	0,2190	0,1633	0,1843	0,2147	0,2320	0,2355	0,2192	0,2575	0,2367	0,2602	0,2315	0,2766
0,2	0,1648	0,1748	0,1685	0,1665	0,1977	0,1866	0,2014	0,1745	0,2134	0,1585	0,1804	0,2074	0,2255	0,2278	0,2133	0,2510	0,2306	0,2524	0,2259	0,2685
0,3	0,1598	0,1701	0,1647	0,1619	0,1925	0,1818	0,1960	0,1695	0,2101	0,1557	0,1781	0,2032	0,2217	0,2233	0,2098	0,2471	0,2271	0,2478	0,2226	0,2638
0,4	0,1563	0,1667	0,1620	0,1596	0,1908	0,1795	0,1922	0,1630	0,2078	0,1538	0,1784	0,2002	0,2180	0,2201	0,2073	0,2444	0,2246	0,2445	0,2202	0,2601
0,5	0,1536	0,1641	0,1589	0,1561	0,1859	0,1758	0,1893	0,1633	0,2080	0,1522	0,1752	0,1978	0,2166	0,2178	0,2054	0,2423	0,2228	0,2421	0,2184	0,2578
0,7	0,1494	0,1602	0,1567	0,1522	0,1818	0,1719	0,1848	0,1592	0,2033	0,1489	0,1732	0,1943	0,2138	0,2158	0,2025	0,2392	0,2197	0,2383	0,2157	0,2539
0,9	0,1464	0,1573	0,1544	0,1498	0,1783	0,1689	0,1815	0,1551	0,2012	0,1462	0,1718	0,1917	0,2114	0,2111	0,2003	0,2368	0,2175	0,2354	0,2138	0,2510
1	0,1451	0,1561	0,1534	0,1481	0,1770	0,1677	0,1801	0,1548	0,2004	0,1445	0,1712	0,1906	0,2104	0,2098	0,1994	0,2358	0,2165	0,2342	0,2126	0,2493
2	0,1365	0,1480	0,1409	0,1402	0,1681	0,1585	0,1709	0,1483	0,1948	0,1427	0,1679	0,1883	0,2080	0,2022	0,1935	0,2289	0,2105	0,2284	0,2071	0,2417
3	0,1316	0,1433	0,1431	0,1368	0,1628	0,1547	0,1665	0,1414	0,1915	0,1389	0,1650	0,1791	0,2001	0,1977	0,1900	0,2254	0,2070	0,2218	0,2039	0,2389
4	0,1280	0,1399	0,1404	0,1323	0,1581	0,1514	0,1617	0,1378	0,1892	0,1379	0,1633	0,1761	0,1974	0,1945	0,1875	0,2227	0,2044	0,2188	0,2015	0,2338
5	0,1253	0,1374	0,1389	0,1287	0,1563	0,1487	0,1587	0,1351	0,1874	0,1361	0,1620	0,1737	0,1963	0,1920	0,1856	0,2208	0,2025	0,2161	0,1997	0,2310
6	0,1231	0,1352	0,1365	0,1277	0,1539	0,1468	0,1563	0,1329	0,1859	0,1351	0,1610	0,1718	0,1938	0,1900	0,1840	0,2189	0,2006	0,2140	0,1952	0,2282
7	0,1212	0,1334	0,1351	0,1259	0,1519	0,1448	0,1543	0,1310	0,1847	0,1341	0,1601	0,1702	0,1921	0,1882	0,1827	0,2175	0,1996	0,2123	0,1970	0,2270
8	0,1195	0,1319	0,1338	0,1244	0,1502	0,1432	0,1525	0,1294	0,1836	0,1332	0,1594	0,1688	0,1909	0,1868	0,1815	0,2162	0,1984	0,2102	0,1958	0,2155
9	0,1181	0,1305	0,1327	0,1230	0,1487	0,1418	0,1509	0,1279	0,1826	0,1324	0,1587	0,1676	0,1898	0,1854	0,1805	0,2151	0,1974	0,2095	0,1949	0,2241
10	0,1168	0,1293	0,1317	0,1218	0,1474	0,1405	0,1496	0,1266	0,1818	0,1316	0,1581	0,1665	0,1888	0,1843	0,1786	0,2141	0,1964	0,2083	0,1941	0,2229
12	0,1145	0,1272	0,1300	0,1197	0,1450	0,1384	0,1471	0,1244	0,1809	0,1304	0,1571	0,1656	0,1870	0,1822	0,1761	0,2124	0,1948	0,2062	0,1926	0,2208
15	0,1118	0,1246	0,1279	0,1172	0,1421	0,1358	0,1442	0,1217	0,1785	0,1288	0,1558	0,1622	0,1849	0,1798	0,1761	0,2103	0,1929	0,2037	0,1908	0,2182

Tabela 4.36 - Umidade volumétrica calculada pela regressão linear θ versus $\ln t$, para a coluna A do solo LRd, com os tempos de redistribuição previamente definidos.

t (dias)	Umidade volumétrica ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$) - coluna A - solo LRd																		
	profundidade (m)																		
0	0,4048	0,4388	0,4511	0,4575	0,4613	0,5137	0,4918	0,5118	0,5375	0,5359	0,5238	0,5501	0,5477	0,5809	0,5580	0,5843	0,5628	0,5894	0,5589
0,05	0,3340	0,3652	0,3688	0,4184	0,4037	0,4544	0,4171	0,4405	0,4520	0,4584	0,4485	0,4706	0,4718	0,5048	0,4846	0,5030	0,4854	0,4806	0,5009
0,1	0,3226	0,3544	0,3748	0,4072	0,3912	0,4446	0,4050	0,4289	0,4487	0,4433	0,4362	0,4580	0,4585	0,4824	0,4830	0,4868	0,4729	0,4775	0,5005
0,2	0,3111	0,3427	0,3627	0,3900	0,3786	0,4351	0,3929	0,4174	0,4375	0,4303	0,4240	0,4451	0,4472	0,4801	0,4715	0,4765	0,4604	0,4650	0,4913
0,3	0,3044	0,3358	0,3557	0,3895	0,3712	0,4295	0,3858	0,4106	0,4300	0,4226	0,4169	0,4376	0,4400	0,4729	0,4647	0,4689	0,4530	0,4575	0,4855
0,4	0,2996	0,3309	0,3507	0,3848	0,3680	0,4255	0,3808	0,4058	0,4252	0,4172	0,4118	0,4323	0,4348	0,4678	0,4590	0,4634	0,4478	0,4522	0,4821
0,5	0,2960	0,3271	0,3468	0,3812	0,3620	0,4224	0,3759	0,4021	0,4213	0,4130	0,4078	0,4281	0,4309	0,4638	0,4552	0,4592	0,4439	0,4481	0,4791
0,7	0,2904	0,3214	0,3410	0,3758	0,3559	0,4178	0,3710	0,3965	0,4153	0,4067	0,4020	0,4219	0,4230	0,4578	0,4506	0,4528	0,4377	0,4419	0,4743
0,9	0,2862	0,3172	0,3366	0,3717	0,3513	0,4143	0,3676	0,3923	0,4109	0,4020	0,3976	0,4172	0,4206	0,4534	0,4464	0,4480	0,4331	0,4373	0,4712
1	0,2845	0,3154	0,3348	0,3700	0,3494	0,4128	0,3658	0,3906	0,4090	0,4000	0,3957	0,4153	0,4186	0,4515	0,4446	0,4460	0,4312	0,4353	0,4698
2	0,2730	0,3036	0,3228	0,3588	0,3388	0,4032	0,3567	0,3800	0,3988	0,3896	0,3856	0,4024	0,4053	0,4381	0,4300	0,4328	0,4187	0,4226	0,4606
3	0,2663	0,2967	0,3157	0,3523	0,3323	0,3976	0,3506	0,3722	0,3906	0,3800	0,3763	0,3940	0,3969	0,4291	0,4215	0,4251	0,4114	0,4151	0,4552
4	0,2615	0,2915	0,3107	0,3478	0,3243	0,3896	0,3426	0,3674	0,3845	0,3739	0,3713	0,3896	0,3940	0,4268	0,4215	0,4156	0,4032	0,4068	0,4513
5	0,2579	0,2881	0,3068	0,3440	0,3202	0,3856	0,3387	0,3637	0,3806	0,3697	0,3673	0,3856	0,3901	0,4228	0,4177	0,4154	0,4021	0,4057	0,4483
6	0,2548	0,2850	0,3037	0,3411	0,3169	0,3820	0,3351	0,3607	0,3774	0,3663	0,3641	0,3821	0,3868	0,4196	0,4147	0,4119	0,3988	0,4023	0,4450
7	0,2523	0,2824	0,3010	0,3386	0,3141	0,3798	0,3329	0,3581	0,3747	0,3633	0,3614	0,3792	0,3841	0,4169	0,4121	0,4090	0,3960	0,3995	0,4426
8	0,2501	0,2801	0,2987	0,3364	0,3117	0,3774	0,3305	0,3558	0,3723	0,3608	0,3589	0,3767	0,3817	0,4145	0,4099	0,4054	0,3928	0,3970	0,4421
9	0,2481	0,2781	0,2966	0,3345	0,3096	0,3754	0,3285	0,3538	0,3702	0,3586	0,3567	0,3746	0,3795	0,4124	0,4078	0,4042	0,3915	0,3945	0,4405
10	0,2464	0,2763	0,2948	0,3328	0,3077	0,3736	0,3267	0,3520	0,3684	0,3568	0,3549	0,3728	0,3778	0,4105	0,4062	0,4022	0,3896	0,3929	0,4391
12	0,2434	0,2732	0,2916	0,3299	0,3043	0,3704	0,3235	0,3488	0,3651	0,3535	0,3516	0,3695	0,3745	0,4073	0,4031	0,3987	0,3863	0,3895	0,4367
15	0,2397	0,2694	0,2878	0,3263	0,3003	0,3663	0,3194	0,3447	0,3610	0,3494	0,3475	0,3654	0,3706	0,4033	0,3994	0,3945	0,3822	0,3854	0,4337

Tabela 4.37 - Umidade volumétrica calculada pela regressão linear θ versus Int, para a coluna C do solo LRd, com os tempos de redistribuição previamente definidos.

Umidade volumétrica (m ³ .m ⁻³) - coluna C - solo LRd																					
t (dias)	profundidade (m)																				
	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,10	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,16	0,17	0,18	0,19	0,20	
0	0,4507	0,4687	0,4804	0,4808	0,5071	0,4347	0,4944	0,5014	0,5117	0,4808	0,5196	0,5333	0,5048	0,4837	0,5288	0,5420	0,5658	0,4871	0,5857	0,5066	
0,05	0,3851	0,3898	0,4141	0,3895	0,4382	0,3836	0,4331	0,4405	0,4406	0,4043	0,4436	0,4380	0,4385	0,4180	0,4558	0,4719	0,4807	0,4203	0,4894	0,4467	
0,1	0,3745	0,3884	0,4034	0,3886	0,4282	0,3753	0,4221	0,4307	0,4386	0,3851	0,4428	0,4452	0,4278	0,4053	0,4479	0,4605	0,4686	0,4038	0,4810	0,4574	
0,2	0,3638	0,3772	0,3928	0,3795	0,4172	0,3670	0,4132	0,4208	0,4284	0,3860	0,4322	0,4335	0,4172	0,4005	0,4358	0,4402	0,4531	0,3891	0,4691	0,4460	
0,3	0,3576	0,3707	0,3863	0,3738	0,4105	0,3622	0,4074	0,4151	0,4226	0,3805	0,4280	0,4265	0,4108	0,3860	0,4304	0,4425	0,4450	0,3828	0,4605	0,4384	
0,4	0,3532	0,3660	0,3819	0,3697	0,4062	0,3567	0,4022	0,4110	0,4194	0,3708	0,4215	0,4214	0,4038	0,3828	0,4258	0,4378	0,4393	0,3853	0,4543	0,4327	
0,5	0,3498	0,3624	0,3784	0,3665	0,4027	0,3530	0,4000	0,4078	0,4161	0,3738	0,4181	0,4175	0,4030	0,3802	0,4223	0,4242	0,4348	0,3848	0,4466	0,4311	
0,7	0,3446	0,3570	0,3732	0,3617	0,3973	0,3470	0,3952	0,4030	0,4113	0,3694	0,4131	0,4115	0,3978	0,3856	0,4170	0,4255	0,4281	0,3796	0,4474	0,4293	
0,9	0,3408	0,3529	0,3690	0,3580	0,3933	0,3430	0,3914	0,4000	0,4076	0,3681	0,4060	0,4071	0,3938	0,3838	0,4130	0,4245	0,4231	0,3757	0,4373	0,4214	
1	0,3392	0,3512	0,3677	0,3566	0,3917	0,3417	0,3901	0,4000	0,4081	0,3647	0,4074	0,4053	0,3923	0,3826	0,4113	0,4228	0,4211	0,3740	0,4346	0,4157	
2	0,3286	0,3400	0,3569	0,3466	0,3807	0,3305	0,3801	0,3881	0,3960	0,3555	0,3967	0,3931	0,3816	0,3749	0,4003	0,4114	0,4073	0,3633	0,4200	0,4084	
3	0,3223	0,3335	0,3507	0,3406	0,3742	0,3240	0,3743	0,3823	0,3901	0,3502	0,3905	0,3880	0,3753	0,3704	0,3939	0,4048	0,3982	0,3588	0,4114	0,4015	
4	0,3179	0,3288	0,3462	0,3367	0,3697	0,3192	0,3702	0,3782	0,3859	0,3454	0,3860	0,3809	0,3709	0,3672	0,3903	0,4001	0,3935	0,3525	0,4063	0,3971	
5	0,3145	0,3252	0,3427	0,3335	0,3661	0,3155	0,3670	0,3750	0,3827	0,3434	0,3825	0,3770	0,3675	0,3647	0,3857	0,3954	0,3900	0,3490	0,4005	0,3904	
6	0,3117	0,3223	0,3399	0,3309	0,3632	0,3125	0,3644	0,3724	0,3801	0,3410	0,3796	0,3736	0,3648	0,3626	0,3828	0,3934	0,3854	0,3462	0,3965	0,3864	
7	0,3093	0,3198	0,3375	0,3287	0,3606	0,3098	0,3622	0,3702	0,3778	0,3380	0,3774	0,3711	0,3623	0,3609	0,3804	0,3909	0,3823	0,3435	0,3933	0,3879	
8	0,3073	0,3176	0,3355	0,3267	0,3586	0,3078	0,3602	0,3684	0,3759	0,3372	0,3753	0,3687	0,3602	0,3584	0,3783	0,3887	0,3797	0,3417	0,3916	0,3857	
9	0,3055	0,3157	0,3336	0,3251	0,3568	0,3060	0,3606	0,3687	0,3762	0,3367	0,3745	0,3686	0,3601	0,3581	0,3784	0,3888	0,3793	0,3405	0,3904	0,3846	
10	0,3039	0,3140	0,3320	0,3235	0,3552	0,3047	0,3602	0,3684	0,3759	0,3372	0,3753	0,3687	0,3602	0,3582	0,3783	0,3887	0,3793	0,3405	0,3904	0,3846	
12	0,3011	0,3111	0,3292	0,3209	0,3525	0,3019	0,3602	0,3684	0,3759	0,3372	0,3753	0,3687	0,3602	0,3582	0,3783	0,3887	0,3793	0,3405	0,3904	0,3846	
15	0,2977	0,3075	0,3257	0,3177	0,3493	0,2987	0,3602	0,3684	0,3759	0,3372	0,3753	0,3687	0,3602	0,3582	0,3783	0,3887	0,3793	0,3405	0,3904	0,3846	

anteriormente para o cálculo da umidade de saturação, considerando os valores do tempo de redistribuição variando de 0,05 a 15 dias. As figuras 4.15 e 4.16 (solo LVa, colunas B e E), 4.17 e 4.18 (solo LVE, colunas C e F), 4.19 e 4.20 (solo LRd colunas A e C), mostram a umidade volumétrica θ obtida por modelo em função da profundidade na coluna de solo. Cada curva está relacionada na legenda, de acordo com o tempo de redistribuição estipulado. As curvas θ versus t para as profundidades de 0,10 e 0,20 m podem ser visualizadas nas figuras 4.21 a 4.26, respectivamente para as colunas B e E (solo LVa), C e F (solo LVE), A e C (solo LRd). Estas figuras mostram o ajuste do modelo aos dados experimentais, apenas nestas duas profundidades. O coeficiente de correlação r da regressão linear θ versus $\ln t$, está apresentado nos gráficos para a respectiva profundidade. A tabela 4.38, fornece uma visão geral da variação dos coeficientes de correlação r para cada profundidade em cada coluna, apresentando seus valores máximos e mínimos, estando indicado entre parênteses em qual profundidade da coluna ocorreu tal valor.

Tabela 4.38 - Valores máximos e mínimos do coeficiente de correlação[#] para a regressão θ versus $\ln t$ aplicada aos dados experimentais.

Solo	Coluna	r (máximo)	r (mínimo)
LVa	A	0,9726 (19)	0,6430 (2)
	B	0,9798 (3)	0,8790 (1)
	C	0,9629 (16)	0,9284 (4)
	D	0,9841 (13)	0,7479 (15)
	E	0,9803 (20)	0,8814 (1)
	F	0,9825 (4)	0,8812 (3)

Tabela 4.38 - Valores máximos e mínimos do coeficiente de correlação[#] para a regressão θ versus $\ln t$ aplicada aos dados experimentais (continuação).

LVE	A	0,9777 (19)	0,6474 (4)
	B	0,9777 (18)	0,8082 (6)
	C	0,9788 (15)	0,7338 (4)
	D	0,9528 (19)	0,8525 (5)
	E	0,9845 (18)	0,5107 (2)
	F	0,8597 (14)	0,6483 (17)
LRd	A	0,9873 (10)	0,7817 (19)
	B	0,9959 (7)	0,8842 (2)
	C	0,9988 (17)	0,8450 (14)

[#]o número entre parênteses refere-se à profundidade na coluna de solo, para a qual foi encontrado o respectivo valor de r .

Dos resultados da tabela acima, nota-se que a maior diferença percentual no coeficiente de correlação no solo LVA foi para a coluna A, que apresentou um valor de 51%. Para o solo LVE tem-se a coluna E, com valor de 93% e para o solo LRd foi a coluna A, com 26%. Já a menor diferença percentual considerando o solo LVA, foi para a coluna C com valor de 4%. Os demais solos tem-se: LVE a coluna D com 12% e LRd a coluna B com 13%.

O modelo θ versus $\ln t$ foi escolhido pelo fato de ser o mais adotado para descrever o processo de redistribuição, fazendo também parte da análise teórica de LIBARDI et al. (1980) e SISSON et al. (1980).

Nas figuras (4.3 a 4.8), devido a seu paralelismo, nota-se claramente que a variabilidade dos dados em profundidade não é devida à técnica de medida da umidade (atenuação da radiação gama) mas sim, predominantemente à variabilidade do solo. Este fato é importante e evidencia a dificuldade de se obter solos homogêneos até mesmo sob condições controladas de laboratório. As figuras 4.27, 4.28 e 4.29 obtidas para as colunas B e E (solo

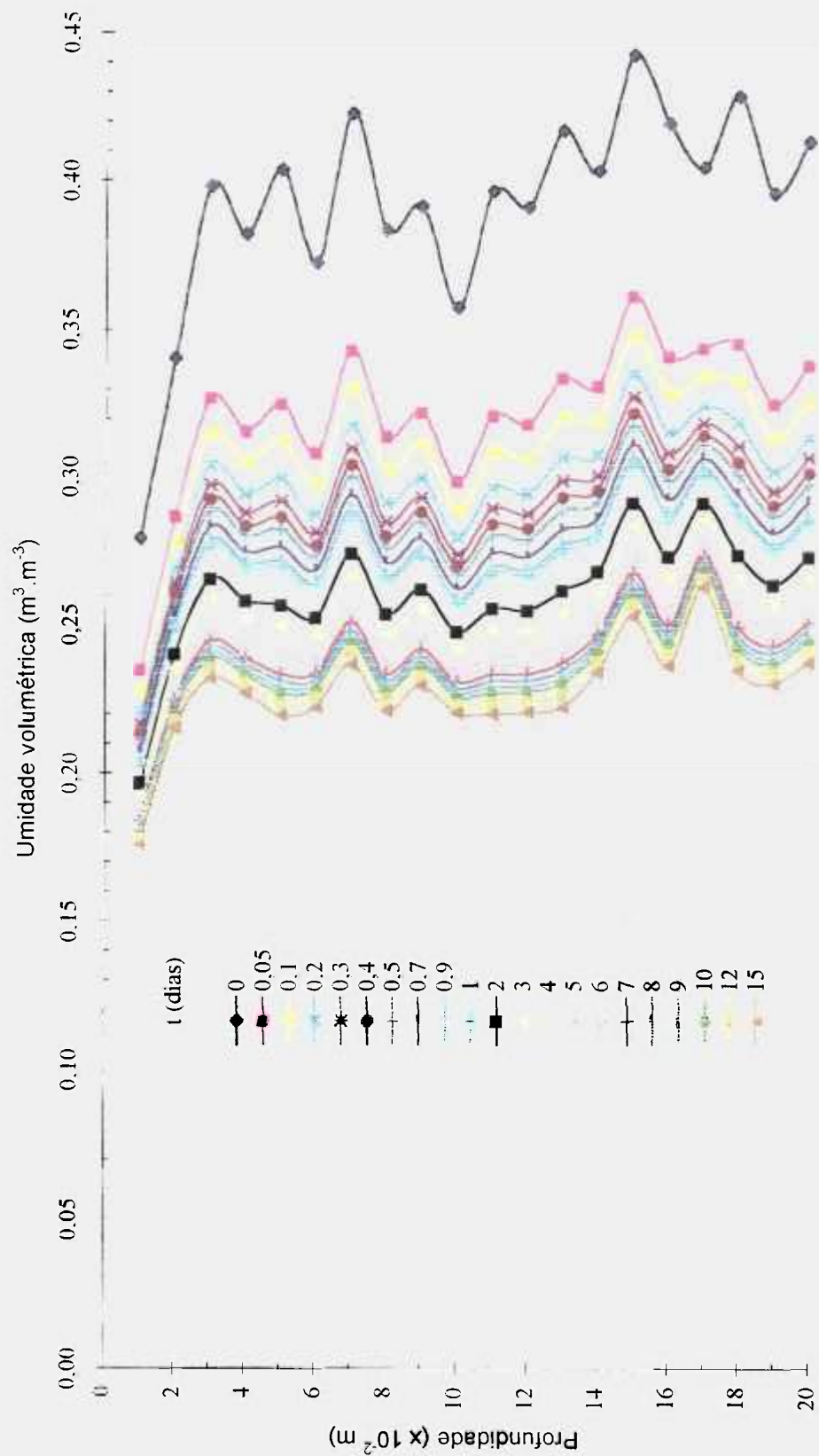


Figura 4.15: Umidade volumétrica calculada por modelo versus profundidade na coluna B do solo LVa.

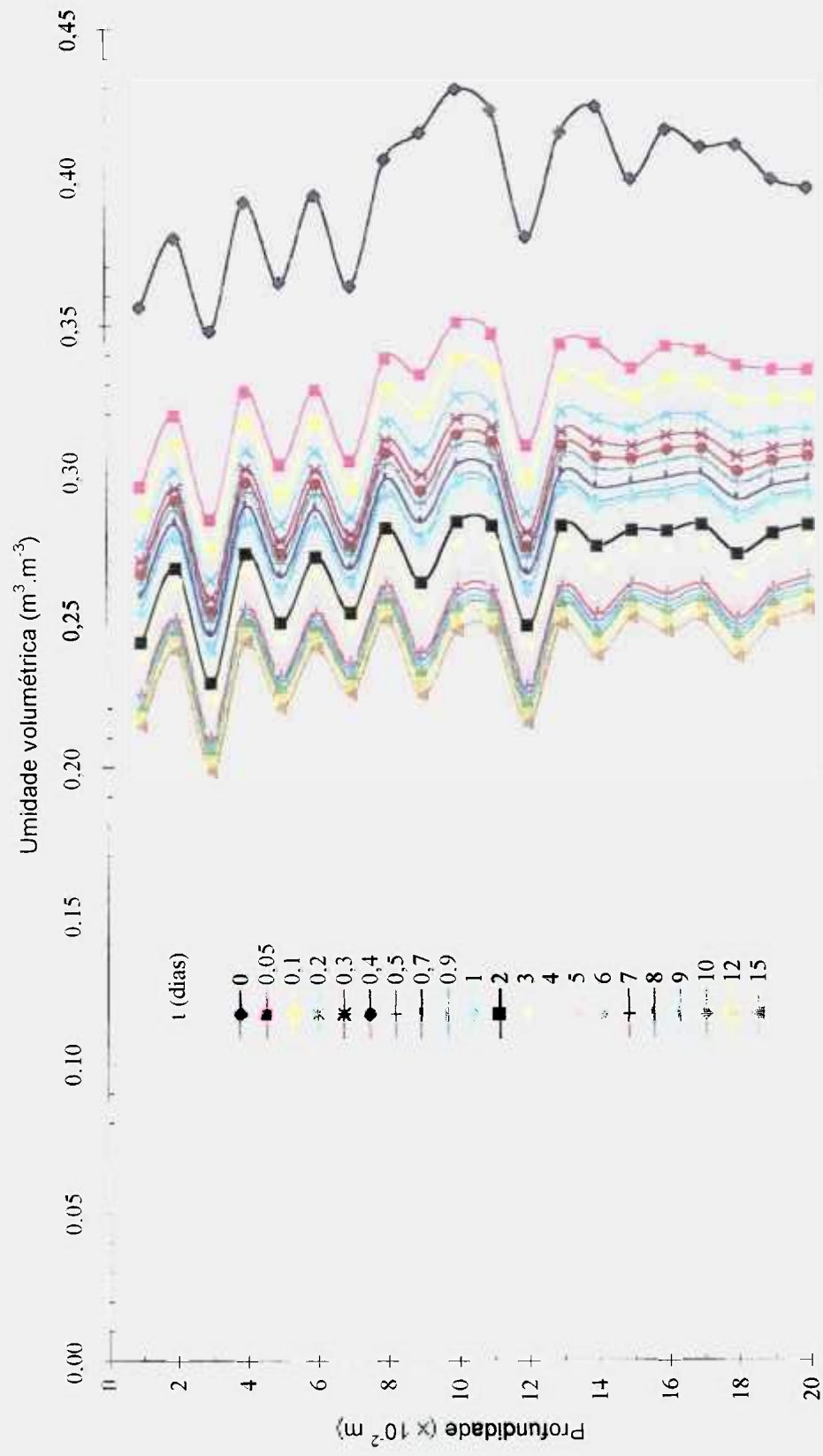


Figura 4.16: Umidade volumétrica calculada por modelo versus profundidade na coluna E do solo LVa.

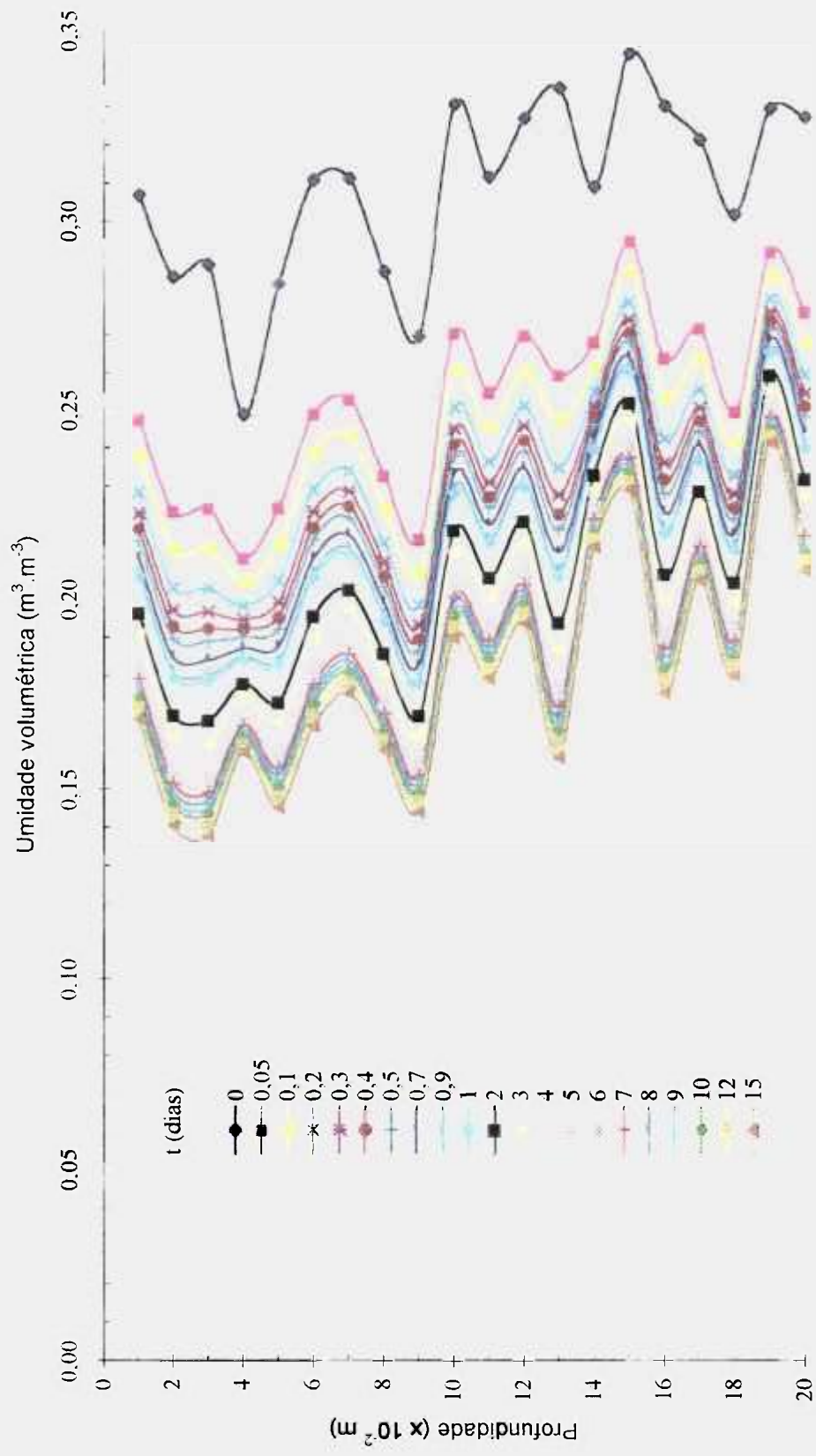


Figura 4.17: Umidade volumétrica calculada por modelo versus profundidade na coluna C do solo LVE.

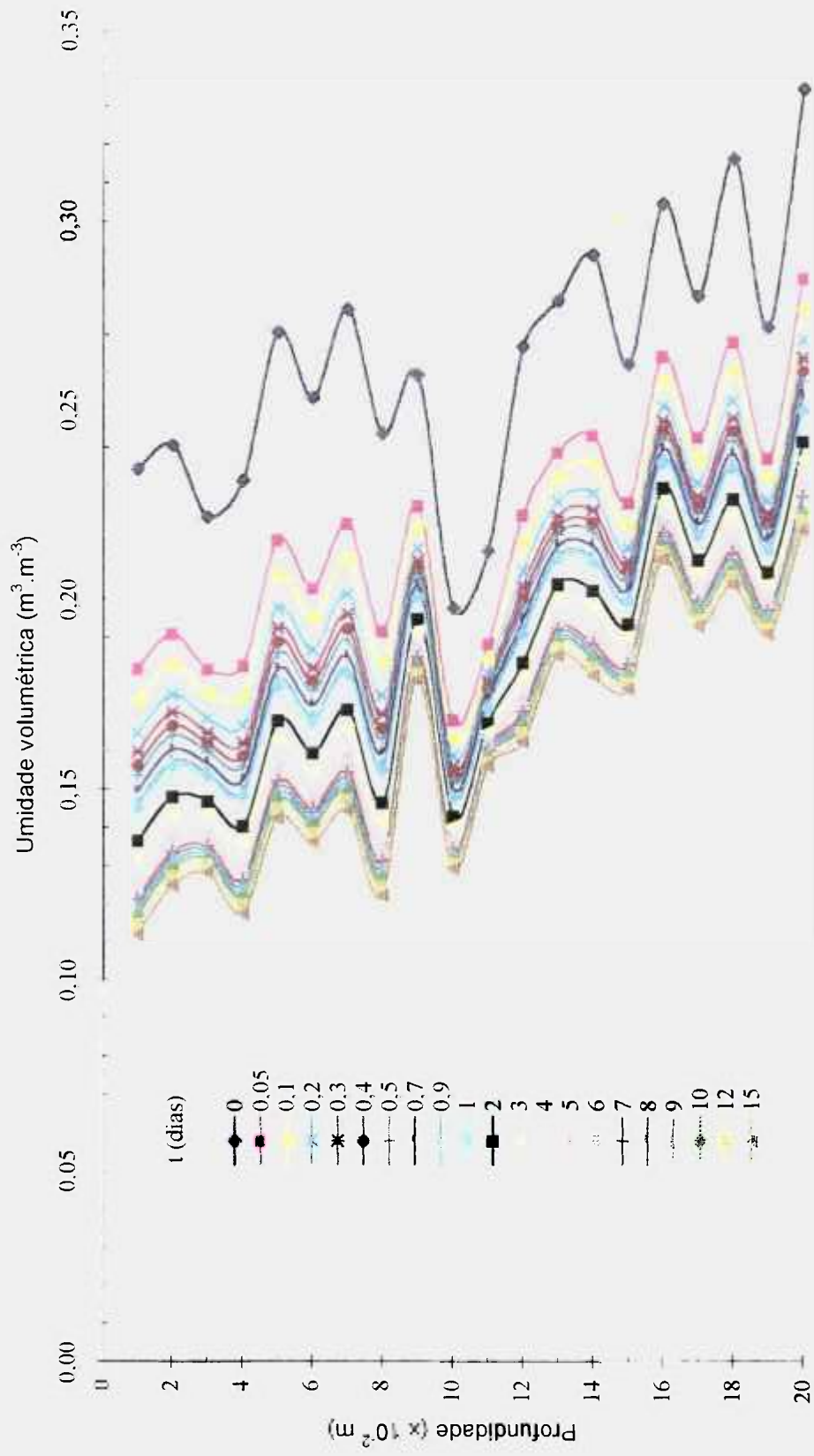


Figura 4.18: Umidade volumétrica calculada por modelo versus profundidade na coluna F do solo LVE.

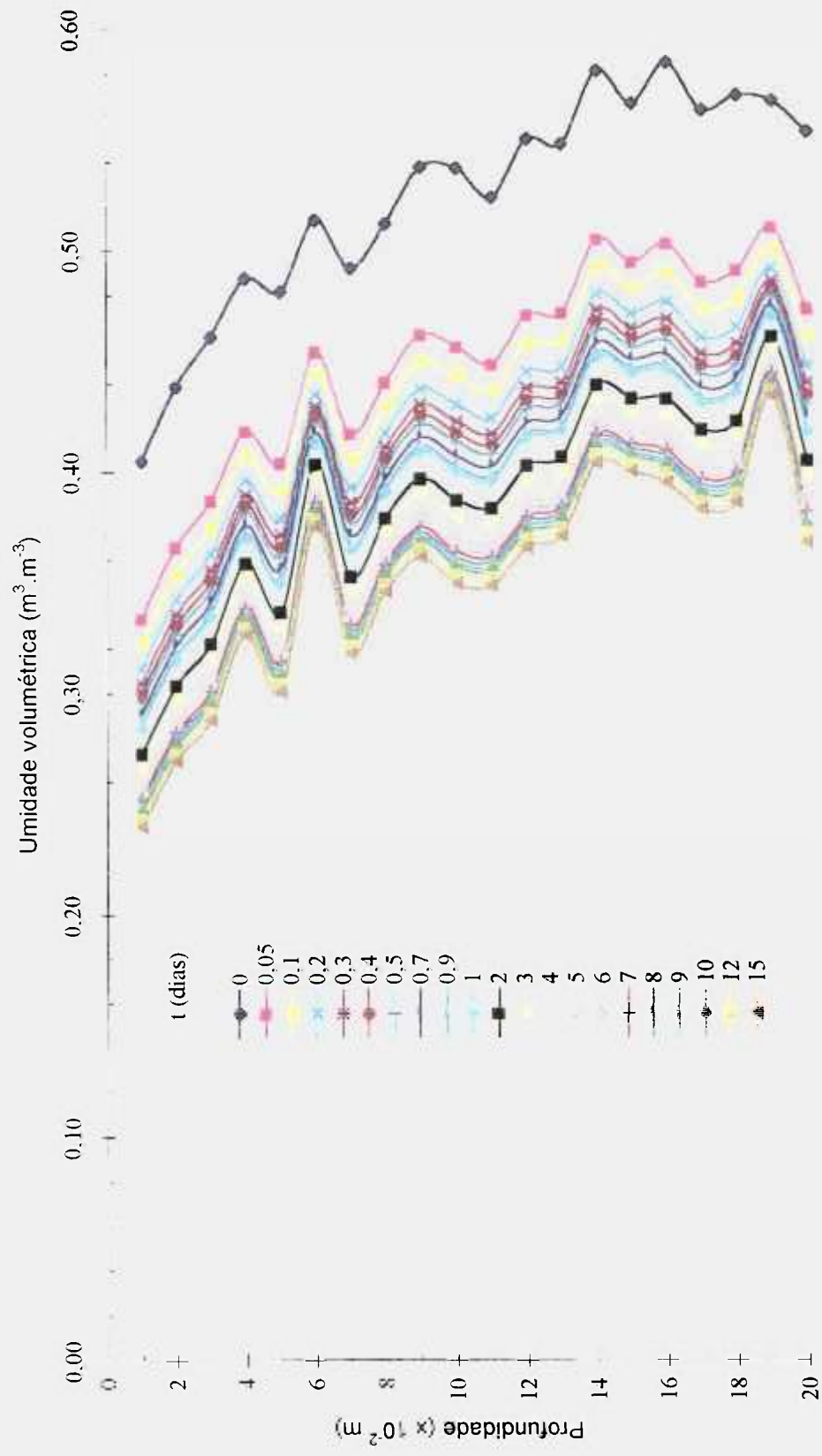


Figura 4.19: Umidade volumétrica calculada por modelo versus profundidade na coluna A do solo LRd.

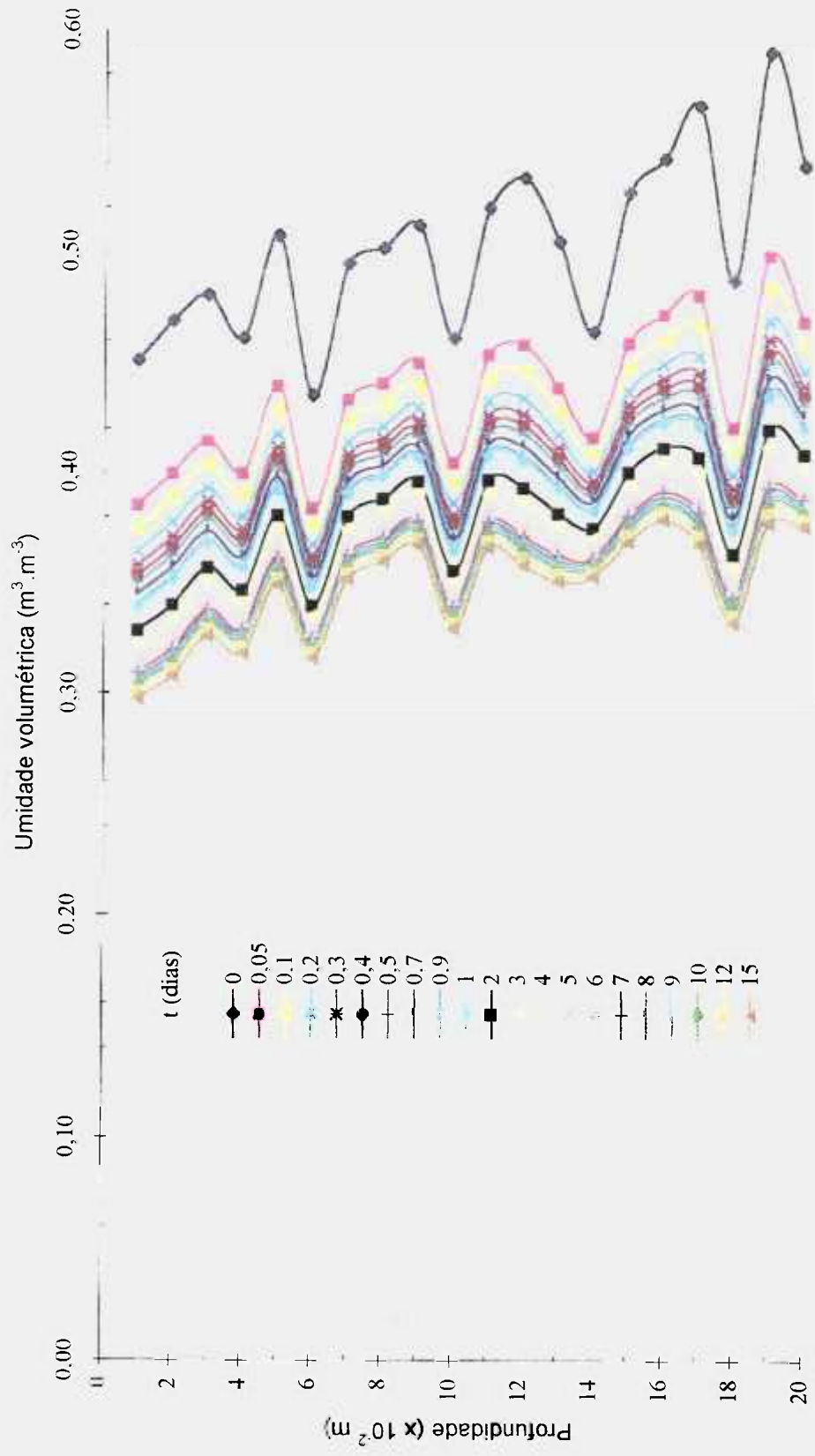


Figura 4.20: Umidade volumétrica calculada por modelo versus profundidade na coluna C do solo LRd.

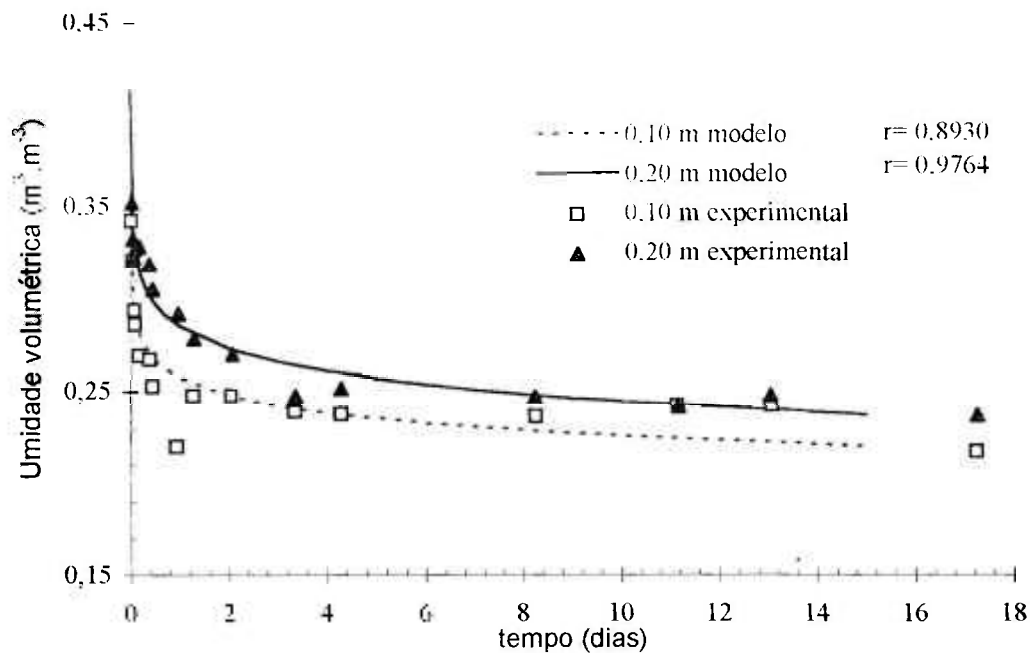


Figura 4.21: Umidade volumétrica medida em função do tempo de redistribuição e o ajuste pelo modelo para a coluna B do solo L Va.

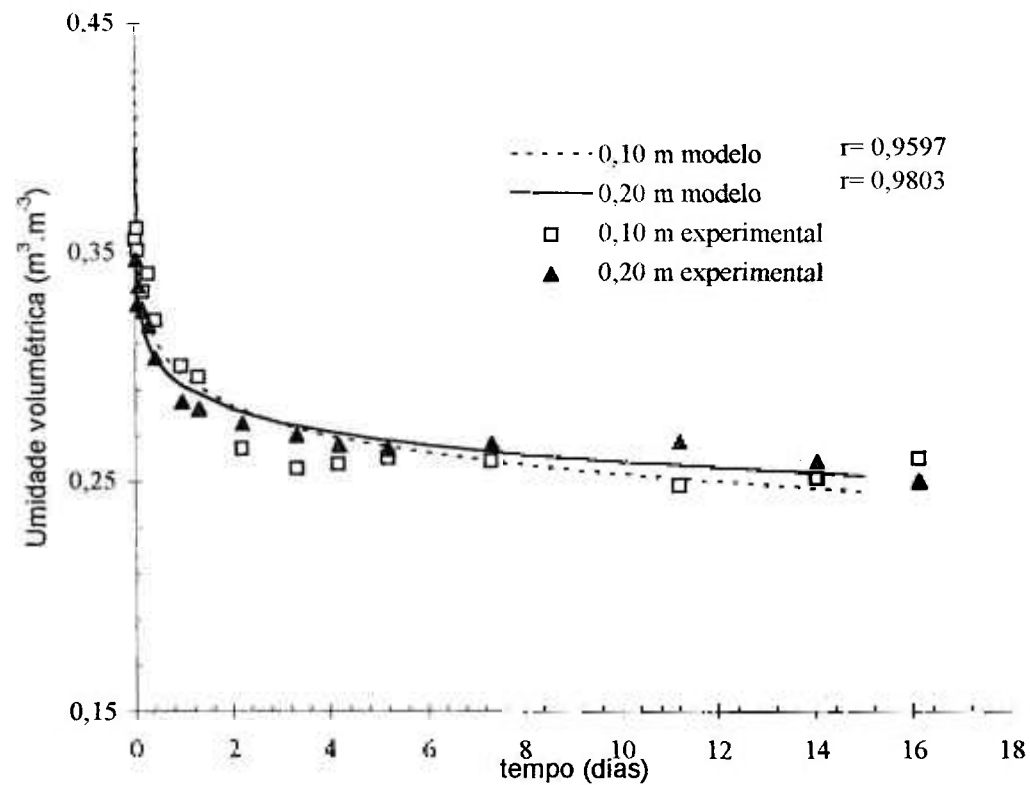


Figura 4.22: Umidade volumétrica medida em função do tempo de redistribuição e o ajuste pelo modelo para a coluna E do solo L Va.

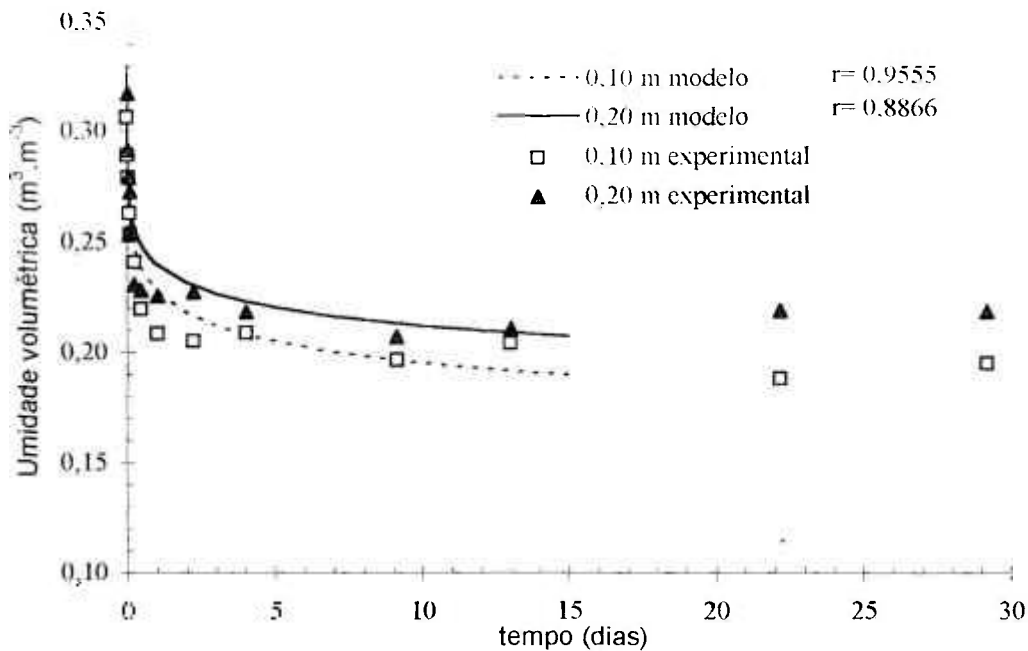


Figura 4.23: Umidade volumétrica medida em função do tempo de redistribuição e o ajuste pelo modelo para a coluna C do solo LVE.

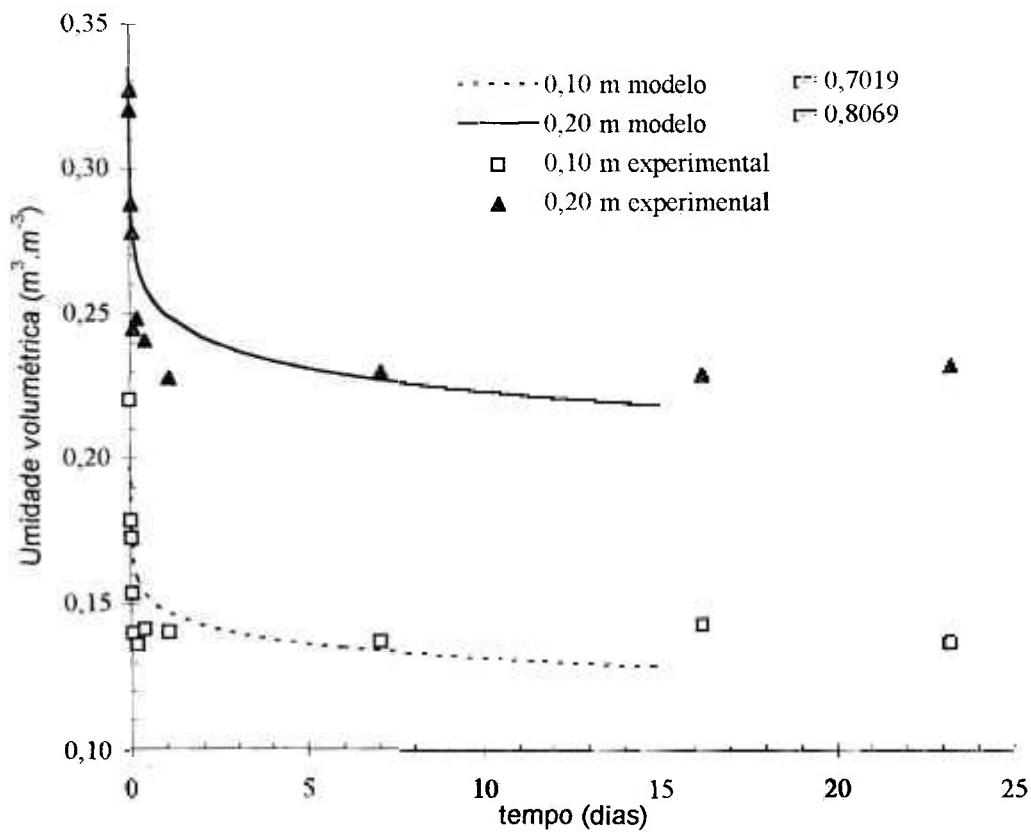


Figura 4.24: Umidade volumétrica medida em função do tempo de redistribuição e o ajuste pelo modelo para a coluna F do solo LVE.

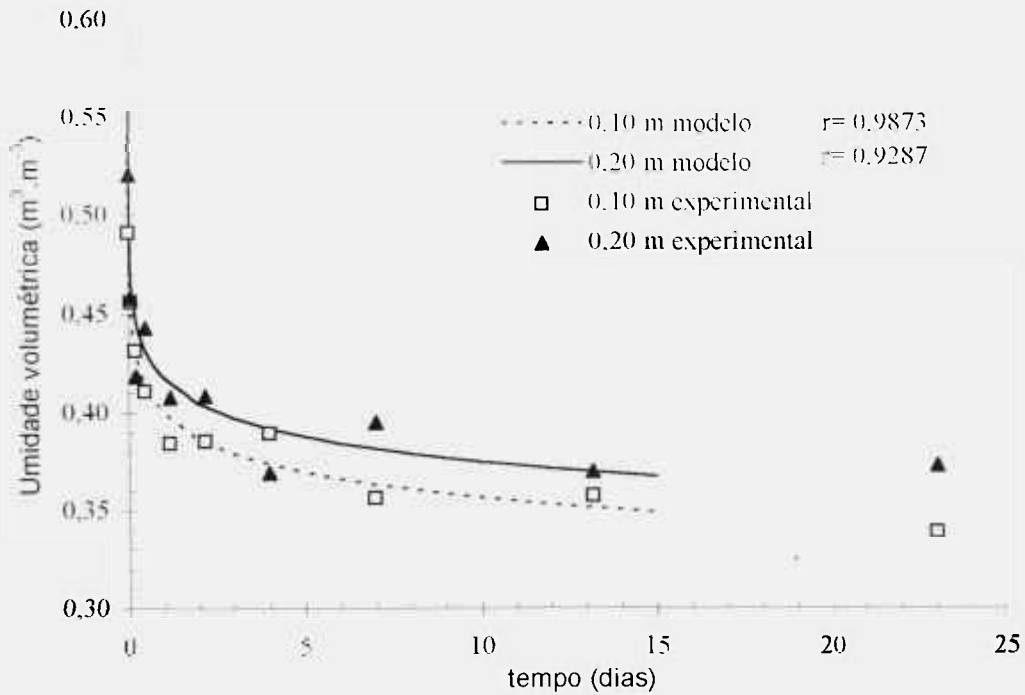


Figura 4.25: Umidade volumétrica medida em função do tempo de redistribuição e o ajuste pelo modelo para a coluna A do solo LRd.

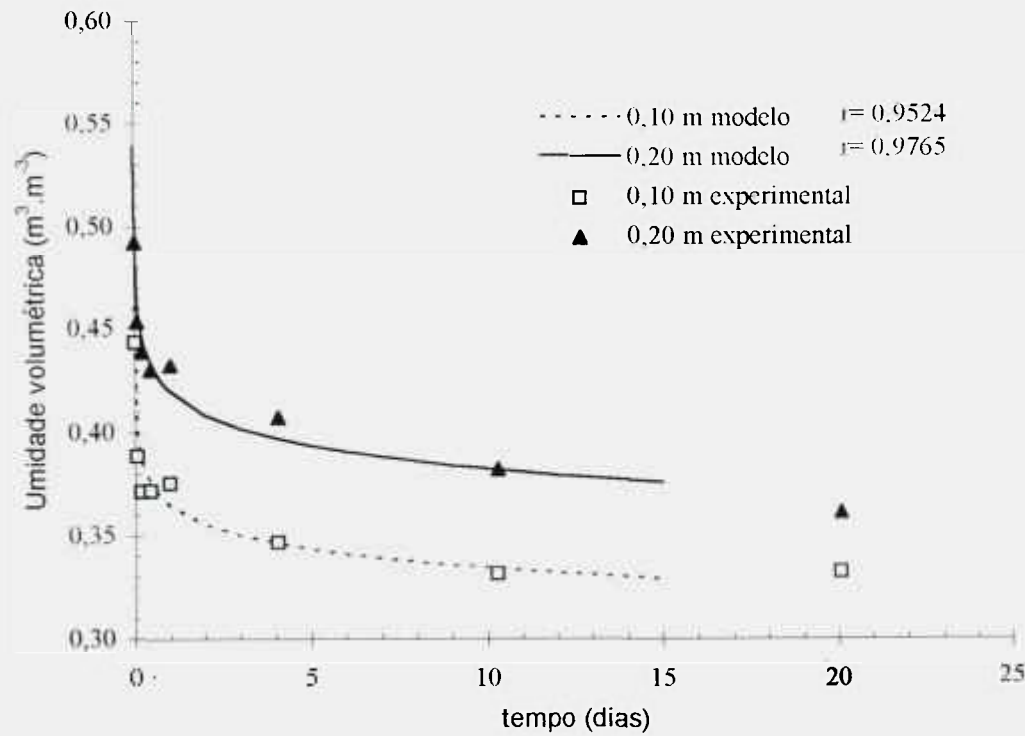
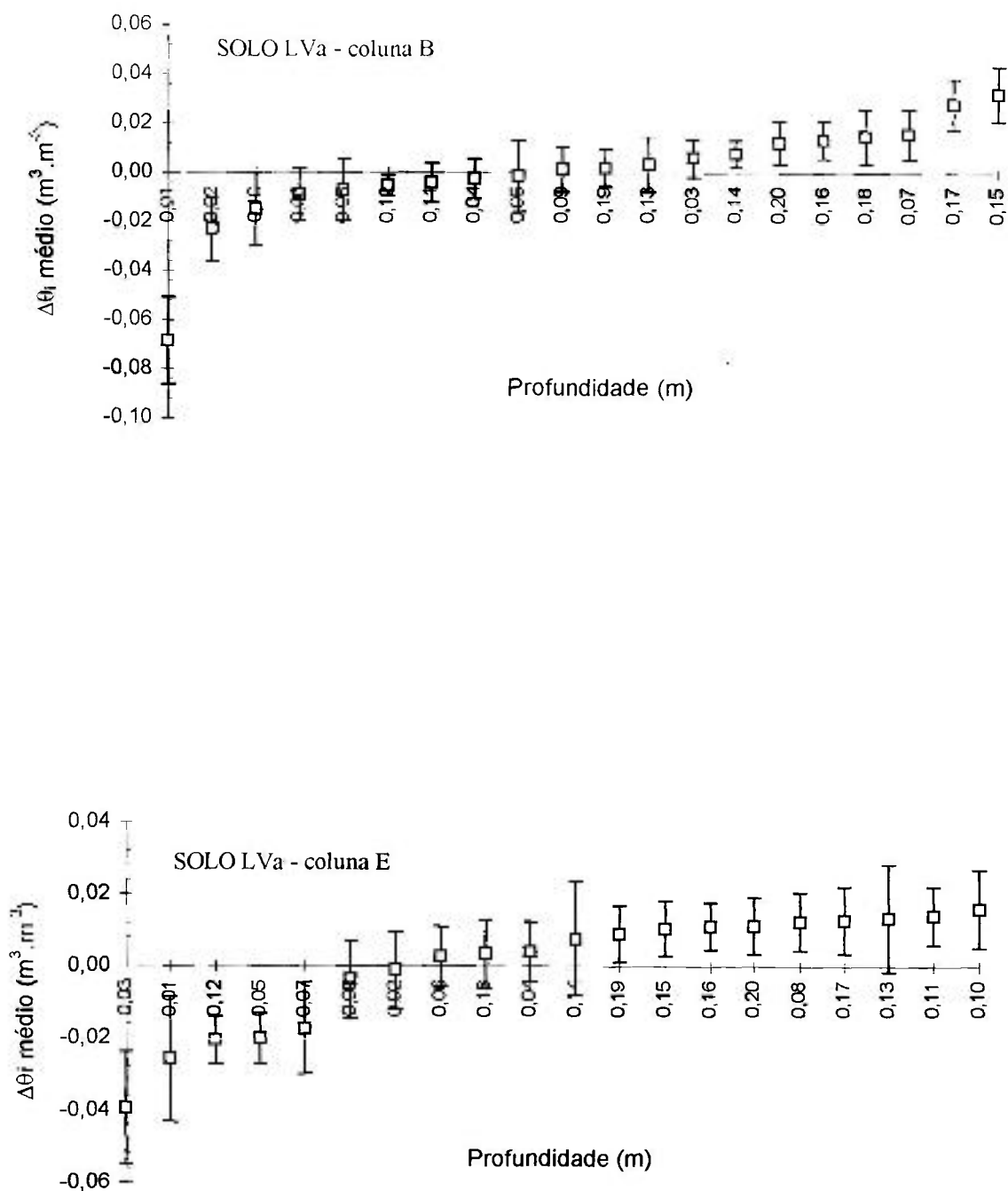


Figura 4.26: Umidade volumétrica medida em função do tempo de redistribuição e o ajuste pelo modelo para a coluna C do solo LRd.



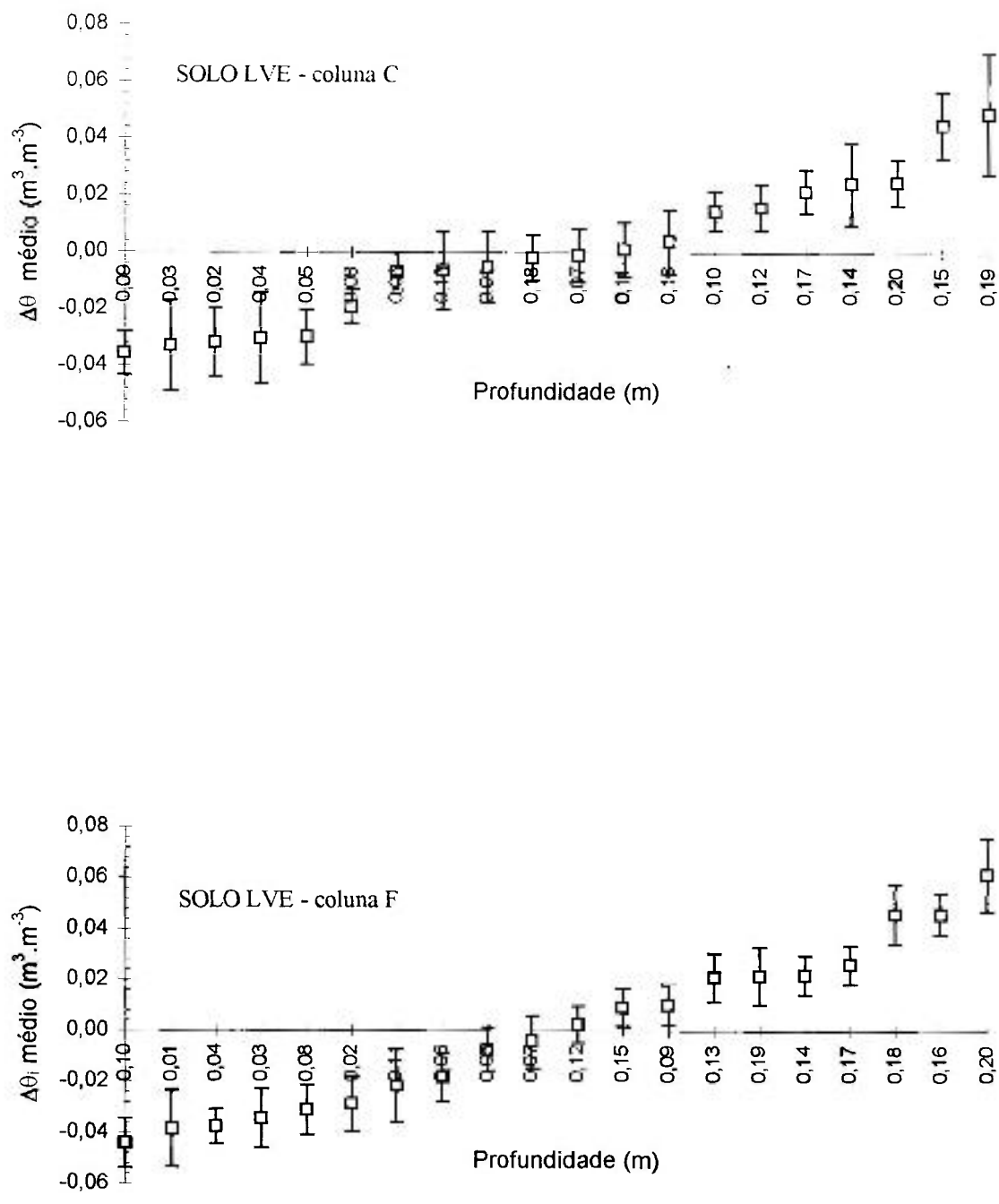


Figura 4.28: Desvios médios da umidade do solo em função das profundidades: a) coluna C e b) coluna F do solo LVE.

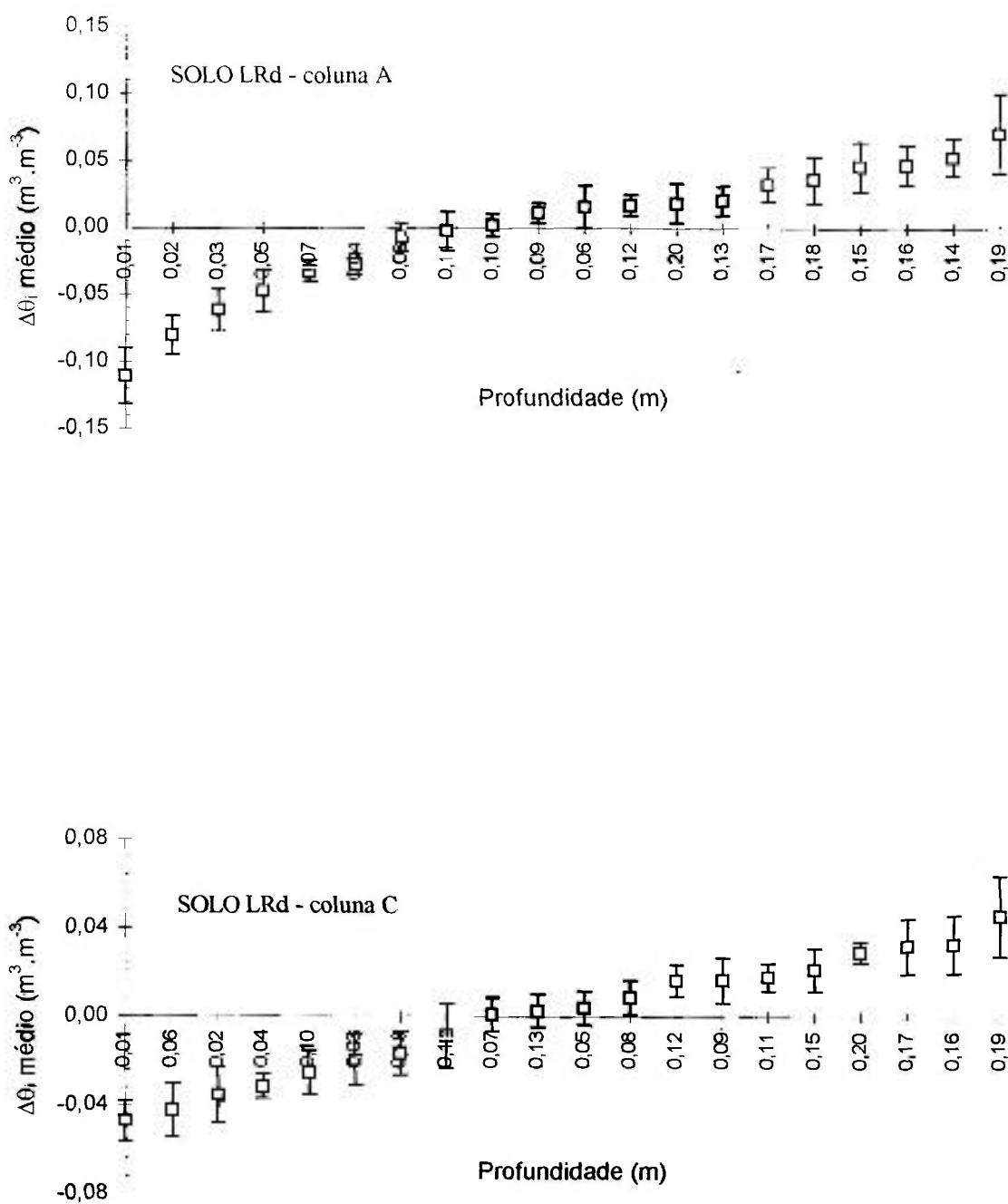


Figura 4.29: Desvios médios da umidade do solo em função das profundidades: a) coluna A e b) coluna C do solo LRd.

LVa), C e F (solo LVE) e A e C (solo LRd), mostram a dificuldade de se construir em laboratório colunas de solo homogêneas. Relacionam os desvios médios da umidade do solo, em relação a seu valor médio para cada t , em função das profundidades nas quais foram medidas. Elas mostram a estabilidade temporal da umidade do solo, uma vez que profundidades onde θ é maior ou menor que o valor médio da coluna, permanecem maiores ou menores durante todo período de redistribuição. O *ranking* dos desvios mostra uma aleatoriedade das profundidades, o que caracteriza a variabilidade espacial das colunas, com estabilidade temporal e que é consequência da variabilidade do arranjo poroso em amostras supostas homogêneas.

4.5 - Condutividade hidráulica

Os valores das umidades volumétricas θ ajustados pelo modelo $\theta = A^* \ln t + B^*$ em cada profundidade das colunas de solo, foram utilizados pelo programa CONDHILS (PORTEZAN, 1994) para a determinação dos parâmetros K_s (valor saturado da condutividade hidráulica na umidade máxima θ_s) e γ da equação 2.33. Os valores dos potenciais matriciais calculados em laboratório não puderam ser utilizados no cálculo da condutividade hidráulica, fato este já justificado anteriormente. Devido a isto, o método de HILLEL et al. (1972) foi também empregado com a aproximação do gradiente unitário. Os métodos de LIBARDI et al. (1980) e SISSON et al. (1980) têm, como já foi mostrado no capítulo de teoria, a aproximação do gradiente unitário. As tabelas 4.39 a 4.44 mostram os valores de K_s e γ , obtidos neste trabalho com os métodos de HILLEL et al. (1972), LIBARDI et al. (1980) e SISSON et al. (1980), nas profundidades de 0,01 a 0,20 m apenas para as colunas de solo B e E (LVa), C e F (LVE) e A e C (LRd). Também estão apresentados os valores da umidade de saturação θ_s , os quais foram

Tabela 4.39a - Valores de K_s e γ obtidos do programa CONDHILS para o método de HILLEL et al. (1972), considerando $\delta H/\delta z = -1$ e resultados das respectivas regressões lineares aplicadas aos dados de umidade θ na coluna de solo durante redistribuição da água.
Solo LVa - coluna B

$K(\theta)=K_s \exp[\gamma(\theta - \theta_s)]$				$\theta_s - \theta = A_z \text{Int} + B_z$			$\ln[K(\theta)] = E(\theta - \theta_s) + F$		
Z (m)	K_s ($\times 10^9 \text{ m.s}^{-1}$)	γ	$\theta_s^{\#}$ ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$)	Z (m)	A_z	B_z	Z (m)	E	F
0.01	1.7322	96.2327	0.2795	0.01	0.0104	0.0756	0.01	96.2327	-0.4724
0.02	3.8252	79.6311	0.3404	0.02	0.0126	0.0913	0.02	79.6311	0.3199
0.03	6.6065	59.9335	0.3985	0.03	0.0167	0.1213	0.03	59.9335	0.8663
0.04	9.2005	64.2462	0.3824	0.04	0.0156	0.1132	0.04	64.2462	1.1975
0.05	12.2834	54.0659	0.4041	0.05	0.0185	0.1345	0.05	54.0659	1.4865
0.06	14.7938	66.3979	0.3726	0.06	0.0151	0.1095	0.06	66.3979	1.6725
0.07	17.9042	53.5961	0.4229	0.07	0.0187	0.1357	0.07	53.5961	1.8633
0.08	20.6195	61.3750	0.3837	0.08	0.0163	0.1185	0.08	61.3750	2.0045
0.09	23.3293	61.5029	0.3917	0.09	0.0163	0.1182	0.09	61.5029	2.1280
0.10	25.6214	72.7125	0.3576	0.10	0.0138	0.1000	0.10	72.7125	2.2217
0.11	28.5769	56.4151	0.3968	0.11	0.0177	0.1289	0.11	56.4151	2.3309
0.12	31.4315	58.3804	0.3915	0.12	0.0171	0.1246	0.12	58.3804	2.4261
0.13	34.6856	51.2145	0.4174	0.13	0.0195	0.1420	0.13	51.2145	2.5246
0.14	37.5203	58.8197	0.4038	0.14	0.0170	0.1236	0.14	58.8197	2.6032
0.15	40.6878	52.5979	0.4427	0.15	0.0190	0.1383	0.15	52.5979	2.6842
0.16	43.7524	54.3921	0.4197	0.16	0.0184	0.1337	0.16	54.3921	2.7568
0.17	46.1305	70.1740	0.4049	0.17	0.0143	0.1036	0.17	70.1740	2.8097
0.18	49.3692	51.3997	0.4288	0.18	0.0195	0.1415	0.18	51.3997	2.8776
0.19	52.1398	60.2379	0.3960	0.19	0.0166	0.1207	0.19	60.2379	2.9322
0.20	55.0815	56.6660	0.4136	0.20	0.0177	0.1283	0.20	56.6660	2.9871

calculada para t= 0,0007 dia

Tabela 4.39b - Valores de K_s e γ obtidos do programa CONDHILS para o método de LIBARDI et al. (1980), considerando $\delta H/\delta z = -1$ e resultados das respectivas regressões lineares aplicadas aos dados de umidade θ na coluna de solo durante redistribuição da água.
Solo LVa - coluna B

$K(\theta)=K_s \exp[\gamma(\theta - \theta_s)]$				$\theta_s - \theta = A_z \text{Int} + B_z$			$\theta^* = a\theta + b$		
z (m)	K_s ($\times 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$)	γ	$\theta_s^{\#}$ ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$)	z (m)	A_z	B_z	z (m)	a	b
0.01	1.7321	96.2321	0.2795	0.01	0.0104	0.0756	0.01	1	0
0.02	3.8253	79.6311	0.3404	0.02	0.0126	0.0913	0.02	0.9138	-0.0011
0.03	6.6063	59.9333	0.3985	0.03	0.0167	0.1213	0.03	0.7918	0.0239
0.04	9.2006	64.2464	0.3824	0.04	0.0156	0.1132	0.04	0.8866	0.0112
0.05	12.2835	54.0660	0.4041	0.05	0.0185	0.1345	0.05	0.7969	0.0389
0.06	14.7939	66.3980	0.3726	0.06	0.0151	0.1095	0.06	0.9822	-0.0030
0.07	17.9037	53.5959	0.4229	0.07	0.0187	0.1357	0.07	0.8224	0.0237
0.08	20.6195	61.3751	0.3837	0.08	0.0163	0.1185	0.08	0.9491	0.0089
0.09	23.3291	61.5031	0.3917	0.09	0.0163	0.1182	0.09	0.9565	0.0004
0.10	25.6216	72.7127	0.3576	0.10	0.0138	0.1000	0.10	1.1177	-0.0263
0.11	28.5768	56.4151	0.3968	0.11	0.0177	0.1289	0.11	0.8793	0.0266
0.12	31.4318	58.3805	0.3915	0.12	0.0171	0.1246	0.12	0.9174	0.0176
0.13	34.6860	51.2146	0.4174	0.13	0.0195	0.1420	0.13	0.8198	0.0378
0.14	37.5200	58.8196	0.4038	0.14	0.0170	0.1236	0.14	0.9457	-0.0003
0.15	40.6889	52.5980	0.4427	0.15	0.0190	0.1383	0.15	0.8560	0.0067
0.16	43.7528	54.3922	0.4197	0.16	0.0184	0.1337	0.16	0.8924	0.0133
0.17	46.1282	70.1737	0.4049	0.17	0.0143	0.1036	0.17	1.1424	-0.0738
0.18	49.3712	51.4000	0.4288	0.18	0.0195	0.1415	0.18	0.8458	0.0284
0.19	52.1386	60.2377	0.3960	0.19	0.0166	0.1207	0.19	0.9917	-0.0014
0.20	55.0795	56.6658	0.4136	0.20	0.0177	0.1283	0.20	0.9363	0.0052

calculada para t= 0,0007 dia

Tabela 4.39c - Valores de K_s e γ obtidos do programa CONDHILS para o método de SISSON et al. (1980), considerando $\delta H/\delta z = -1$ e resultado da respectiva regressão linear aplicada aos dados de umidade θ na coluna de solo durante redistribuição da água.
Solo L Va - coluna B

z (m)	K(θ)= $K_s \exp[\gamma(\theta - \theta_s)]$		
	K_s ($\times 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$)	γ	θ_s # ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$)
0.01	1.7321	96.2325	0.2795
0.02	4.1863	79.6311	0.3404
0.03	8.3434	59.9334	0.3985
0.04	10.3772	64.2461	0.3824
0.05	15.4139	54.0657	0.4041
0.06	15.0616	66.3978	0.3726
0.07	21.7700	53.5961	0.4229
0.08	21.7260	61.3750	0.3837
0.09	24.3907	61.5030	0.3917
0.10	22.9224	72.7124	0.3576
0.11	32.4996	56.4150	0.3968
0.12	34.2611	58.3805	0.3915
0.13	42.3091	51.2147	0.4174
0.14	39.6735	58.8198	0.4038
0.15	47.5333	52.5979	0.4427
0.16	49.0290	54.3920	0.4197
0.17	40.3798	70.1738	0.4049
0.18	58.3683	51.3997	0.4288
0.19	52.5761	60.2381	0.3960
0.20	58.8312	56.6661	0.4136

calculada para t= 0,0007 dia

z (m)	$\ln(z/t)=\ln(\gamma K_s) + \gamma(\theta - \theta_s)$	
	$\ln(\gamma K_s)$	γ
0.01	7.2724	96.2325
0.02	7.9655	79.6311
0.03	8.3710	59.9334
0.04	8.6587	64.2461
0.05	8.8818	54.0657
0.06	9.0641	66.3978
0.07	9.2183	53.5961
0.08	9.3518	61.3750
0.09	9.4696	61.5030
0.10	9.5750	72.7124
0.11	9.6703	56.4150
0.12	9.7573	58.3805
0.13	9.8374	51.2147
0.14	9.9115	58.8198
0.15	9.9804	52.5979
0.16	10.0450	54.3920
0.17	10.1056	70.1738
0.18	10.1627	51.3997
0.19	10.2169	60.2381
0.20	10.2682	56.6661

Tabela 4.40a - Valores de K_s e γ obtidos do programa CONDHILS para o método de HILLEL et al. (1972), considerando $\delta H/\delta z = -1$ e resultados das respectivas regressões lineares aplicadas aos dados de unidade θ na coluna de solo durante redistribuição da água.
Solo LVa - coluna E

$K(\theta)=K_s \exp[\gamma(\theta - \theta_s)]$				$\theta_s - \theta=A_z \ln t + B_z$				$\ln[K(\theta)]=E(\theta - \theta_s) + F$			
z (m)	K_s ($\times 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$)	γ	θ_s # ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$)	z (m)	A_z	B_z	z (m)	E	F		
0.01	2.3757	70.1632	0.3562	0.01	0.0143	0.1037	0.01	70.1632	-0.1565		
0.02	4.7196	71.1115	0.3796	0.02	0.0141	0.1023	0.02	71.1115	0.5300		
0.03	7.2105	66.9074	0.3478	0.03	0.0150	0.1087	0.03	66.9074	0.9538		
0.04	9.7033	66.8711	0.3915	0.04	0.0150	0.1088	0.04	66.8711	1.2507		
0.05	12.1135	69.1490	0.3641	0.05	0.0145	0.1052	0.05	69.1490	1.4726		
0.06	14.6777	65.0163	0.3935	0.06	0.0154	0.1119	0.06	65.0163	1.6646		
0.07	16.9918	72.0314	0.3628	0.07	0.0139	0.1010	0.07	72.0314	1.8110		
0.08	19.6036	63.8133	0.4057	0.08	0.0157	0.1140	0.08	63.8133	1.9540		
0.09	22.7896	52.3021	0.4147	0.09	0.0191	0.1391	0.09	52.3021	2.1046		
0.10	25.8601	54.3021	0.4295	0.10	0.0184	0.1339	0.10	54.3021	2.2310		
0.11	28.8059	56.5778	0.4223	0.11	0.0177	0.1285	0.11	56.5778	2.3389		
0.12	31.5609	60.4871	0.3794	0.12	0.0165	0.1202	0.12	60.4871	2.4302		
0.13	34.3447	59.8618	0.4147	0.13	0.0167	0.1215	0.13	59.8618	2.5147		
0.14	37.4553	53.6314	0.4232	0.14	0.0187	0.1356	0.14	53.6314	2.6014		
0.15	39.9374	67.1188	0.3987	0.15	0.0149	0.1084	0.15	67.1188	2.6656		
0.16	42.7804	58.5997	0.4155	0.16	0.0171	0.1241	0.16	58.5997	2.7344		
0.17	45.4558	62.3263	0.4096	0.17	0.0160	0.1167	0.17	62.3263	2.7950		
0.18	48.3508	57.5689	0.4101	0.18	0.0174	0.1263	0.18	57.5689	2.8568		
0.19	50.8592	66.4636	0.3986	0.19	0.0151	0.1094	0.19	66.4636	2.9073		
0.20	53.2440	69.9537	0.3954	0.20	0.0143	0.1040	0.20	69.9537	2.9532		

calculada para $t=0,0007$ dia

Tabela 4.40b - Valores de K_s e γ obtidos do programa CONDHILS para o método de LIBARDI et al. (1980), considerando $\delta H/\delta z = -1$ e resultados das respectivas regressões lineares aplicadas aos dados de umidade θ na coluna de solo durante redistribuição da água.
 Solo LVa - coluna E

K(θ)=K _s exp[γ(θ - θ _s)]				θ _s - θ=A _z Int + B _z			θ*=a() + b		
z (m)	K _s (x 10 ⁻⁶ m.s ⁻¹)	γ	θ _s [#] (m ³ .m ⁻³)	z (m)	A _z	B _z	z (m)	a	b
0.01	2.3756	70.1629	0.3562	0.01	0.0143	0.1037	0.01	1	0
0.02	4.7195	71.1113	0.3796	0.02	0.0141	0.1023	0.02	1.0068	-0.0143
0.03	7.2107	66.9077	0.3478	0.03	0.0150	0.1087	0.03	0.9648	0.0256
0.04	9.7033	66.8711	0.3915	0.04	0.0150	0.1088	0.04	0.9732	-0.0122
0.05	12.1136	69.1491	0.3641	0.05	0.0145	0.1052	0.05	1.0051	0.0019
0.06	14.6775	65.0162	0.3935	0.06	0.0154	0.1119	0.06	0.9542	-0.0034
0.07	16.9912	72.0312	0.3628	0.07	0.0139	0.1010	0.07	1.0490	-0.0098
0.08	19.6032	63.8132	0.4057	0.08	0.0157	0.1140	0.08	0.9381	-0.0054
0.09	22.7902	52.3023	0.4147	0.09	0.0191	0.1391	0.09	0.7946	0.0500
0.10	25.8600	54.3020	0.4295	0.10	0.0184	0.1339	0.10	0.8425	0.0227
0.11	28.8057	56.5778	0.4223	0.11	0.0177	0.1285	0.11	0.8889	0.0126
0.12	31.5615	60.4872	0.3794	0.12	0.0165	0.1202	0.12	0.9545	0.0252
0.13	34.3458	59.8620	0.4147	0.13	0.0167	0.1215	0.13	0.9489	-0.0042
0.14	37.4536	53.6311	0.4232	0.14	0.0187	0.1356	0.14	0.8608	0.0275
0.15	39.9371	67.1188	0.3987	0.15	0.0149	0.1084	0.15	1.0721	-0.0352
0.16	42.7818	58.5999	0.4155	0.16	0.0171	0.1241	0.16	0.9401	0.0031
0.17	45.4555	62.3263	0.4096	0.17	0.0160	0.1167	0.17	0.9998	-0.0149
0.18	48.3514	57.5689	0.4101	0.18	0.0174	0.1263	0.18	0.9278	0.0150
0.19	50.8592	66.4635	0.3986	0.19	0.0151	0.1094	0.19	1.0674	-0.0298
0.20	53.2424	69.9533	0.3954	0.20	0.0143	0.1040	0.20	1.1173	-0.0461

calculada para t= 0,0007 dia

Tabela 4.40c - Valores de K_s e γ obtidos do programa CONDHILS para o método de SISSON et al. (1980), considerando $\delta H/\delta z = -1$ e resultado da respectiva regressão linear aplicada aos dados de umidade θ na coluna de solo durante redistribuição da água.
 Solo LVa - coluna E

$K(\theta)=K_s \exp[\gamma(\theta - \theta_s)]$			
Z (m)	K_s (x 10^{-6} m.s ⁻¹)	γ	θ_s # (m ³ .m ⁻³)
0.01	2.3757	70.1633	0.3562
0.02	4.6879	71.1114	0.3796
0.03	7.4734	66.9075	0.3478
0.04	9.9702	66.8711	0.3915
0.05	12.0524	69.1493	0.3641
0.06	15.3824	65.0164	0.3935
0.07	16.1984	72.0315	0.3628
0.08	20.8962	63.8133	0.4057
0.09	28.6821	52.3024	0.4147
0.10	30.6950	54.3020	0.4295
0.11	32.4063	56.5778	0.4223
0.12	33.0681	60.4873	0.3794
0.13	36.1953	59.8616	0.4147
0.14	43.5131	53.6315	0.4232
0.15	37.2506	67.1188	0.3987
0.16	45.5087	58.5997	0.4155
0.17	45.4634	62.3263	0.4096
0.18	52.1166	57.5691	0.4101
0.19	47.6494	66.4636	0.3986
0.20	47.6558	69.9536	0.3954

calculada para t= 0,0007 dia

$\ln(z/t)=\ln(\gamma K_s) + \gamma(\theta - \theta_s)$		
Z (m)	$\ln(\gamma K_s)$	γ
0.01	7.2725	70.1633
0.02	7.9656	71.1114
0.03	8.3710	66.9075
0.04	8.6587	66.8711
0.05	8.8819	69.1493
0.06	9.0642	65.0164
0.07	9.2183	72.0315
0.08	9.3519	63.8133
0.09	9.4696	52.3024
0.10	9.5750	54.3020
0.11	9.6703	56.5778
0.12	9.7573	60.4873
0.13	9.8373	59.8616
0.14	9.9115	53.6315
0.15	9.9805	67.1188
0.16	10.0450	58.5997
0.17	10.1056	62.3263
0.18	10.1628	57.5691
0.19	10.2169	66.4636
0.20	10.2682	69.9536

Tabela 4.41a - Valores de K_s e γ obtidos do programa CONDHILS para o método de HILLEL et al. (1972), considerando $\delta H/\delta z = -1$ e resultados das respectivas regressões lineares aplicadas aos dados de umidade θ na coluna de solo durante redistribuição da água.
Solo LVE - coluna C

$K(\theta)=K_s \exp[\gamma(\theta - \theta_s)]$				$\theta_s - \theta=A_z \ln t + B_z$			$\ln[K(\theta)]=E(\theta - \theta_s) + F$		
z (m)	K_s ($\times 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$)	γ	$\theta_s^{\#}$ ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$)	z (m)	A_z	B_z	z (m)	E	F
0.01	2.3066	72.2621	0.3067	0.01	0.0138	0.1006	0.01	72.2621	-0.1860
0.02	4.7236	68.9601	0.2850	0.02	0.0145	0.1055	0.02	68.9601	0.5308
0.03	7.2422	66.1772	0.2884	0.03	0.0151	0.1099	0.03	66.1772	0.9582
0.04	8.7286	112.1402	0.2488	0.04	0.0089	0.0649	0.04	112.1402	1.1449
0.05	11.0376	72.1943	0.2832	0.05	0.0139	0.1007	0.05	72.1943	1.3796
0.06	13.4432	69.2850	0.3104	0.06	0.0144	0.1050	0.06	69.2850	1.5767
0.07	15.7108	73.5166	0.3108	0.07	0.0136	0.0989	0.07	73.5166	1.7326
0.08	17.8163	79.1344	0.2863	0.08	0.0126	0.0919	0.08	79.1344	1.8584
0.09	19.9129	79.4967	0.2694	0.09	0.0126	0.0915	0.09	79.4967	1.9696
0.10	22.2596	71.0611	0.3302	0.10	0.0141	0.1023	0.10	71.0611	2.0810
0.11	24.4693	75.4195	0.3111	0.11	0.0133	0.0964	0.11	75.4195	2.1757
0.12	26.6934	74.9871	0.3266	0.12	0.0133	0.0970	0.12	74.9871	2.2627
0.13	29.6385	56.5685	0.3346	0.13	0.0177	0.1286	0.13	56.5685	2.3673
0.14	31.2232	105.1227	0.3086	0.14	0.0095	0.0692	0.14	105.1227	2.4194
0.15	33.1469	86.6662	0.3436	0.15	0.0115	0.0839	0.15	86.6662	2.4792
0.16	35.7303	64.5017	0.3299	0.16	0.0155	0.1128	0.16	64.5017	2.5543
0.17	37.6722	85.8723	0.3211	0.17	0.0117	0.0847	0.17	85.8723	2.6072
0.18	39.7009	82.1381	0.3013	0.18	0.0122	0.0885	0.18	82.1381	2.6596
0.19	41.1726	113.2982	0.3291	0.19	0.0088	0.0642	0.19	113.2982	2.6960
0.20	43.1699	83.5257	0.3268	0.20	0.0120	0.0871	0.20	83.5257	2.7434

calculada para $t = 0,0007$ dia

Tabela 4.41b - Valores de K_s e γ obtidos do programa CONDHILS para o método de LIBARDI et al. (1980), considerando $\delta H/\delta z = -1$ e resultados das respectivas regressões lineares aplicadas aos dados de umidade θ na coluna de solo durante redistribuição da água.
Solo LVE - coluna C

$K(\theta) = K_s \exp[\gamma(\theta - \theta_s)]$				$\theta_s - \theta = A_z \ln t + B_z$			$\theta^* = a() + b$		
z (m)	K_s ($\times 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$)	γ	θ_s # ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$)	z (m)	A_z	B_z	z (m)	a	b
0.01	2.3066	72.2623	0.3067	0.01	0.0138	0.1006	0.01	1	0
0.02	4.7236	68.9602	0.2850	0.02	0.0145	0.1055	0.02	0.9772	0.0174
0.03	7.2423	66.1774	0.2884	0.03	0.0151	0.1099	0.03	0.9585	0.0170
0.04	8.7286	112.1403	0.2488	0.04	0.0089	0.0649	0.04	1.4681	-0.0830
0.05	11.0374	72.1941	0.2832	0.05	0.0139	0.1007	0.05	0.9561	0.0116
0.06	13.4432	69.2850	0.3104	0.06	0.0144	0.1050	0.06	0.9313	-0.0020
0.07	15.7105	73.5163	0.3108	0.07	0.0136	0.0989	0.07	0.9899	-0.0172
0.08	17.8165	79.1346	0.2863	0.08	0.0126	0.0919	0.08	1.0573	-0.0128
0.09	19.9135	79.4969	0.2694	0.09	0.0126	0.0915	0.09	1.0553	0.0034
0.10	22.2590	71.0608	0.3302	0.10	0.0141	0.1023	0.10	0.9490	-0.0215
0.11	24.4688	75.4194	0.3111	0.11	0.0133	0.0964	0.11	1.0065	-0.0195
0.12	26.6922	74.9865	0.3266	0.12	0.0133	0.0970	0.12	1.0007	-0.0304
0.13	29.6382	56.5684	0.3346	0.13	0.0177	0.1286	0.13	0.7738	0.0405
0.14	31.2232	105.1229	0.3086	0.14	0.0095	0.0692	0.14	1.4066	-0.1340
0.15	33.1468	86.6663	0.3436	0.15	0.0115	0.0839	0.15	1.1490	-0.0919
0.16	35.7312	64.5019	0.3299	0.16	0.0155	0.1128	0.16	0.8642	0.0195
0.17	37.6723	85.8723	0.3211	0.17	0.0117	0.0847	0.17	1.1417	-0.0610
0.18	39.7012	82.1383	0.3013	0.18	0.0122	0.0885	0.18	1.0869	-0.0222
0.19	41.1728	113.2982	0.3291	0.19	0.0088	0.0642	0.19	1.4730	-0.1782
0.20	43.1680	83.5252	0.3268	0.20	0.0120	0.0871	0.20	1.0816	-0.0459

calculada para t= 0,0007 dia

Tabela 4.41c - Valores de K_s e γ obtidos do programa CONDHILS para o método de SISSON et al. (1980), considerando $\delta H/\delta z = -1$ e resultado da respectiva regressão linear aplicada aos dados de umidade θ na coluna de solo durante redistribuição da água.
Solo LVE - coluna C

K(θ)= $K_s \exp[\gamma(\theta - \theta_s)]$				
Z (m)	K_s ($\times 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$)	γ	θ_s # ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$)	
0.01	2.3065	72.2620	0.3067	
0.02	4.8341	68.9602	0.2850	
0.03	7.5560	66.1773	0.2884	
0.04	5.9453	112.1402	0.2488	
0.05	11.5438	72.1941	0.2832	
0.06	14.4342	69.2849	0.3104	
0.07	15.8712	73.5166	0.3108	
0.08	16.8498	79.1343	0.2863	
0.09	18.8699	79.4968	0.2694	
0.10	23.4572	71.0614	0.3302	
0.11	24.3109	75.4196	0.3111	
0.12	26.6747	74.9869	0.3266	
0.13	38.3054	56.5686	0.3346	
0.14	22.1979	105.1229	0.3086	
0.15	28.8484	86.6662	0.3436	
0.16	41.3449	64.5017	0.3299	
0.17	32.9968	85.8722	0.3211	
0.18	36.5262	82.1382	0.3013	
0.19	27.9519	113.2981	0.3291	
0.20	39.9133	83.5259	0.3268	

calculada para t= 0,0007 dia

$\ln(z/t)=\ln(\gamma K_s) + \gamma(\theta - \theta_s)$		
Z (m)	$\ln(\gamma K_s)$	γ
0.01	7.2724	72.2620
0.02	7.9655	68.9602
0.03	8.3710	66.1773
0.04	8.6587	112.1402
0.05	8.8818	72.1941
0.06	9.0642	69.2849
0.07	9.2183	73.5166
0.08	9.3518	79.1343
0.09	9.4696	79.4968
0.10	9.5750	71.0614
0.11	9.6703	75.4196
0.12	9.7574	74.9869
0.13	9.8374	56.5686
0.14	9.9115	105.1229
0.15	9.9804	86.6662
0.16	10.0450	64.5017
0.17	10.1056	85.8722
0.18	10.1628	82.1382
0.19	10.2168	113.2981
0.20	10.2682	83.5259

Tabela 4.42a - Valores de K_s e γ obtidos do programa CONDHILS para o método de HILLEL et al. (1972), considerando $\delta H/\delta z = -1$ e resultados das respectivas regressões lineares aplicadas aos dados de unidade θ na coluna de solo durante redistribuição da água.
Solo LVE - coluna F

$K(\theta) = K_s \exp[\gamma(\theta - \theta_s)]$				$\theta_s - \theta = A_z \text{Int} + B_z$			$\ln[K(\theta)] = E(\theta - \theta_s) + F$		
Z (m)	K_s ($\times 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$)	γ	$\theta_s^{\#}$ ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	Z (m)	A_z	B_z	Z (m)	E	F
0.01	2.0469	81.4300	0.2344	0.01	0.0123	0.0893	0.01	81.4300	-0.3054
0.02	3.9858	85.9766	0.2407	0.02	0.0116	0.0846	0.02	85.9766	0.3610
0.03	5.5523	106.3975	0.2217	0.03	0.0094	0.0684	0.03	106.3975	0.6925
0.04	7.4582	87.4458	0.2313	0.04	0.0114	0.0832	0.04	87.4458	0.9876
0.05	9.6018	77.7619	0.2705	0.05	0.0129	0.0935	0.05	77.7619	1.2402
0.06	11.5630	84.9794	0.2533	0.06	0.0118	0.0856	0.06	84.9794	1.4261
0.07	13.7742	75.3923	0.2765	0.07	0.0133	0.0965	0.07	75.3923	1.6011
0.08	15.8125	81.7434	0.2438	0.08	0.0122	0.0890	0.08	81.7434	1.7391
0.09	17.1592	123.8299	0.2591	0.09	0.0081	0.0587	0.09	123.8299	1.8208
0.10	18.3055	145.4863	0.1974	0.10	0.0069	0.0500	0.10	145.4863	1.8855
0.11	19.2531	175.7304	0.2126	0.11	0.0057	0.0414	0.11	175.7304	1.9359
0.12	20.9976	95.5672	0.2667	0.12	0.0105	0.0761	0.12	95.5672	2.0227
0.13	22.5641	106.3868	0.2788	0.13	0.0094	0.0684	0.13	106.3868	2.0946
0.14	24.4196	89.8369	0.2909	0.14	0.0111	0.0810	0.14	89.8369	2.1737
0.15	25.8534	116.2553	0.2620	0.15	0.0086	0.0626	0.15	116.2553	2.2307
0.16	27.4241	106.0911	0.3044	0.16	0.0094	0.0686	0.16	106.0911	2.2897
0.17	28.8837	114.3889	0.2801	0.17	0.0087	0.0636	0.17	114.3889	2.3416
0.18	30.7596	88.6839	0.3162	0.18	0.0113	0.0820	0.18	88.6839	2.4045
0.19	32.1140	123.0587	0.2719	0.19	0.0081	0.0591	0.19	123.0587	2.4476
0.20	34.0588	85.7036	0.3346	0.20	0.0117	0.0849	0.20	85.7036	2.5064

calculada para $t = 0,0007$ dia

Tabela 4.42b - Valores de K_s e γ obtidos do programa CONDHILS para o método de LIBARDI et al. (1980), considerando $\delta H/\delta z = -1$ e resultados das respectivas regressões lineares aplicadas aos dados de umidade θ na coluna de solo durante redistribuição da água.
 Solo LVE - coluna F

K(θ)= $K_s \exp[\gamma(\theta - \theta_s)]$				$\theta_s - \theta = A_z \ln t + B_z$			$\theta^* = a() + b$		
z (m)	K_s ($\times 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$)	γ	θ_s # ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$)	z (m)	A_z	B_z	z (m)	a	b
0.01	2.0469	81.4300	0.2344	0.01	0.0123	0.0893	0.01	1	0
0.02	3.9856	85.9759	0.2407	0.02	0.0116	0.0846	0.02	1.0279	-0.0099
0.03	5.5522	106.3971	0.2217	0.03	0.0094	0.0684	0.03	1.1814	-0.0297
0.04	7.4583	87.4459	0.2313	0.04	0.0114	0.0832	0.04	0.9782	0.0058
0.05	9.6016	77.7619	0.2705	0.05	0.0129	0.0935	0.05	0.8959	-0.0026
0.06	11.5632	84.9796	0.2533	0.06	0.0118	0.0856	0.06	0.9826	-0.0069
0.07	13.7740	75.3922	0.2765	0.07	0.0133	0.0965	0.07	0.8900	0.0008
0.08	15.8130	81.7438	0.2438	0.08	0.0122	0.0890	0.08	0.9694	0.0102
0.09	17.1590	123.8297	0.2591	0.09	0.0081	0.0587	0.09	1.4164	-0.1191
0.10	18.3050	145.4856	0.1974	0.10	0.0069	0.0500	0.10	1.5977	-0.0726
0.11	19.2527	175.7306	0.2126	0.11	0.0057	0.0414	0.11	1.8453	-0.1522
0.12	20.9974	95.5671	0.2667	0.12	0.0105	0.0761	0.12	1.0033	-0.0252
0.13	22.5638	106.3868	0.2788	0.13	0.0094	0.0684	0.13	1.1078	-0.0637
0.14	24.4194	89.8368	0.2909	0.14	0.0111	0.0810	0.14	0.9401	-0.0250
0.15	25.8533	116.2551	0.2620	0.15	0.0086	0.0626	0.15	1.2021	-0.0657
0.16	27.4235	106.0911	0.3044	0.16	0.0094	0.0686	0.16	1.0909	-0.0793
0.17	28.8821	114.3878	0.2801	0.17	0.0087	0.0636	0.17	1.1659	-0.0723
0.18	30.7612	88.6844	0.3162	0.18	0.0113	0.0820	0.18	0.9093	-0.0298
0.19	32.1153	123.0594	0.2719	0.19	0.0081	0.0591	0.19	1.2479	-0.0808
0.20	34.0598	85.7040	0.3346	0.20	0.0117	0.0849	0.20	0.8757	-0.0307

calculada para t= 0,0007 dia

Tabela 4.42c - Valores de K_s e γ obtidos do programa CONDHILS para o método de SISSON et al. (1980), considerando $\delta H/\delta z = -1$ e resultado da respectiva regressão linear aplicada aos dados de umidade θ na coluna de solo durante redistribuição da água.
Solo LVE - coluna F

K(θ)= $K_s \exp[\gamma(\theta - \theta_s)]$			
Z (m)	K_s (x 10 ⁻⁸ m.s ⁻¹)	γ	θ_s # (m ³ .m ⁻³)
0.01	2.0469	81.4298	0.2344
0.02	3.8776	85.9766	0.2407
0.03	4.6999	106.3976	0.2217
0.04	7.6242	87.4458	0.2313
0.05	10.7174	77.7620	0.2705
0.06	11.7683	84.9794	0.2533
0.07	15.4760	75.3923	0.2765
0.08	16.3117	81.7433	0.2438
0.09	12.1147	123.8302	0.2591
0.10	11.4571	145.4861	0.1974
0.11	10.4336	175.7308	0.2126
0.12	20.9300	95.5675	0.2667
0.13	20.3681	106.3872	0.2788
0.14	25.9754	89.8370	0.2909
0.15	21.5067	116.2556	0.2620
0.16	25.1376	106.0912	0.3044
0.17	24.7735	114.3890	0.2801
0.18	33.8294	88.6840	0.3162
0.19	25.7333	123.0583	0.2719
0.20	38.8965	85.7041	0.3346

calculada para t= 0,0007 dia

ln(z/t)=ln(γK_s) + $\gamma(\theta - \theta_s)$			
Z (m)	ln(γK_s)	γ	
0.01	7.2724	81.4298	
0.02	7.9656	85.9766	
0.03	8.3710	106.3976	
0.04	8.6587	87.4458	
0.05	8.8818	77.7620	
0.06	9.0641	84.9794	
0.07	9.2183	75.3923	
0.08	9.3518	81.7433	
0.09	9.4697	123.8302	
0.10	9.5750	145.4861	
0.11	9.6703	175.7308	
0.12	9.7573	95.5675	
0.13	9.8374	106.3872	
0.14	9.9115	89.8370	
0.15	9.9805	116.2556	
0.16	10.0450	106.0912	
0.17	10.1057	114.3890	
0.18	10.1627	88.6840	
0.19	10.2168	123.0583	
0.20	10.2681	85.7041	

Tabela 4.43a - Valores de K_s e γ obtidos do programa CONDHILS para o método de HILLEL et al. (1972), considerando $\delta H/\delta z = -1$ e resultados das respectivas regressões lineares aplicadas aos dados de umidade θ na coluna de solo durante redistribuição da água.
Solo LRD - coluna A

K(θ)=K _s exp[γ(θ - θ _s)]				θ _s - θ=AzInt + Bz			ln K(θ) =E(θ - θ _s) + F		
z	K _s	γ	θ _s [#]	z	Az	Bz	z	E	F
(m)	(x 10 ⁻⁶ m.s ⁻¹)		(m ³ .m ⁻³)	(m)			(m)		
0.01	2.7577	60.4422	0.4048	0.01	0.0165	0.1203	0.01	60.4422	-0.0073
0.02	5.5859	58.9348	0.4388	0.02	0.0170	0.1234	0.02	58.9348	0.6985
0.03	8.4808	57.5823	0.4611	0.03	0.0174	0.1263	0.03	57.5823	1.1161
0.04	11.1728	61.9150	0.4875	0.04	0.0162	0.1175	0.04	61.9150	1.3918
0.05	14.1956	55.1356	0.4813	0.05	0.0181	0.1319	0.05	55.1356	1.6312
0.06	16.5065	72.1201	0.5137	0.06	0.0139	0.1008	0.06	72.1201	1.7820
0.07	19.4186	57.2420	0.4919	0.07	0.0175	0.1271	0.07	57.2420	1.9445
0.08	22.1979	59.9814	0.5118	0.08	0.0167	0.1212	0.08	59.9814	2.0783
0.09	25.1427	56.5971	0.5375	0.09	0.0177	0.1285	0.09	56.5971	2.2028
0.10	28.2808	53.1187	0.5369	0.10	0.0188	0.1369	0.10	53.1187	2.3205
0.11	31.2174	56.7627	0.5238	0.11	0.0176	0.1281	0.11	56.7627	2.4192
0.12	34.3061	53.9548	0.5501	0.12	0.0185	0.1348	0.12	53.9548	2.5136
0.13	37.2641	56.3496	0.5477	0.13	0.0178	0.1291	0.13	56.3496	2.5963
0.14	40.2305	56.2039	0.5809	0.14	0.0178	0.1294	0.14	56.2039	2.6729
0.15	43.0122	59.9017	0.5660	0.15	0.0167	0.1214	0.15	59.9017	2.7398
0.16	46.1830	52.5765	0.5843	0.16	0.0190	0.1383	0.16	52.5765	2.8109
0.17	49.1988	55.2748	0.5628	0.17	0.0181	0.1316	0.17	55.2748	2.8741
0.18	52.2697	54.2385	0.5694	0.18	0.0184	0.1341	0.18	54.2385	2.9347
0.19	54.4947	74.9135	0.5669	0.19	0.0134	0.0971	0.19	74.9135	2.9764
0.20	57.5964	53.7785	0.5528	0.20	0.0186	0.1352	0.20	53.7785	3.0317

calculada para $t = 0,0007$ dia

Tabela 4.43b - Valores de K_s e γ obtidos do programa CONDHILS para o método de LIBARDI et al. (1980), considerando $\delta H/\delta z = -1$ e resultados das respectivas regressões lineares aplicadas aos dados de umidade θ na coluna de solo durante redistribuição da água.
Solo LRd - coluna A

$K(\theta)=K_s \exp[\gamma(\theta - \theta_s)]$				$\theta_s - \theta = A_z \ln t + B_z$			$\theta^* = a\theta + b$		
z (m)	K_s ($\times 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$)	γ	$\theta_s^{\#}$ ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$)	z (m)	A_z	B_z	z (m)	a	b
0.01	2.7577	60.4420	0.4048	0.01	0.0165	0.1203	0.01	1	0
0.02	5.5859	58.9349	0.4388	0.02	0.0170	0.1234	0.02	0.9875	-0.0115
0.03	8.4806	57.5820	0.4611	0.03	0.0174	0.1263	0.03	0.9766	-0.0154
0.04	11.1726	61.9149	0.4875	0.04	0.0162	0.1175	0.04	1.0375	-0.0577
0.05	14.1958	55.1356	0.4813	0.05	0.0181	0.1319	0.05	0.9392	0.0027
0.06	16.5062	72.1203	0.5137	0.06	0.0139	0.1008	0.06	1.1903	-0.1469
0.07	19.4188	57.2420	0.4919	0.07	0.0175	0.1271	0.07	0.9527	-0.0002
0.08	22.1978	59.9813	0.5118	0.08	0.0167	0.1212	0.08	0.9985	-0.0372
0.09	26.1416	56.5971	0.5375	0.09	0.0177	0.1285	0.09	0.9486	-0.0290
0.10	28.2808	53.1187	0.5369	0.10	0.0188	0.1369	0.10	0.9013	0.0026
0.11	31.2166	56.7626	0.5238	0.11	0.0176	0.1281	0.11	0.9664	-0.0163
0.12	34.3058	53.9548	0.5501	0.12	0.0185	0.1348	0.12	0.9254	-0.0141
0.13	37.2647	56.3496	0.5477	0.13	0.0178	0.1291	0.13	0.9691	-0.0318
0.14	40.2312	56.2038	0.5809	0.14	0.0178	0.1294	0.14	0.9690	-0.0580
0.15	43.0119	59.9017	0.5660	0.15	0.0167	0.1214	0.15	1.0305	-0.0744
0.16	46.1825	52.5764	0.5843	0.16	0.0190	0.1383	0.16	0.9105	-0.0184
0.17	49.1983	55.2747	0.5628	0.17	0.0181	0.1316	0.17	0.9597	-0.0236
0.18	52.2707	54.2387	0.5694	0.18	0.0184	0.1341	0.18	0.9450	-0.0186
0.19	54.4959	74.9137	0.5669	0.19	0.0134	0.0971	0.19	1.2891	-0.2089
0.20	57.5956	53.7784	0.5528	0.20	0.0186	0.1352	0.20	0.9291	0.0098

calculada para t= 0,0007 dia

Tabela 4.43c - Valores de K_s e γ obtidos do programa CONDHILS para o método de SISSON et al. (1980), considerando $\delta H/\delta z = -1$ e resultado da respectiva regressão linear aplicada aos dados de umidade θ na coluna de solo durante redistribuição da água.
Solo LRD - coluna A

$K(\theta)=K_s \exp[\gamma(\theta - \theta_s)]$			
z (m)	K_s ($\times 10^{-6}$ m.s ⁻¹)	γ	θ_s # (m ³ .m ⁻³)
0.01	2.7577	60.4422	0.4048
0.02	5.6566	58.9351	0.4388
0.03	8.6840	57.5821	0.4611
0.04	10.7688	61.9153	0.4875
0.05	15.1154	55.1356	0.4813
0.06	13.8666	72.1201	0.5137
0.07	20.3829	57.2420	0.4919
0.08	22.2318	59.9816	0.5118
0.09	26.5048	56.5969	0.5375
0.10	31.3793	53.1188	0.5369
0.11	32.3015	56.7628	0.5238
0.12	37.0708	53.9548	0.5501
0.13	38.4538	56.3496	0.5477
0.14	41.5196	56.2039	0.5809
0.15	41.7378	59.9016	0.5660
0.16	50.7247	52.5766	0.5843
0.17	51.2627	55.2746	0.5628
0.18	55.3130	54.2384	0.5694
0.19	42.2731	74.9135	0.5669
0.20	61.9894	53.7786	0.5528

calculada para t= 0,0007 dia

Tabela 4.44a - Valores de K_s e γ obtidos do programa CONDHILS para o método de HILLEL et al. (1972), considerando $\delta H/\delta z = -1$ e resultados das respectivas regressões lineares aplicadas aos dados de umidade θ na coluna de solo durante redistribuição da água.
Solo LRd - coluna C

$K(\theta)=K_s \exp[\gamma(\theta - \theta_s)]$				$\theta_s - \theta = A_z \ln t + B_z$			$\ln[K(\theta)] = E(\theta - \theta_s) + F$		
Z (m)	K_s ($\times 10^{-6} \text{ m.s}^{-1}$)	γ	θ_s # ($\text{m}^3.\text{m}^{-3}$)	Z (m)	A_z	B_z	Z (m)	E	F
0.01	2.5551	65.2346	0.4507	0.01	0.0153	0.1115	0.01	65.2346	-0.0836
0.02	5.2480	61.8972	0.4687	0.02	0.0162	0.1175	0.02	61.8972	0.6361
0.03	7.8306	64.5363	0.4804	0.03	0.0155	0.1127	0.03	64.5363	1.0363
0.04	10.2198	69.7667	0.4608	0.04	0.0143	0.1042	0.04	69.7667	1.3026
0.05	12.8667	62.9779	0.5071	0.05	0.0159	0.1155	0.05	62.9779	1.5329
0.06	14.8595	83.6353	0.4347	0.06	0.0120	0.0870	0.06	83.6353	1.6769
0.07	17.2506	69.7007	0.4944	0.07	0.0144	0.1043	0.07	69.7007	1.8261
0.08	19.6222	70.3074	0.5014	0.08	0.0142	0.1034	0.08	70.3074	1.9549
0.09	22.0419	68.8571	0.5117	0.09	0.0145	0.1056	0.09	68.8571	2.0712
0.10	24.2432	75.6908	0.4608	0.10	0.0132	0.0961	0.10	75.6908	2.1664
0.11	26.8146	64.8510	0.5195	0.11	0.0154	0.1121	0.11	64.8510	2.2672
0.12	29.7474	56.8312	0.5333	0.12	0.0176	0.1280	0.12	56.8312	2.3710
0.13	32.3196	64.7827	0.5046	0.13	0.0154	0.1123	0.13	64.7827	2.4539
0.14	34.1786	89.7240	0.4637	0.14	0.0112	0.0811	0.14	89.7240	2.5099
0.15	36.8250	62.9748	0.5268	0.15	0.0159	0.1155	0.15	62.9748	2.5845
0.16	39.5565	61.0262	0.5420	0.16	0.0164	0.1192	0.16	61.0262	2.6560
0.17	42.8720	50.2473	0.5658	0.17	0.0199	0.1447	0.17	50.2473	2.7365
0.18	45.4652	64.2924	0.4872	0.18	0.0156	0.1131	0.18	64.2924	2.7952
0.19	49.0158	46.9413	0.5897	0.19	0.0213	0.1549	0.19	46.9413	2.8704
0.20	51.7436	61.1676	0.5386	0.20	0.0164	0.1189	0.20	61.1676	2.9246

calculada para t= 0,0007 dia

Tabela 4.44b - Valores de K_s e γ obtidos do programa CONDHILS para o método de LIBARDI et al. (1980), considerando $\delta H/\delta z = -1$ e resultados das respectivas regressões lineares aplicadas aos dados de umidade θ na coluna de solo durante redistribuição da água.
 Solo LRd - coluna C

$K(\theta)=K_s \exp[\gamma(\theta - \theta_s)]$				$\theta_s - \theta=A_z \ln t + B_z$			$(\theta^*=a^0) + b$		
z (m)	K_s (x 10^{-6} m.s ⁻¹)	γ	θ_s # (m ³ .m ⁻³)	z (m)	A_z	B_z	z (m)	a	b
0.01	2.5551	65.2344	0.4507	0.01	0.0153	0.1115	0.01	1	0
0.02	5.2481	61.8971	0.4687	0.02	0.0162	0.1175	0.02	0.9745	0.0030
0.03	7.8306	64.5363	0.4804	0.03	0.0155	0.1127	0.03	1.0106	-0.0189
0.04	10.2198	69.7667	0.4608	0.04	0.0143	0.1042	0.04	1.0694	-0.0277
0.05	12.8667	62.9778	0.5071	0.05	0.0159	0.1155	0.05	0.9723	-0.0196
0.06	14.8590	83.6351	0.4347	0.06	0.0120	0.0870	0.06	1.2426	-0.0731
0.07	17.2508	69.7008	0.4944	0.07	0.0144	0.1043	0.07	1.0305	-0.0386
0.08	19.6213	70.3071	0.5014	0.08	0.0142	0.1034	0.08	1.0346	-0.0439
0.09	22.0418	68.8572	0.5117	0.09	0.0145	0.1056	0.09	1.0118	-0.0388
0.10	24.2444	75.6912	0.4608	0.10	0.0132	0.0961	0.10	1.1010	-0.0302
0.11	26.8145	64.8509	0.5195	0.11	0.0154	0.1121	0.11	0.9484	-0.0118
0.12	29.7473	56.8312	0.5333	0.12	0.0176	0.1280	0.12	0.8452	0.0346
0.13	32.3192	64.7829	0.5046	0.13	0.0154	0.1123	0.13	0.9663	-0.0008
0.14	34.1777	89.7238	0.4637	0.14	0.0112	0.0811	0.14	1.3141	-0.1242
0.15	36.8242	62.9747	0.5268	0.15	0.0159	0.1155	0.15	0.9275	-0.0007
0.16	39.5566	61.0261	0.5420	0.16	0.0164	0.1192	0.16	0.9052	0.0007
0.17	42.8734	50.2475	0.5658	0.17	0.0199	0.1447	0.17	0.7603	0.0655
0.18	45.4662	64.2925	0.4872	0.18	0.0156	0.1131	0.18	0.9743	0.0206
0.19	49.0165	46.9414	0.5897	0.19	0.0213	0.1549	0.19	0.7265	0.0717
0.20	51.7416	61.1673	0.5386	0.20	0.0164	0.1189	0.20	0.9494	-0.0093

calculada para t= 0,0007 dia

Tabela 4.44c - Valores de K_s e γ obtidos do programa CONDHILS para o método de SISSON et al. (1980), considerando $\delta H/\delta z = -1$ e resultado da respectiva regressão linear aplicada aos dados de umidade θ na coluna de solo durante redistribuição da água.
Solo LRd - coluna C

$K(\theta)=K_s \exp[\gamma(\theta - \theta_s)]$			
Z (m)	K_s (x 10 ⁻⁶ m.s ⁻¹)	γ	θ_s # (m ³ .m ⁻³)
0.01	2.5551	65.2345	0.4507
0.02	5.3858	61.8972	0.4887
0.03	7.7480	64.5361	0.4804
0.04	9.5563	69.7667	0.4608
0.05	13.2333	62.9778	0.5071
0.06	11.9577	83.6352	0.4347
0.07	16.7395	69.7008	0.4944
0.08	18.9667	70.3075	0.5014
0.09	21.7852	68.8573	0.5117
0.10	22.0198	75.6906	0.4608
0.11	28.2721	64.8509	0.5195
0.12	35.1947	56.8312	0.5333
0.13	33.4470	64.7827	0.5046
0.14	26.0077	89.7238	0.4637
0.15	39.7034	62.9751	0.5268
0.16	43.7014	61.0263	0.5420
0.17	56.3901	50.2473	0.5658
0.18	46.6640	64.2922	0.4872
0.19	67.4647	46.9413	0.5897
0.20	54.5026	61.1678	0.5386

calculada para t= 0,0007 dia

$\ln(z/t)=\ln(\gamma K_s) + \gamma(\theta - \theta_s)$			
Z (m)	$\ln(\gamma K_s)$	γ	
0.01	7.2724	65.2345	
0.02	7.9656	61.8972	
0.03	8.3710	64.5361	
0.04	8.6587	69.7667	
0.05	8.8818	62.9778	
0.06	9.0642	83.6352	
0.07	9.2183	69.7008	
0.08	9.3519	70.3075	
0.09	9.4696	68.8573	
0.10	9.5749	75.6906	
0.11	9.6703	64.8509	
0.12	9.7573	56.8312	
0.13	9.8373	64.7827	
0.14	9.9115	89.7238	
0.15	9.9805	62.9751	
0.16	10.0450	61.0263	
0.17	10.1056	50.2473	
0.18	10.1627	64.2922	
0.19	10.2168	46.9413	
0.20	10.2682	61.1678	

calculados pelo mesmo modelo para t muito pequeno ($t = 0,0007$ dia) uma vez que não houve possibilidade de medi-los diretamente. Independente do método utilizado para a determinação de K_s , para todas as colunas de solo, o valor saturado da condutividade hidráulica foi crescente em profundidade. Os valores de γ apresentaram comportamento decrescente na maioria das colunas de solo e somente para as colunas F e C do solo LVE, houve uma tendência de crescimento do valor de γ em função da profundidade. O fato dos três métodos se utilizarem dos modelos $K = K_s \exp \gamma(\theta - \theta_s)$ e $\theta_s - \theta = A \ln t + B$ (equação 2.34), leva a valores de γ iguais para os três métodos. Os valores de K_s passam a ser iguais para os métodos de HILLEL et al. (1972) e LIBARDI et al. (1980) e, para o método de SISSON et al. (1980) o valor de K_s passa a diferir dos outros métodos por um fator $\underline{a}$. Comparando as equações (2.47) do método de LIBARDI et al. (1980) com a equação (2.49) método de SISSON et al. (1980), verifica-se que há um parâmetro $\underline{a}$ que diferencia ambas as equações.

Os resultados crescentes de K_s em profundidade devem-se à adoção do gradiente unitário, o que já foi mostrado por REICHARDT (1993). As equações (2.46) do método de LIBARDI et al. (1980) e (2.49) do método de SISSON et al. (1980), mostram claramente uma solução em função da profundidade z . Esta é uma forte limitação destes métodos e objetivos de análise e discussão deste trabalho. Verificou-se que o aumento de K_s em profundidade é devido à utilização da umidade de saturação calculada a partir do modelo, para cada profundidade na coluna de solo.

Para melhor discutir a influência da adoção do gradiente unitário no aumento linear da condutividade hidráulica em função da profundidade, apresenta-se, a título de exemplo, os dados da tabela 4.45. Ela mostra resultados de K_s , γ calculados pelo método de LIBARDI et al. (1980) e a umidade de saturação medida em campo θ_s (sem ajuste do modelo $\ln t$) e a razão K_s / z , para experimento desenvolvido em paralelo, com sonda de

Tabela 4.45 - Resultados obtidos pelo método de LIBARDI et al.(1980) para K_s e γ com θ_s medido por sonda de nêutrons (dados obtidos de FALLEIROS et al., 1997).

Método de LIBARDI et al.(1980) - Umidade de saturação θ_s medida				
z (m)	K_s ($\times 10^{-7}$ m.s $^{-1}$)	γ	θ_s (m 3 .m $^{-3}$)	K_s/z ($\times 10^{-7}$ s $^{-1}$)
0,25	1210,869	378,372	0,3920	4843,5
0,50	6,777	530,367	0,4099	13,6
0,75	25,839	262,708	0,4096	34,4
1,00	183,917	201,337	0,4096	183,9
1,25	327,051	181,795	0,4098	261,6

Tabela 4.46 - Resultados obtidos pelo método de LIBARDI et al.(1980) para K_s e γ com θ_s calculado para $t= 60$ s (dados obtidos de FALLEIROS et al., 1997).

Método de LIBARDI et al.(1980) - Umidade de saturação θ_s p/t=60s				
z (m)	K_s ($\times 10^{-7}$ m.s $^{-1}$)	γ	θ_s (m 3 .m $^{-3}$)	K_s/z ($\times 10^{-7}$ s $^{-1}$)
0,25	107,028	378,372	0,3856	428,1
0,50	183,330	530,367	0,4170	366,7
0,75	335,691	262,708	0,4201	447,6
1,00	536,868	201,337	0,4150	536,9
1,25	760,239	181,795	0,4142	608,2

nêutrons, cujos detalhes encontram-se em FALLEIROS et al. (1997). As medidas de umidade foram realizadas nas profundidades de 0,25 a 1,25 m em passos de 0,25 m, em uma parcela situada na Fazenda Áreão na cidade de Piracicaba - SP. Os valores de K_s , não seguem o comportamento crescente em profundidade como os obtidos neste trabalho, mostrados nas tabelas 4.39 a 4.44, simplesmente pelo fato de não terem sido utilizados valores de θ_s do modelo, mas sim medidos no campo. A figura 4.30a mostra as curvas $\theta_s - \theta$ versus $\ln t$ determinadas para estes dados, onde as curvas foram extrapoladas para $\theta_s - \theta = 0$, tendo diferentes inclinações e fornecendo diferentes valores para $\theta_s - \theta = 0$. Nota-se que quanto maior a inclinação da curva, menor será o valor do parâmetro γ e isto está explicitamente mostrado nas equações (2.47) e (2.48) dos métodos de LIBARDI et al. (1980) e SISSON et al. (1980), respectivamente. Utilizando a umidade de saturação calculada para $t = 60$ s e aplicando o programa CONDHILS (PORTEZAN, 1994) determinaram-se, para este caso, os valores de K_s e γ mostrados na tabela 4.46, também para o método de LIBARDI et al. (1980). Comparando as tabelas 4.45 e 4.46 verifica-se que neste último cálculo ocorreram alterações nos valores K_s , ou seja, estão crescentes em todas as profundidades. Os valores de γ não sofreram modificações e a razão K_s / z apresenta-se estável. A figura 4.30b, mostra as curvas $\theta_s - \theta$ versus $\ln t$ para o caso de θ_s determinado pelo modelo. Comparando-a com a figura 4.30a, verifica-se que as curvas tiveram um rearranjo por ordem de inclinação crescente e, todas elas têm o mesmo valor de $\ln t$ para $\theta_s - \theta = 0$. As inclinações foram as mesmas obtidas na figura 4.30a, portanto têm-se os mesmos valores de γ . Quando no programa CONDHILS (PORTEZAN, 1994) são utilizados todos os dados de umidades obtidos pelo modelo da regressão linear $\theta = A^* \ln t + B^*$, ocorrem também resultados como indicados para os nossos dados que estão mostrados nas tabelas 4.39 a 4.44, ou seja, os valores de K_s dos métodos de HILLEL et al. (1972) e LIBARDI et al. (1980) diferem dos obtidos pelo método de

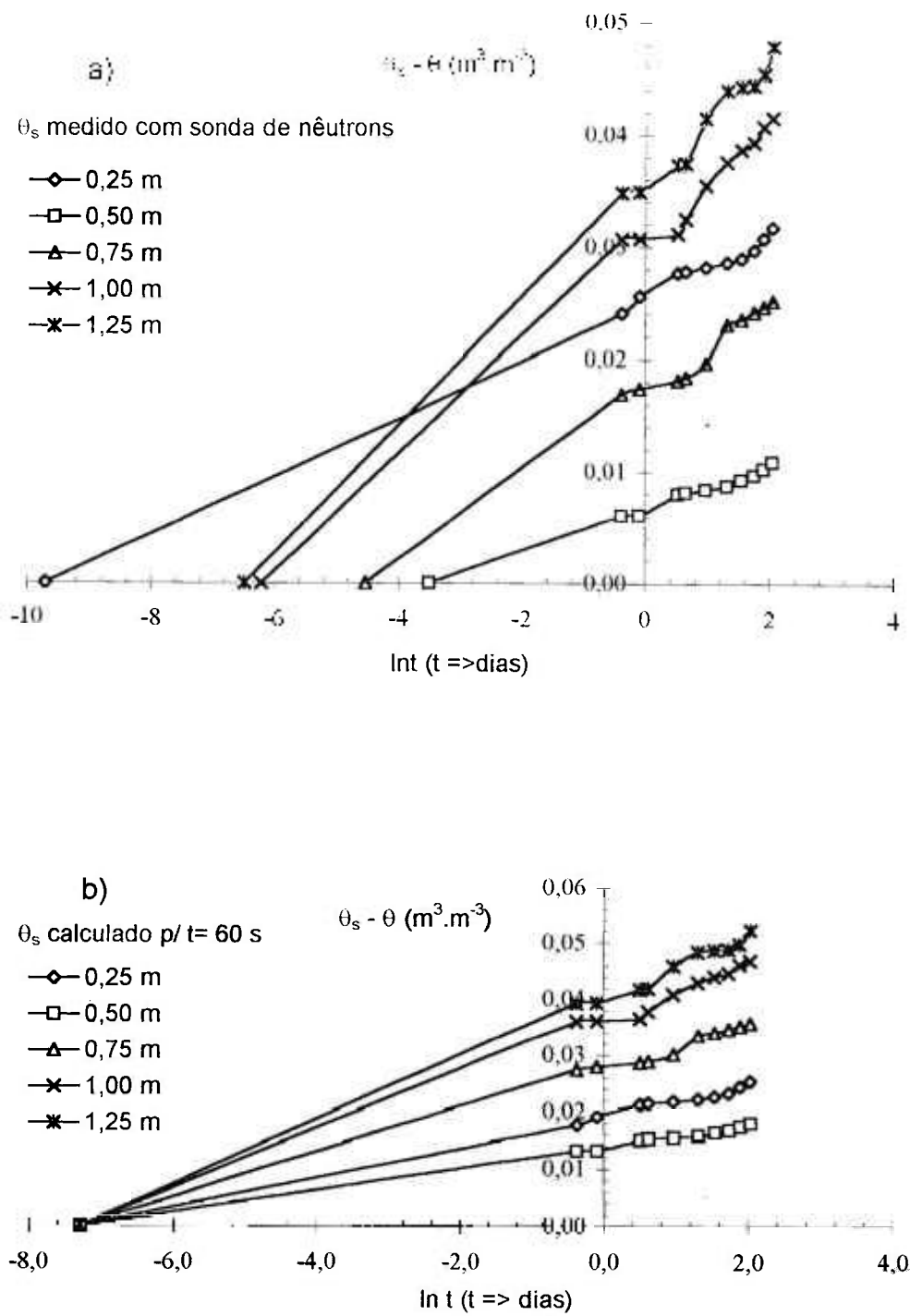


Figura 4.30: Curvas $\theta_s - \theta$ versus $\ln t$ para profundidades variando de 0,25 a 1,25 m: a) com θ_s medido com sonda de nêutrons e b) com θ_s calculado para $t = 60$ s.

SISSON et al. (1980) por um fator a , como já explicado acima.

As figuras 4.31 a 4.33, respectivamente, para os solos LVa (colunas B e E), LVE (colunas E e F) e LRd (colunas A e C) foram determinadas calculando $K(\theta)$ (equação 2.33) para uma umidade fixa, conforme indicado nestas figuras, para os métodos de HILLEL et al. (1972), LIBARDI et al. (1980) e SISSON et al. (1980). Verifica-se, de acordo com comentários anteriores, não há praticamente diferenças entre métodos nos resultados destas curvas. Os valores de K_s , γ e θ_s utilizados na equação (2.33) foram apresentados nas tabelas 4.39 a 4.44. Nota-se nas figuras, uma grande variabilidade da condutividade hidráulica em relação à profundidade na coluna de solo. A tabela 4.47 mostra o

Tabela 4.47 - Coeficiente de variação (CV) na condutividade hidráulica $K(\theta)$, determinado para as colunas de solo, de acordo com os resultados mostrados nas figuras 4.31 a 4.33.

Coeficiente de variação (%) em $K(\theta)$, para θ fixo.		
Solo	Coluna	CV(%)
LVa ($\theta = 0,28 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	A	120
	B	332
	C	132
	D	142
	E	94
	F	81
LVE ($\theta = 0,18 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	A	176
	B	121
	C	137
	D	107
	E	197
	F	339
LRd ($\theta = 0,38 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	A	267
	B	105
	C	162

CV (coeficiente de variação), que é neste caso a razão entre o desvio padrão da condutividade hidráulica pelo seu valor médio na coluna de solo. Este valor médio da condutividade hidráulica, foi determinado de acordo com os resultados obtidos, por exemplo, nas figuras 4.31 a 4.33. Verifica-se, portanto, na tabela 4.47, valores de CV variando de 81 a 332% para as colunas do solo LVa, de 107 a 339% para as colunas do solo LVE e de 162 a 267% para as do solo LRd. Estes resultados mostram que a alta sensibilidade de K para pequenas variações de θ , inerente ao modelo $K(\theta) = K_s \exp \gamma(\theta - \theta_s)$ e utilizado nos métodos de HILLEL et al. (1972), LIBARDI et al. (1980) e SISSON et al. (1980), leva a valores de $K(\theta)$ de alta variabilidade, mesmo para um solo homogêneo, no qual a condutividade hidráulica para uma umidade fixa teria que ser o mesmo para todas as profundidades. Para um solo homogêneo, é óbvio que se deve obter a mesma função $K(\theta)$ para cada profundidade do seu perfil, o que é discutido por REICHARDT (1993), quando analisa a adoção do gradiente unitário. Seria também responsável por este resultados de coeficientes de variação (CV) em $K(\theta)$ a consideração do gradiente unitário do potencial total (H) no processo de drenagem da água ? Esta hipótese não pode ser aqui verificada pela falta de dados medidos do gradiente. É sabido, porém, (BLACK et al., 1969 e DAVIDSON et al., 1969) que os gradientes de potencial desviam pouco da unidade, principalmente em solos homogêneos e que não poderia ser atribuída a eles esta alta variabilidade, mas sim ao fluxo de água, muito sensível à pequenas variações no arranjo poroso do solo.

Na equação (2.33), os parâmetros θ_s , γ e K_s são parâmetros de ajuste e no caso de θ_s ser o valor de θ para o solo, K_s passa a ter o significado físico de condutividade hidráulica saturada.

Todos os métodos para a determinação da condutividade hidráulica baseiam-se na equação de Darcy-Buckingham (equação 2.27), onde $K(\theta)$ é obtido da razão entre a densidade de fluxo de água e o gradiente do potencial total. A equação de Darcy-Buckingham, trabalha com grandezas

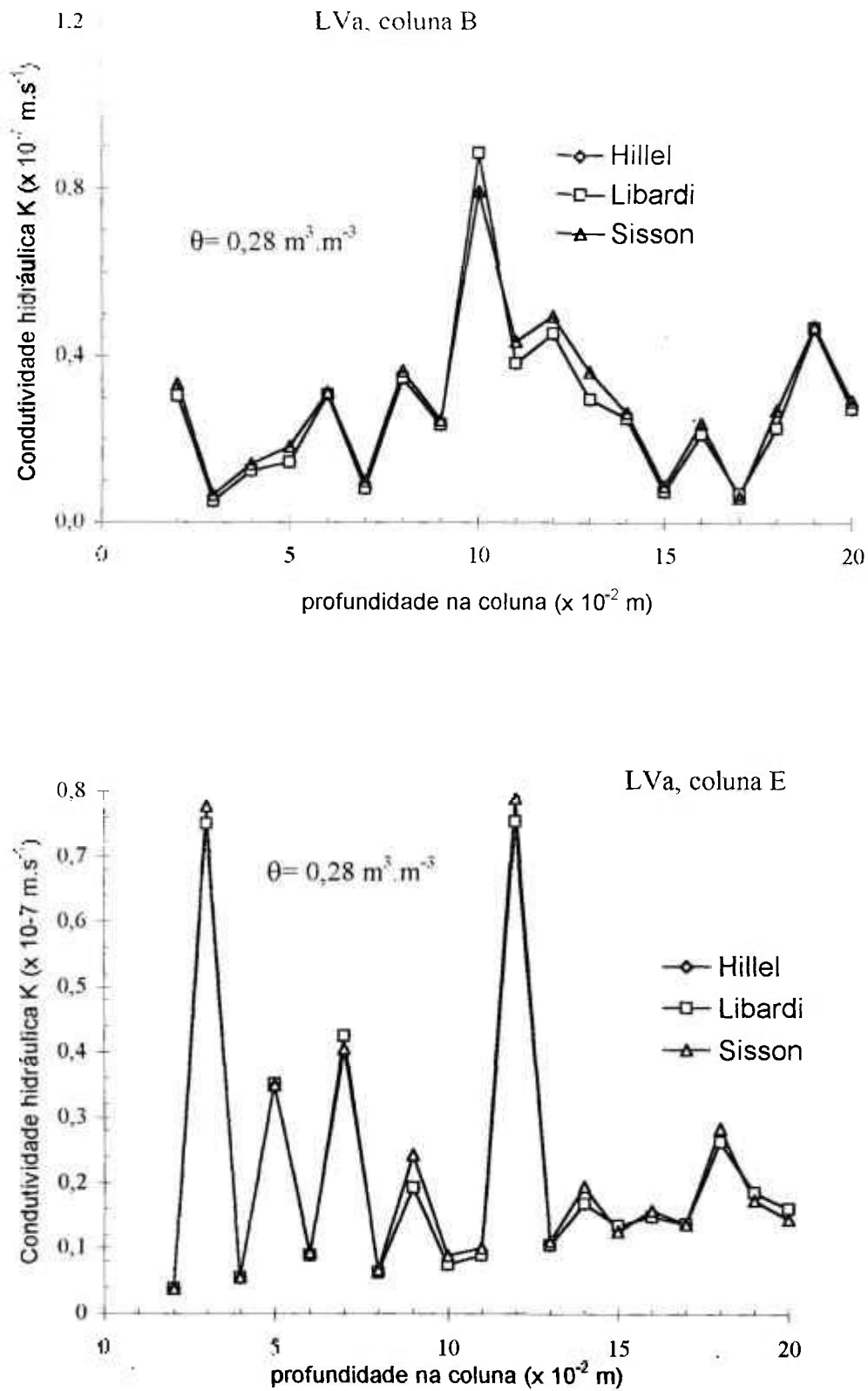


Figura 4.31: Condutividade hidráulica $K(\theta)$ calculada para $\theta=0,28 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ em função da profundidade nas colunas B (acima) e E (abaixo) do solo LVa.

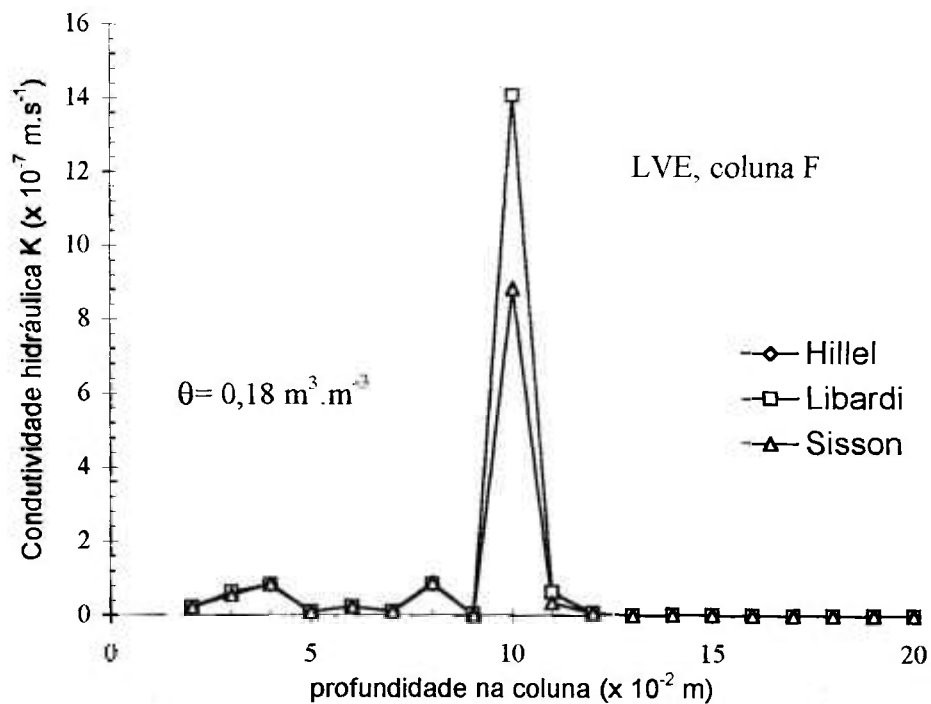
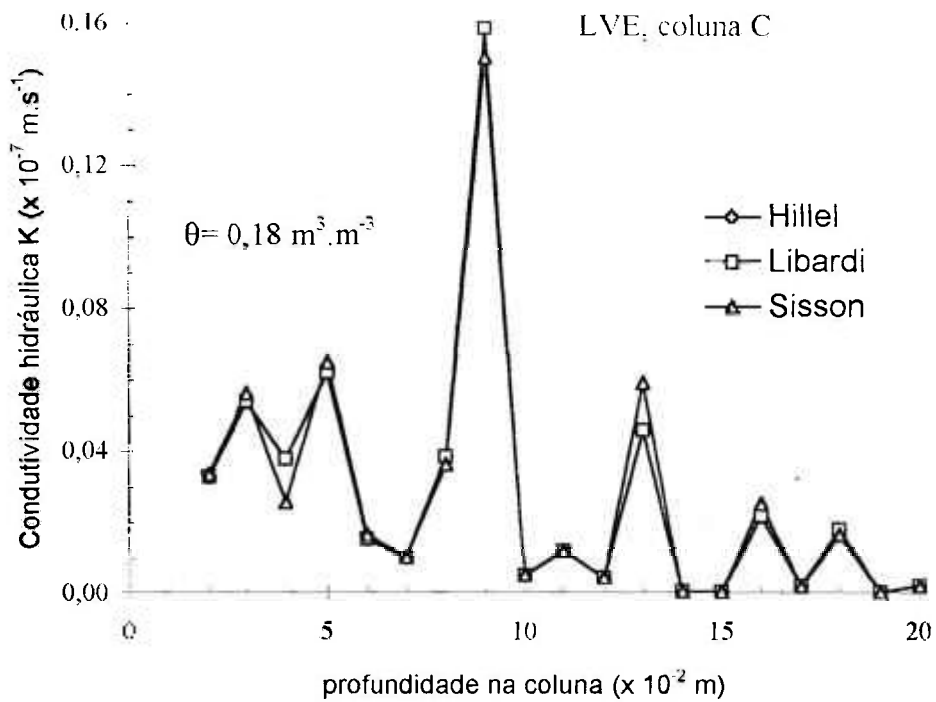


Figura 4.32: Condutividade hidráulica $K(\theta)$ calculada para $\theta = 0,18 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ em função da profundidade nas colunas C (acima) e F (abaixo) do solo LVE.

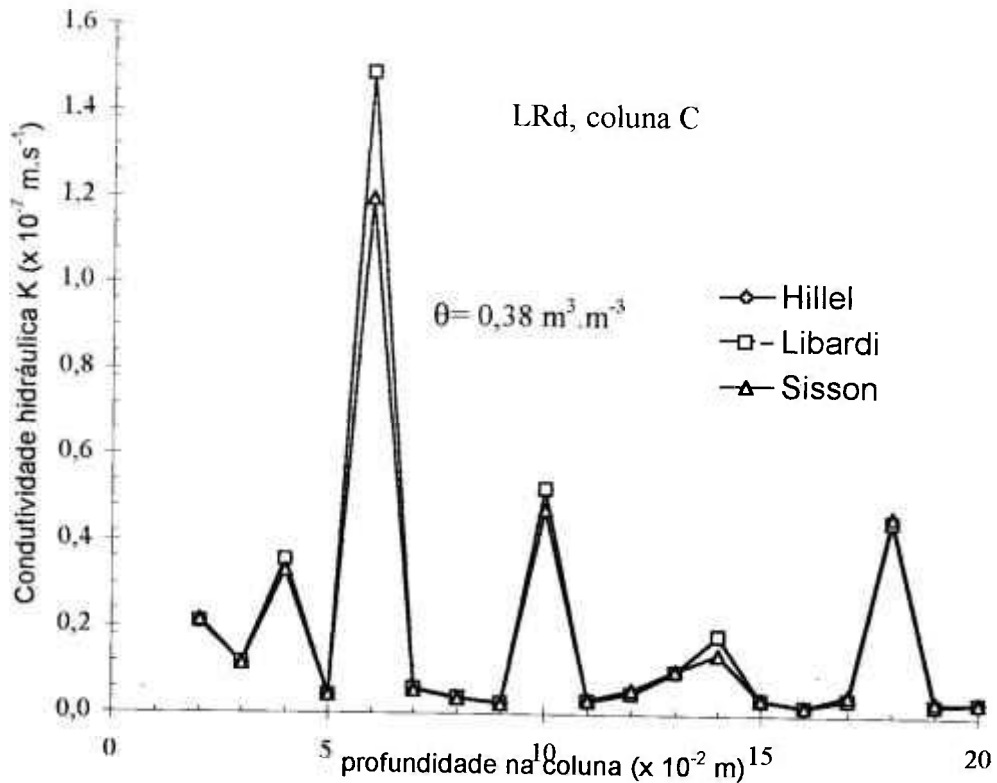
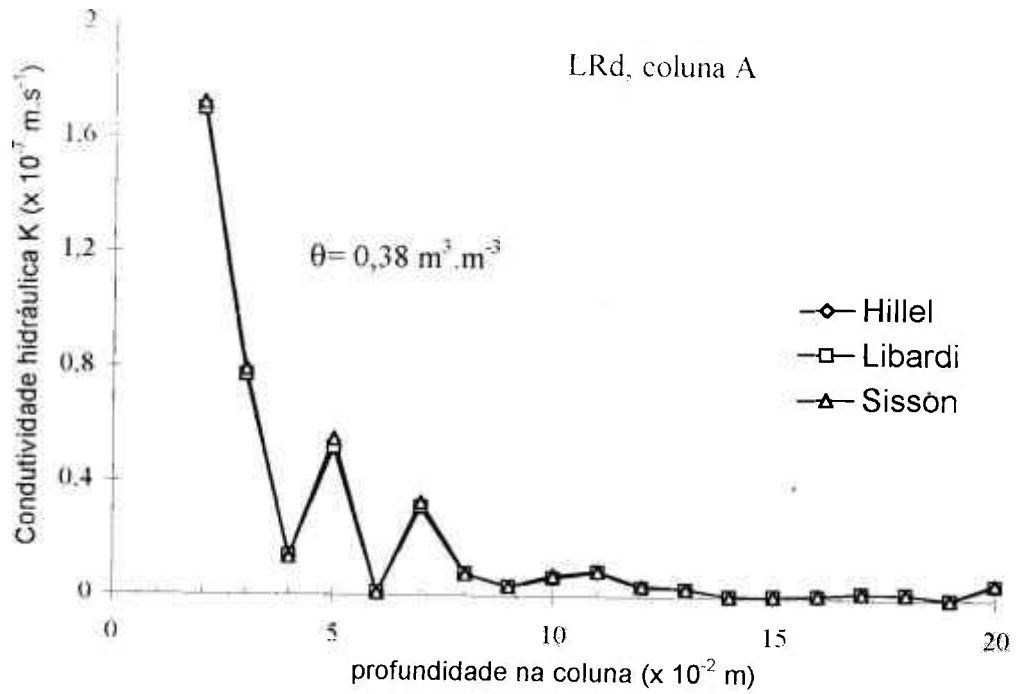


Figura 4.33: Condutividade hidráulica $K(\theta)$ calculada para $\theta = 0,38 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ em função da profundidade nas colunas A (acima) e C (abaixo) do solo LRd.

macroscópicas do solo, pois, para descrever um fluxo de água a nível microscópico, seria necessário conhecer o fluxo de água em cada poro do solo de diferentes formas geométricas e isso exigiria volumosos cálculos apenas para uma pequena amostra de solo. Desvios na equação de Darcy-Buckingham não são frequentemente observados e esta equação pode ser ainda considerada pelo menos, uma boa e adequada aproximação ao estudo do movimento da água no solo (KUTÍLEK & NIELSEN, 1994). DAVIDSON et al. (1969), mostraram que a drenagem da água em três solos estudados ocorre, aproximadamente igual para todas as profundidades e o potencial matricial h da água no solo é de certa forma constante com a profundidade, principalmente para os tempos iniciais da drenagem. Isto indica que $\partial h / \partial z \cong 0$ e $\partial H / \partial z = \partial (h - z) / \partial z \cong -1$, ou seja, gradiente unitário do potencial total (H) da água no solo e, segundo DAVIDSON et al. (1969) a condutividade hidráulica aumenta em profundidade. Segundo REICHARDT et al. (1997) a explicação para isso é que a umidade aumenta em profundidade. REICHARDT (1993), foi quem mostrou teoricamente que o gradiente unitário do potencial total não pode ocorrer em um perfil de solo homogêneo no qual há um processo de drenagem interna da água. A adoção da aproximação do gradiente unitário nos métodos de LIBARDI et al. (1980) e SISSON et al. (1980), torna estes métodos simples, podendo ser utilizados com rapidez e facilidade nos cálculos para a determinação de $K(\theta)$, porém com esta limitação em relação à profundidade. O método CGA (CHONG et al., 1981) também assume o gradiente unitário do potencial total (H), mas o modelo para a descrição da condutividade hidráulica é uma função potência da umidade θ . CHONG et al. (1981), em suas medidas de redistribuição da água em dois solos, realizadas em campo, encontraram gradientes do potencial total variando de 0,33 (tempos intermediários $\approx 0,07$ a 0,7 dia, dependendo do solo) a 2 (tempos longos ≈ 7 dias). Contudo mencionaram em seu trabalho que, o método simplificado proposto forneceu resultados satisfatórios para a condutividade hidráulica com os solos estudados, apesar da ocorrência de gradientes não unitários nas medidas realizadas em campo.

Os métodos para a determinação de $K(\theta)$, que assumem $\partial H / \partial z = -1$ nos processos de redistribuição da água no solo, são ainda bastante utilizados, mas segundo AHUJA et al. (1988), existem aspectos que precisam ser considerados, por exemplo, a aplicação destes métodos para solos bastante estratificados e para os horizontes superiores de um perfil de solo que são importantes para o desenvolvimento de uma cultura, pois são estes horizontes que controlam as taxas de infiltração de água para horizontes mais profundos. AHUJA et al. (1988), mostraram que gradientes do potencial total da água (H) variaram em função da profundidade e do tempo da drenagem interna, chegando a ser 2 a 5 vezes maiores ou menores que 1 (um). Além disso, as diferenças observadas entre as condutividades hidráulicas determinadas com gradiente medido e com gradiente unitário variaram por um fator de 3 a 6 vezes, principalmente, para os horizontes superiores dos solos sendo, o maior valor, quando se considerou $\partial H / \partial z \neq -1$, ou seja, gradiente não unitário do potencial total. Em nosso meio, FALLEIROS et al. (1997), encontraram diferenças de até 2 vezes entre as condutividades hidráulicas calculadas com gradiente medido e com gradiente unitário, para o solo estudado. Neste caso, estas diferenças não só ocorreram nas profundidades iniciais mas sim, em todas as profundidades medidas, que foram de 0,25 a 1,25 m, em passos de 0,25 m. Tais resultados podem estar relacionados com a estrutura do solo, que são arranjos complexos geométricos entre as partículas do solo e os poros.

A maior dificuldade do estudo da dinâmica da água no solo, está em determinar um modelo para a condutividade hidráulica. Os métodos de HILLEL et al. (1972), LIBARDI et al. (1980) e SISSON et al. (1980), utilizados neste trabalho, aplicam um modelo (equação 2.33) que é uma relação exponencial na umidade e o método CGA (CHONG et al., 1981) uma função potência na umidade, entre outros modelos já anteriormente desenvolvidos. A descrição matemática do fluxo de água em um perfil de solo não saturado é complicada, devido às incertezas na determinação da condutividade hidráulica $K(\theta)$. Medidas deste parâmetro são necessárias para a modelagem do

transporte da solução do solo (água do solo) e também de contaminantes (resíduos tóxicos, fertilizantes e etc.). KATUL et al. (1993), aplicaram a técnica matemática do “*state space*” para estimarem a função condutividade hidráulica utilizando, para isso, dados de umidade e potencial total, obtidos de um experimento de drenagem da água realizada em campo. Reescreveram a equação de Darcy-Buckingham, tornando-a dependente do armazenamento da água no solo, para a profundidade z . Desta forma, a função condutividade hidráulica ficou parametrizada com relação ao armazenamento e assim aplicaram o formalismo matemático do “*state space*” na equação de Darcy-Buckingham para encontrarem um modelo para a função condutividade da água. Processos iterativos de cálculos foram realizados, os quais objetivaram minimizar os erros das grandezas envolvidas e, portanto explicitar a variabilidade da função condutividade hidráulica que melhor explica o comportamento dos dados experimentais. Os autores utilizaram no trabalho uma função exponencial para a condutividade hidráulica, apesar de existirem na literatura modelos para K com diferentes graus de complexidade. Na tabela 4.48, estão apresentados os resultados dos parâmetros A e B obtidos pelos autores para a função condutividade hidráulica em função do armazenamento W , ou seja, $K(W) = A \exp(BW)$. Também compararam diversos métodos [FLUXO e LIBARDI (LIBARDI et al., 1980), CGA (CHONG et al., 1988)] através dos parâmetros A e B. Foi incluída na tabela, a diferença percentual destes parâmetros para cada método analisado. Nota-se que a maior discrepância ocorreu com o método CGA e, o método de LIBARDI foi o que apresentou a menor diferença percentual para com os resultados do “*state space*”. A figura 4.34, obtida por KATUL et al. (1993), mostra que todos os métodos utilizados, com exceção do método CGA, forneceram estimativas comparáveis dos parâmetros A e B e, que nos métodos do FLUXO (não mostrado nesta figura), de LIBARDI e CGA obtiveram valores altos de $K(\theta)$, maiores que o valor obtido pelo método do “*state space*”, especialmente para $\theta > 0,43 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$. Segundo os autores, tais diferenças podem ser atribuídas pela suposição do gradiente unitário do potencial total da água, durante o processo de drenagem. Portanto, neste caso, na região bastante úmida do solo os métodos do FLUXO, de LIBARDI

Tabela 4.48 - Parâmetros A e B da função condutividade hidráulica $K(W)=A \exp (BW)$, estimada para vários métodos e as respectivas diferenças percentuais (%) (extraída de KATUL et al. , 1993).

Método	A (m.s ⁻¹)	(%)	B (m ⁻¹)	(%)
State Space	1,43 x 10 ⁻¹⁵	-	162,5	-
Fluxo	1,80 x 10 ⁻¹⁶	695	186,5	15
Libardi	2,83 x 10 ⁻¹⁶	406	181,8	12
CGA	9,41 x 10 ⁻¹⁸	15.152	221,2	36

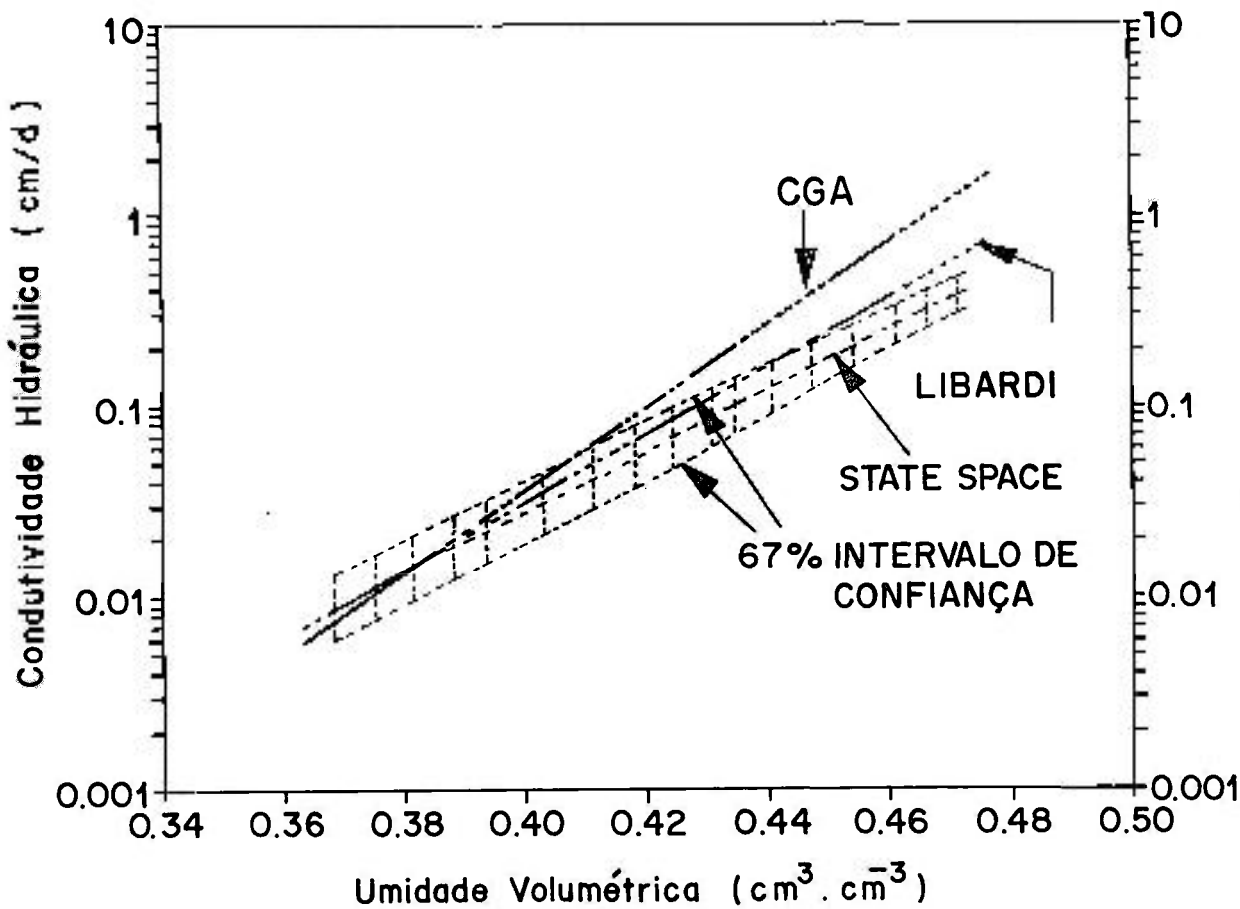


Figura 4.34: Condutividade hidráulica $K(\theta)$ estimada pelos métodos CGA, de Libardi e do *State Space*. O intervalo de confiança para o *State Space* é também mostrado (extraída de KATUL et al. , 1993).

e CGA falharam na quantificação de $K(\theta)$, principalmente neste intervalo de umidades sendo importante para a caracterização da dinâmica da água no solo.

Outra tendência que está ocorrendo na ciência do solo é a modelagem do solo através dos fractais, para descrição e relação da sua estrutura e propriedades hidráulicas. PERRIER et al. (1995), fizeram várias simulações, entre elas, da curva de retenção da água no solo e da condutividade hidráulica para um solo não saturado. Segundo os autores, o modelo virtual do solo utilizado, ainda precisa ser mais elaborado, mas conseguiram reproduzir a curva de retenção para um processo de secamento (drenagem) de um solo e, em relação à condutividade hidráulica, verificaram que foi fortemente afetada pelo modelo de estrutura do solo virtual, ou seja, a distribuição dos poros no modelo.

5 - CONCLUSÕES

A compactação de amostras de solo em colunas homogêneas a partir de terra fina seca ao ar (2 mm), que sirvam como repetições para estudos de dinâmica da água é inviável. A sensibilidade dos processos dinâmicos de movimento de água no solo à pequenas variações no arranjo poroso é a principal causa da dificuldade de construir colunas que sirvam como repetições. Como consequência, não foi possível utilizar curvas de retenção da água construídas com amostras de solo compactadas em cilindros volumétricos, por não representarem o arranjo poroso das colunas de solo, utilizadas para o estudo da condutividade hidráulica.

O método de LIBARDI et al. (1980) para solo homogêneo ($a=1$) e o método de SISSON et al. (1980), que também assume solo homogêneo, forneceram resultados bastante concordantes de condutividade hidráulica do solo, conforme já verificado, teoricamente, em BACCHI & REICHARDT (1993). Foram também encontrados resultados concordantes de condutividade hidráulica obtidos com o método de HILLEL et al. (1972), assumindo nos cálculos gradiente unitário do potencial total da água no solo, quando as variações de umidade do solo em função do tempo foram ajustadas ao modelo $\theta_s - \theta = A \ln t + B$. Devido à dificuldade mencionada acima, de construir amostras de solo homogêneo e reprodutíveis, os resultados de condutividade hidráulica foram apenas concordantes, indicando que as diferenças entre os métodos são significativamente menores que as diferenças entre repetições. Colunas de solo homogêneo mostraram uma grande variabilidade da condutividade hidráulica $K(\theta)$ em relação à profundidade, o que foi consequência da variabilidade do arranjo poroso em relação à profundidade, somada ao caráter exponencial das relações entre K e θ . Além disso, devido ao pequeno diâmetro do feixe de

radiação gama, a incidência do feixe de radiação, exatamente no mesmo ponto no solo em cada operação de medida, durante o período experimental, é muito difícil.

Como é sugerido teoricamente por REICHARDT (1993), a hipótese do gradiente unitário do potencial total da água para a determinação das condutividades hidráulicas, leva a relações $K(\theta)$ que indicam que valores de K para um mesmo θ , aumentam linearmente em profundidade, mesmo para o caso de solos homogêneos.

Na expressão $K = K_s \exp \gamma(\theta - \theta_s)$, os coeficientes θ_s e K_s são parâmetros de ajuste da relação $K(\theta)$ e infinitas combinações de θ_s e K_s fornecem a mesma relação $K(\theta)$. Apenas quando θ_s é a umidade de saturação, K_s assume significado físico e passa a ser uma estimativa da condutividade hidráulica saturada do solo. A medida de θ_s é, portanto, muito crítica na estimativa da condutividade hidráulica saturada do solo.

Para futuros trabalhos, é sugerido o uso de feixe duplo de radiações gama, com a definição precisa do diâmetro do colimador e da incidência do feixe. Comparar o método de HILLEL et al. (1972) sem considerar o gradiente unitário do potencial total da água no solo, com os de LIBARDI et al. (1980), SISSON et al. (1980) e KATUL et al. (1993).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 - AHUJA, L. R. ; BARNES, B. B. ; CASSEL, D. K.; BRUCE, R. R. ; NOFZIGER, D. L. Effect of assumed unit gradient during drainage on the determination of unsaturated hydraulic conductivity and infiltration parameters. **Soil Sci.** , v. 145, p. 235-243, 1978.
- 2 - APPOLONI, C. R. ; RIOS, E. A. Mass attenuation coefficients of brazilian soils in the range 10-1450 KeV. **Appl. Radiat. Isot.** , v. 45, p. 287-291, 1994.
- 3 - BACCHI, O. O. S. **Teoria dos fatores de escala na análise comparativa de métodos de determinação da condutividade hidráulica de um solo.** Piracicaba: 1988. Tese (Doutoramento) - Escola Superior de Agricultura "Luis de Queiroz".
- 4 - BERTUZZI, P. ; BRUCKER, L. ; GABILLY, Y. ; GANDU, J.G. Calibration, field testing, and error analysis of a gamma ray probe for in situ measurement of dry bulk density. **Soil Sci.** , v. 144, p. 425-436, 1987.
- 5 - BLACK, T. A. ; GARDNER, W. R. ; THURTELL, G.W. The prediction of evaporation, drainage, and soil water storage for a bare soil. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.** , v. 33, p. 655-660, 1969.

- 6 - BRIDGE, B. J. ; COLLIS-GEORGE, N. A dual source gamma ray traversing mechanism suitable for the non-destructive simultaneous measurement of bulk density and water content in columns of swelling soil. **Aust. J. Soil. Res.** , v. 11, p. 83-92, 1973.

- 7 - BRUCE, R. R. ; KLUTE, A. The measurement of soil moisture diffusivity. **Soil Sci. Am. Proc.** , v. 20, p. 458-462, 1956.

- 8 - BUCKINGHAM, E. **Studies on the movement of soil moisture.** Washington: USDA, 1907 (Bureau Soils Bulletin, 38).

- 10 - CAMPBELL, G. S. A simple method for determination unsaturated conductivity from moisture retention data. **Soil Sci.** , v. 117, p. 311-314, 1974.

- 11 - CAMPBELL, G. S. **Soil physics with basic developments in soil science.** New York, N.Y.: Elsevier Science Publishing, 1985.

- 12 - CAVALCANTE, L. F. **Determinação da condutividade hidráulica do solo durante a redistribuição de água.** Piracicaba: 1978. Dissertação (Mestrado) - Escola Superior de Agricultura "Luis de Queiroz".

- 13 - CHONG, S. K. ; GREEN, R. E. ; AHUJA, L. R. Simple in situ determination of hydraulic conductivity by power function descriptions of drainage. **Water Resour. Res.** , v. 17, p. 1109-1114, 1981.

- 14 - COPPOLA, M. ; REINIGER, P. Influence of the chemical composition on the gamma-ray attenuation by soils. **Soil Sci.** , v. 117, p. 331-335, 1974.
- 15 - COREY, J. C. ; PETERSON, S. F. ; WAKAT, M. A. Measurement of attenuation of ^{137}Cs and ^{241}Am gamma rays for soil density and water content determinations. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.** , v. 35, p. 215-219, 1971.
- 16 - CRESTANA, S. **A tomografia computadorizada como um novo método para estudo da física da água no solo.** São Carlos: 1985. Tese (Doutoramento) - Universidade de São Paulo.
- 17 - CRESTANA, S. ; MASCARENHAS, S. ; POZZI-MUCELLI, R. S. Using a computed miniscanner in soil science. **Soil Sci.** , v. 142, p. 52-61, 1986.
- 18 - DARCY, H. **Les fontaines publique de la Ville de Dijon.** Paris, Victor Dalmont, 1856.
- 19 - DAVIDSON, J. M. ; STONE, L. B. ; NIELSEN, D. R. ; LARUE, M. E. Field measurement and use of soil-water properties. **Water Resour. Res.** , v. 5, p. 1312-1321, 1969.
- 20 - DE VRIES, J. In situ determination of physical properties of the surface layer of field soils. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.** , v. 33, p. 349-353, 1969.

- 21 - DOURADO NETO, D. ; NIELSEN, D. R. ; HOPMANS, J. W. ; PARLANGE, M. B. **Soil water retention curve - SWRC**, Davis: University of California, 1995. (Programa de computador)
- 22 - EMBRAPA, **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro : Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, 1979.
- 23 - FALLEIROS, M. F. ; PORTEZAN, O. ; OLIVEIRA, J. C. M. ; BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K. Spatial and temporal variability of soil hydraulic conductivity in relation to soil water distribution, using an exponential model. **Soil Tech.** , 1997. (enviado para publicação)
- 24 - FARIA, R. T. ; BOISVERT, J. ; COSTA, A. C. S. ; MARUR, C. J. ; OKUYAMA, L. A. ; OLIVEIRA, D. **Utilização de técnicas de modelagem na estimativa da umidade do solo sob culturas anuais no estado do Paraná**. Londrina: IAPAR, 1993. (Boletim Técnico, 40)
- 25 - FERGUSON, H. ; GARDNER, W. H. Water content measurement in soil columns by gamma ray absorption. **Soil Sci. Soc. Proc.** , v. 5, p. 390-398, 1962.
- 26 - FERRAZ, E. S. B. ; MANSELL, R. S. **Determining water content and bulk density of soil by gamma ray attenuation methods**. Flórida: IFAS, 1979. (Technical Bulletin, 807).

- 27 - FRITTON, D. D. Resolving time, mass absorption coefficient and water content with gamma-ray attenuation. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.** , v. 33, p. 651-655, 1969.
- 28 - GARDNER, W. H. ; CALISSENDORFF, C. Gamma-ray and neutron attenuation in measurement of soil bulk density and water content. In: *Isotope and radiation techniques in soil physics and irrigation studies*. Vienna, IAEA, 1967. p.101-113 apud PHOGAT, V. K. ; AYLMORE, L. A. G. ; SCHULLER, R. D. Simultaneous measurement of the spatial distribution of soil water content and bulk density. **Soil Sci. Soc. Am. J.** , v. 55, p. 908-915, 1991.
- 29 - GARDNER, W. H. ; CAMPBELL, G. S. ; CALISSENDORFF, C. Systematic and random errors in dual gamma energy soil bulk density and water content measurements. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.** , v. 36, p. 393-398, 1972.
- 30 - GURR, C. G. Use of gamma rays in measuring water content and permeability in unsaturated columns of soils. **Soil Sci.** , v. 94, p. 224-229, 1962.
- 31 - HILLEL, D. ; KRENTOS, V. D. ; STYLIANOU, Y. Procedure and test of an internal drainage method for measuring soil hydraulic characteristics in situ. **Soil Sci.** , v. 114, p. 395-400, 1972.
- 32 - JONES, A. J. ; WAGENET, R. J. In situ estimation of hydraulic conductivity using simplified methods. **Water Resour. Res.** , v. 20, p. 1620-1626, 1984.

- 33 - KATUL, G. G. ; WENDROTH, O. ; PARLANGE, M. B. ; PUENTE, C. E. ; FOLEGATTI, M. V. ; NIELSEN, D. R. Estimation of in situ hydraulic conductivity function from nonlinear filtering theory. **Water Resour. Res.** , v. 29, p. 1063-1070, 1993.
- 34 - KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: relações solo-planta.** São Paulo, SP: Agronômica CERES, 1979.
- 35 - KLUTE, A. ; DIRKSEN, C. Hydraulic conductivity and diffusivity: laboratory methods. In: KLUTE, A. , ed. **Methods of soil analysis.** Baltimore, Md., Amer. Soc. Agron., 1986. v. 1, p. 687-734.
- 36 - KLUTE, A. The determination of the hydraulic conductivity and diffusivity of unsaturated soils. **Soil.Sci.** , v. 113, p. 264-276, 1972.
- 37 - KNOLL, G. F. **Radiation detection and measurement.** New York, N.Y., John Wiley, 1989.
- 38 - KUTÍLEK, MIROSLAV ; NIELSEN, D. R. **Soil hydrology.** Germany , Catena Verlag, 1994.
- 39 - LAX, P. D. The formation and decay of shock waves. *Am. Math. Monthly* , v. 79, p. 227-241, 1972 apud SISSON, J. B. ; FERGUSON, A. H. ; VAN GENUCHTEN, M. TH. Simple method for predicting drainage from field plots. **Soil Sci. Soc. Am. J.** , v. 44, p. 1147-1152, 1980.

- 40 - LIBARDI, P. L. ; REICHARDT, K. ; NIELSEN, D. R. ; BIGGAR, J. W. Simple field methods for estimating soil hydraulic conductivity. **Soil Sci. Soc. Am. J.** , v. 44, p. 3-7, 1980.
- 41 - LIBARDI, P. L. Dinâmica da água no solo. Piracicaba - SP, ESALQ/USP, 1995.
- 42 - LUO, X. ; WELLS, L. G. Evaluation of gamma ray attenuation for measuring soil bulk density. Part I. Laboratory investigation. **Trans. ASAE** , v. 35, p. 17-26, 1992.
- 43 - MANSELL, R. S. ; HAMMOND, L. C. ; McCURDY, R. M. Coincidence and interference corrections for dual-energy gamma ray measurements of soil density and water content. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.** , v. 37, p. 500-504, 1973.
- 44 - NOFZIGER, D. L. ; SWARTZENDRUBER, D. Material content of binary physical mixtures as measured with a dual-energy beam of gamma rays. **J. Appl. Phys.** , v. 45, p. 5443-5449, 1974.
- 45 - NOFZIGER, D. L. Errors in gamma-ray measurement of water content and bulk density in nonuniform soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.** , v. 42, p. 845-850, 1978.

- 46 - OLIVEIRA, J. C. M. **Determinação de parâmetros do solo durante a infiltração horizontal e redistribuição da água por atenuação de raios gama e tensiometria.** Piracicaba: 1991. Tese (Doutoramento) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura.
- 47 - PAULETTO, E. A. ; LIBARDI, P. L. ; MANFRON, P. A. ; MORAES, S. O. Determinação da condutividade hidráulica de solos a partir da curva de retenção de água. **Rev. Bras. Ciência Solo**, v. 12, p. 189-195, 1988.
- 48 - PERRIER, E. ; MULLON, C. ; RIEU, M. ; MARSILY, G. Computer construction of fractal soil structures: simulation of their hydraulic and shrinkage properties. **Water Resour. Res.** , v. 31, p. 2927-2943, 1995.
- 49 - PHOGAT, V. K. ; AYLMORE, L. A. G. ; SCHULLER, R. D. Simultaneous measurement of the spatial distribution of soil water content and bulk density. **Soil Sci. Soc. Am. J.** , v. 55, p. 908-915, 1991.
- 50 - PORTEZAN, O. **Condutividade hidráulica para os métodos de Hillel, Libardi e Sisson - CONDHILS.** Londrina: Universidade Estadual de Londrina, 1994. (Programa de computador)
- 51 - RAWITZ, E. ; ETKIN, H. ; HAZAN, A. Calibration and field testing of a two-probe gamma gauge. **Soil Sci. Soc. Am. J.** , v. 46, p. 461-465, 1982.
- 52 - REGINATO, R. J. ; JACKSON, R. D. Field measurement of soil-water content by gamma ray transmission for temperature fluctuations. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.** , v. 35, p. 529-533, 1971.

- 53 - REGINATO, R. J. ; VAN BAVEL, C. H. M. Soil water measurement with gamma attenuation. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.** , v. 28, p. 721-724, 1964.
- 54 - REGINATO, R. J. Gamma radiation measurements of bulk density changes in a soil pedon following irrigation. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.** , v. 38, p. 24-29, 1974.
- 55 - REICHARDT, K. **Uso da radiação gama na determinação da umidade e densidade do solo.** Piracicaba: 1965. Tese (Doutoramento) - Escola Superior de Agricultura "Luis de Queiros".
- 56 - REICHARDT, K. Unit gradient in internal drainage experiments for the determination of soil hydraulic conductivity. **Sci. agric.** , v. 50, p. 151-153, 1993.
- 57 - REICHARDT, K. ; PORTEZAN, O. ; LIBARDI, P. L. ; BACCHI, O. O. S. ; MORAES, S. O. ; OLIVEIRA, J. C. M. ; FALLEIROS, M. C. Critical analysis of the field determination and use of soil hydraulic conductivity functions. **Soil Tech.** , 1997. (enviado para publicação)
- 58 - RICHARDS, L. A. **Capillary conduction of liquid through porous media.** Physics, v. 1 , p. 318-333, 1931.
- 59 - ROGOWSKY, A. S. ; Estimation of the soil moisture characteristic and hydraulic conductivity: comparision of models. **Soil Sci.** , v. 114, p. 423-429, 1972.

- 60 - SANZ, A. T. **Instrumentación nuclear**. Madrid, J.E.N., 1970.
- 61 - SISSON, J. B. ; FERGUSON, A. H. ; VAN GENUCHTEN, M. TH. Simple method for predicting drainage from field plots. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 44, p. 1147-1152, 1980.
- 62 - SOUZA, A. D. B. ; SAITO, H. ; APPOLONI, C. R. ; COIMBRA, M. M. ; PARREIRA, P. S. Medida dos parâmetros da infiltração vertical e redistribuição da água nos solos LRd e LEa por transmissão de raios gama. In: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA NUCLEAR. **Energia Nuclear: anais do 1º encontro nacional de aplicações nucleares realizado em Recife, 27 a 30 maio, 1991**. v. 2, p. 29-42.
- 63 - STROOSNIJDER, L. ; DE SWART, J. G. Column scanning with simultaneous use of ^{241}Am and ^{137}Cs gamma radiation. **Soil Sci.**, v. 118, p. 61-69, 1974.
- 64 - SWARTZENDRUBER, D. The flow of water in unsaturated soils. In: DE WIEST, J. R. M., ed. **Flow through porous media**. New York, N.Y., Academic, 1969, p. 215-292.
- 65 - VAN BAVEL, C. H. M. Soil densitometry by gamma transmission. **Soil Sci.**, v. 87, p. 50-58, 1959.
- 66 - VAN BAVEL, C. H. M. ; LASCANO, R. J. ; BAKER, J. M. Calibration two-probe gamma gauge densitometers. **Soil Sci.**, v. 140, p. 393-395, 1985.

- 67 - VAN GENUCHTEN, M. TH. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.** , v. 44, p. 892-898, 1980.
- 68 - VAZ, C. M. P. ; OLIVEIRA, J. C. M. ; REICHARDT, K. ; CRESTANA, S. ; CRUVINEL, P. E. ; BACCHI, O. O. S. Soil mechanical analysis through gamma ray attenuation. **Soil Tech.** , v. 5, p. 319-325, 1992.
- 69 - WELLS, L. G. ; LUO, X. Evaluation of gamma ray attenuation for measuring soil bulk density. Part II. Field investigation. **Trans. ASAE** , v. 35, p. 27-32, 1992.
- 70 - WÖSTEN, J. H. M. ; VAN GENUCHTEN, M. TH. Using texture and other soil properties to predict the unsaturated soil hydraulic functions. **Soil Sci. Soc. Am. J.** , v. 52, p. 1762-1770, 1988.
- 71 - ZEVALLOS, A. C. **Caracterização físico-hídrica de um latossolo vermelho amarelo - fase arenosa (Haplustox)**. Piracicaba: 1978. Tese (Doutoramento) - Escola Superior de Agricultura "Luis de Queiroz".