TRINCHEIRAS DE INFILTRAÇÃO COMO TECNOLOGIA ALTERNATIVA EM DRENAGEM URBANA: MODELAGEM EXPERIMENTAL E NUMÉRICA

Melissa Cristina Pereira Graciosa

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Hidráulica e Sanitária.

ORIENTADOR:

Prof. Dr. Eduardo Mario Mendiando

São Carlos

2005

DEDALUS - Acervo - EESC

31100052277

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheira **MELISSA CRISTINA PEREIRA GRACIOSA**

Dissertação defendida e julgada em 17-06-2005 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Dr. **EDUARDO MARIO MENDIONDO (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADA

Prof. Titular **FAZAL HUSSAIN CHAUDHRY**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

APROVADA

Prof. Dr. **JOEL AVRUCH GOLDENFUM**
(Universidade Federal do Rio Grande do Sul/UFRGS)

APROVADA

Profª. Titular **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia (Hidráulica e Saneamento) e
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Ao Paulo Roberto. Por ter sido meu primeiro incentivador e, ainda que em memória, sua presença em minha vida me impulsionar sempre em frente. Obrigada, pai.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, por este trabalho, primeiramente, a *Deus*. Por ser a origem de toda a ciência e de mim própria; por se fazer presente em cada momento de minha vida, e por ter me dado absolutamente tudo o que foi preciso para chegar até aqui.

Ao *Rodrigo Roque*, pelo companheirismo e incentivo, pelas horas boas e más, e por ter feito parte desta e de toda a minha história.

À *minha família*, por todo o apoio e incentivo, especialmente à minha irmã Aline, pela colaboração na etapa final de redação.

Ao *professor Fazal Hussain Chaudhry* pela orientação, por ter me ensinado o que eu sei sobre ciência, e por ter me proporcionado um modelo de disciplina, ética e profissionalismo, que eu pretendo seguir durante toda a minha carreira;

Ao *amigo Fazal*, por todo o incentivo, amizade, pelas conversas, pelo apoio nas horas difíceis, especialmente naquelas em que pensei em desistir, e por me dar um exemplo de vida e humanidade, no qual eu quero me espelhar ao longo de toda esta jornada;

Ao *professor Eduardo Mario Mendiondo*, por ter assumido, com responsabilidade e dedicação, a orientação deste trabalho, quando da aposentadoria de nosso amigo Fazal, me acompanhando até a sua conclusão.

Às *amigas Liliane Albertin e Adelena Maia*, pelo apoio nas dificuldades, por me ensinar a extrair delas aprendizado e crescimento; pelo exemplo de perseverança e fé, e também por me proporcionar bons momentos de amizade e companheirismo;

Ao *amigo Cristiano Almeida*, pelo auxílio na etapa de simulação numérica; pelo modelo de dedicação e esforço; e por ter, através do seu exemplo de postura profissional, me fortalecido na certeza de que, em ciência, compartilhar o conhecimento auxilia quem recebe, mas, sobretudo, engrandece quem doa;

Ao *Físico Walter Siqueira Paes*, do Serviço de Engenharia de Segurança e Medicina do Trabalho da USP, por todo o auxílio prestado nas questões relacionadas à sonda de nêutrons, sem a qual não seria possível o trabalho de campo, e por fazer a "ponte" que liga nós, engenheiros de campo, aos conceitos da Física e da proteção radiológica.

Ao *amigo Walter*, por tudo. Pelas conversas, pela dedicação, por me mostrar que "pode ser mais simples", por me conhecer tão bem e me ajudar a lidar com as situações limite por que passei, e por ter enfim, me ajudado a fechar este ciclo.

A todos os *meus amigos e colegas de departamento: Marcelo "Minduim", Fernando Colombo, Luciana Peixoto, Roberta Bonini, Fernando Braga, Zé Eduardo Alamy, Alexandre Kepler, Klebber Formiga, J. Eduardo Quaresma* e tantos outros que, em várias ocasiões, sempre estiveram prontos a me prestar auxílio, confirmando, que todos dependemos uns dos outros, e que é essa constante troca que nos faz crescer como pessoas e profissionais;

Aos *professores* do Departamento de Hidráulica e Saneamento, *Rodrigo de Melo Porto, Harry Edmar Schulz, Edson Wendland, Luiza Fernanda Ribeiro Reis e outros*, que, com empenho e dedicação, se prontificaram a me ajudar em diferentes e importantes ocasiões;

Ao *professor e amigo Swami Marcondes Vilela*, pela amizade e oportunidades de crescimento profissional que me proporcionou;

À *professora, Silvia Claudia Semensato Povinelli*, pelo incentivo e apoio ao meu ingresso no meio acadêmico, quando ainda estava na graduação;

Ao *professor Ademir Pacelli Barbassa*, da UFSCar, pelo incentivo e sugestões;

Ao *professor Rubem La Laina Porto*, da Escola Politécnica, por participar da avaliação do trabalho, incorporando importantes sugestões e ensinamentos sobre drenagem urbana;

Aos *professores Orencio Vilar e Lazaro Zuquetti*, do Departamento de Geotecnia da EESC, que disponibilizaram as instalações de seus laboratórios, possibilitando os ensaios de solos;

Ao *professor Paulo Leonel Libardi*, da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz da USP, por todos os ensinamentos sobre Física dos Solos e trabalhos de campo;

Ao *professor Manuel Tabuada*, do Departamento de Engenharia Rural da Universidade Técnica de Lisboa, por ter disponibilizado seu modelo computacional para sulcos de irrigação, e participado do processo de adaptação do programa para as trincheiras de infiltração;

Ao *professor Jackson Röhrig*, do Institut für Technologie in den Tropen, da Fachhochschule Köln, pela ótima recepção que tive na Alemanha, e por ter disponibilizado suas instalações e recursos para o meu aprimoramento acadêmico, sobretudo na área de simulação numérica;

Ao *Departamento de Pavimentação* da Escola Politécnica e ao *Instituto de Geociências*, pelos equipamentos de campo cedidos;

A *todos os técnicos do Departamento de Geotecnia*, especialmente ao *Oscar*, pela prestatividade e dedicação em me auxiliar na condução dos ensaios;

Aos *técnicos* do Departamento de Hidráulica e Saneamento, que contribuíram para a execução dos trabalhos de campo, especialmente ao *Roberto Maramark*, o "*Betão do Broa*", pelas exaustivas e descontraídas horas de campo em que trabalhamos juntos;

Às *funcionárias* do Departamento de Hidráulica e Saneamento, *Sá, Pavi, Rose, Raquel, Flavia, Fernanda, Cecília, Marcia e Valderez*, com cuja dedicação sempre pude contar para solucionar as diversas situações cotidianas do trabalho acadêmico;

À *Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP*, pelo financiamento deste projeto.

Ao *CT-HIDRO-FINEP / EESC/USP / FIPAI / DAEE-SP*, pelo convênio "Experimento Piloto de Gerenciamento Integrado de Bacias Urbanas para o Plano Diretor de São Carlos".

SUMÁRIO

Lista de figuras	x
Lista de tabelas	xiii
Lista de abreviaturas e siglas	xiv
Lista de símbolos	xv
Lista de variáveis do modelo computacional	xviii
Resumo	xx
Abstract	xxi
1 Introdução	1
2 Objetivos	3
3 Revisão Bibliográfica	4
3.1. Histórico e panorama atual da drenagem urbana	4
3.2. Tecnologias alternativas em drenagem urbana	8
3.3. Sistemas de infiltração	14
3.3.1. Exemplos de aplicação e simulação de infiltração	20
3.3.2. Planejamento de sistemas de infiltração	24
3.3.3. Dimensionamento de estruturas de infiltração	27
3.4. Dinâmica da água no solo	30
3.4.1. Condutividade hidráulica	31
3.4.2. Potencial total da água no solo	32
3.4.2.1. Potencial de pressão	33
3.4.2.2. Potencial pneumático	33
3.4.2.3. Potencial de temperatura	34
3.4.2.4. Potencial gravitacional	35
3.4.2.5. Potencial osmótico	35
3.4.2.6. Potencial mátrico	36
3.4.3. Curva de retenção	36
Modelo de Brooks e Corey	36
Modelo de Van Genuchten	37
Modelo de Fredlund	37
Fenômeno de histerese	37

3.5. Modelos de infiltração.....	38
3.5.1. Equação de Green & Ampt.....	39
3.5.2. Equação de Kostiakov.....	39
3.5.3. Equação de Horton.....	40
3.5.4. Equação de Philip.....	40
3.5.5. Equação de Richards'.....	41
4. Metodologia.....	45
4.1. Trabalho experimental.....	45
4.1.1. Escolha e classificação dos solos.....	45
4.1.1. Caracterização dos solos.....	46
4.1.2.1. Determinação da curva de retenção.....	46
4.1.2.2. Determinação da condutividade hidráulica saturada.....	53
4.1.2. Equipamentos de campo.....	55
Sonda de nêutrons.....	55
Calibração da sonda de nêutrons.....	57
Contagem padrão da sonda de nêutrons.....	59
Proteção radiológica no uso da sonda de nêutrons.....	59
Tensiômetros.....	61
4.1.3. Determinação da condutividade hidráulica não saturada.....	62
4.1.4. Ensaios com trincheiras experimentais.....	64
Transdutores de pressão.....	65
Instalações experimentais.....	66
Condução dos ensaios e processamento dos dados.....	69
4.2. Modelagem numérica.....	71
4.2.1. Simulação numérica - procedimento.....	79
5. Resultados e discussões.....	80
5.1. Caracterização dos solos.....	80
5.1.1. Análise granulométrica conjunta.....	80
5.1.2. Curva de retenção.....	81
5.1.3. Condutividade hidráulica saturada.....	84
5.1.4. Calibração da sonda de nêutrons.....	86

5.1.5. Condutividade hidráulica não saturada.....	88
5.2. Ensaio com trincheiras de infiltração.....	95
5.3. Simulação numérica	109
6. Modelo computacional - estrutura e manual de instruções	136
6.1. Introdução.....	136
6.2. Estrutura do programa	137
6.3. Arquivos de saída	142
6.4. Informações necessárias para a simulação da infiltração em trincheiras	143
6.4.1. Curva de retenção do solo	143
6.4.2. Condutividade hidráulica não saturada	143
6.4.3. Condições iniciais de umidade	143
6.5. Alimentação do modelo	144
6.5.1. Variáveis de entrada	144
6.6. Geração dos arquivos de entrada	145
6.7. Geração dos arquivos de saída	147
7. Dimensionamento de trincheiras de infiltração	149
7.1. Volume de projeto.....	150
7.2. Volume infiltrado	151
7.2.1. Método A – Baseado no modelo horizontal de Philip.....	151
7.2.2. Método B – Baseado no modelo bidimensional de Richards’	152
7.3. Volume efetivo de armazenamento.....	152
7.4. Exemplo de dimensionamento para os solos 1 e 2.....	153
7.5. Estimativa de custos de implantação.....	154
8. Estimativa da redução do escoamento superficial em uma micro bacia pelo uso de trincheiras de infiltração	155
9. Conclusões e recomendações	162
9.1. Escolha de dois solos de propriedades hidráulicas distintas e realização de ensaios de campo e laboratório para sua caracterização	162
9.2. Realização de experimentos de infiltração em trincheiras para quantificar a variação do volume infiltrado e do desenvolvimento do campo de umidade ...	163
9.3. Modelagem do fenômeno bidimensional de infiltração em torno de trincheiras	

e comparação entre os resultados experimentais e numéricos	164
9.4. Proposta de uma metodologia de dimensionamento de trincheiras	165
9.5. Estimativa simplificada da redução no hidrograma da bacia proporcionada pelo uso de trincheiras de infiltração	166
10. Referências bibliográficas	167
ANEXO I - Relatório de análise de segurança radiológica.....	171
ANEXO II - Registros na Comissão Nacional de Energia Nuclear	183
ANEXO III - Código fonte do modelo de infiltração	186

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Efeitos da urbanização sobre a distribuição das águas na bacia hidrográfica	5
Figura 3.2 - Aumento da vazão dos rios Tamanduateí e Tietê, na RMSP	7
Figura 3.3 - Fases da degradação da drenagem natural	7
Figura 3.4 - Esquema de funcionamento de um piscinão “off line”	11
Figura 3.5 - Esquema de funcionamento de um reservatório de retenção no lote	13
Figura 3.6 - Esquema de pavimento poroso	15
Figura 3.7 - Exemplos de modelos de trincheiras de infiltração	16
Figura 3.8 - Exemplo de trabalho conjunto entre vala gramada de percolação e trincheira subterrânea de infiltração	18
Figura 3.9 - Proposta de sistema de trincheiras de infiltração implantado em loteamentos	19
Figura 3.10 - Sistema de gerenciamento de águas de chuva implantado em Figtree Place, New Castle, Australia	22
Figura 3.11 - Hidrogramas de entrada dos sistemas de infiltração on-line e off-line	29
Figura 3.12 - Exemplo da influência dos processos de secagem e umedecimento na forma da curva de retenção	37
Figura 4.1 - Bloco de solo indeformado, envolto em parafina e preso por chapas de metal	46
Figura 4.2 - Bloco sem parafina	46
Figura 4.3 - Retirada da amostra cilíndrica	47
Figura 4.4 - Processo de saturação das amostras de solo.....	47
Figura 4.5 - Esquema da câmara de pressão de Richards	48
Figura 4.6 - Câmara de pressão de Richards'	49
Figura 4.7 - Câmaras de pressão conectadas a um sistema de injeção e medição de pressão.....	49
Figura 4.8 - Tela de inicialização do CurvaRet	50
Figura 4.9 - Tela de entrada de dados do CurvaRet	50
Figura 4.10 - Tela de saída de dados do CurvaRet.....	51
Figura 4.11 - Ambiente de trabalho do Systat.....	51
Figura 4.12 - Tela de inserção do modelo no Systat	52
Figura 4.13 - Tela de saída de dados do Systat	52
Figura 4.14 - Permeâmetro de carga constante	53
Figura 4.15 - Esquema de funcionamento da sonda de nêutrons	55
Figura 4.16 - Sonda de nêutrons utilizada neste trabalho	56
Figura 4.17 - Monitoramento das doses de radiação com detector Geiger-Muller.....	60
Figura 4.18 - Ensaio de condutividade hidráulica em campo.....	62
Figura 4.19 - Esquema de funcionamento do sistema de transdutores	64
Figura 4.20 - Transdutor de pressão e amplificador de sinais.....	65
Figura 4.21 - Tela do software da placa de aquisição de dados do sistema de transdutores	65

Figura 4.22 - Esquema da instalação experimental.....	67
Figura 4.23 - Trincheira experimental - Solo 2.....	68
Figura 4.24 - Esquema do sulco de irrigação.....	73
Figura 4.25 - Esquema da trincheira de infiltração.....	73
Figura 4.26 - Discretização do domínio para a solução do sulco de irrigação.....	73
Figura 4.27 - Discretização do domínio para a solução da trincheira de infiltração.....	74
Figura 4.28 - Fluxograma do modelo BidiSul.....	77
Figura 5.1 - Curva granulométrica do Solo 1.....	79
Figura 5.2 - Curva granulométrica do Solo 2.....	80
Figura 5.3 - Curva de retenção do Solo 1.....	81
Figura 5.4 - Curva de retenção do Solo 2.....	82
Figura 5.5 - Curva de retenção do Solo 2 - escalonada.....	82
Figura 5.6 - Curva de retenção do Solo 2 - escalonada.....	83
Figura 5.7 - Calibração da sonda de nêutrons.....	86
Figura 5.8 - Perfis de umidade volumétrica do Solo 1, ao longo de 15 dias de irrigação, até $z=1,50$. ..	88
Figura 5.9 - Perfis de umidade volumétrica do Solo 2, ao longo de 15 dias de irrigação, até $z=1,50$. ..	88
Figura 5.10 - $\theta_0 - \theta$ versus $\ln t$ para o Solo 1.....	89
Figura 5.11 - $\theta_0 - \theta$ versus $\ln t$ para o Solo 2.....	90
Figura 5.12 - $\bar{\theta}_0 - \bar{\theta}$ versus $\ln t$ para o Solo 1.....	91
Figura 5.13 - $\bar{\theta}_0 - \bar{\theta}$ versus $\ln t$ para o Solo 2.....	92
Figura 5.14 - Ajuste dos dados de infiltração ao modelo de infiltração horizontal de Philip - Solo 1.....	97
Figura 5.15 - Ajuste dos dados de infiltração ao modelo de infiltração horizontal de Philip - Solo 2.....	97
Figura 5.16 - Volumes de entrada, armazenamento e infiltração - Solo 1.....	98
Figura 5.17 - Volumes de entrada, armazenamento e infiltração - Solo 2.....	98
Figura 5.18 - Perfil de umidade observado - Solo 1.....	100
Figura 5.19 - Perfil de umidade observado - Solo 2.....	102
Figura 5.20 - Campo de umidade interpolado.....	104
Figura 5.21 - Arquivo de entrada da simulação A para o Solo 1 - valores iniciais de h	109
Figura 5.22 - Arquivo de entrada da simulação A para o Solo 1 - dados de entrada.....	109
Figura 5.23 - Arquivo de entrada da simulação A para o Solo 2 - valores iniciais de h	110
Figura 5.24 - Arquivo de entrada da simulação A para o Solo 2 - valores iniciais de h	110
Figura 5.25 - Evolução do nível d'água na trincheira Solo 1 - simulados e observados.....	113
Figura 5.26 - Evolução do nível d'água na trincheira Solo 1 - simulados e observados.....	114
Figura 5.27 - Simulação A - Solo 1 - Perfil de umidade simulado.....	115
Figura 5.28 - Simulação A - Solo 2 - Perfil de umidade simulado.....	118
Figura 5.29 - Arquivo com os valores iniciais de h para a simulação B - Solo 1.....	122
Figura 5.30 - Arquivo com os valores iniciais de h para a simulação B - Solo 2.....	122

Figura 5.31 - Evolução do nível d'água na trincheira, Solo 1, Simulações A e B.....	126
Figura 5.32 - Evolução do nível d'água na trincheira, Solo 2, Simulações A e B.....	126
Figura 5.23 - Simulação B - Solo 1 - Perfil de umidade simulado	128
Figura 5.24 - Simulação B - Solo 2 - Perfil de umidade simulado	131
Figura 6.1 - Arquivo de entrada com os valores iniciais de sucção matricial	145
Figura 6.2 - Arquivo de dados com as variáveis de entrada do modelo	145
Figura 6.3 - Exemplo de arquivo de saída – SoilMoist.dat	146
Figura 6.4 - Exemplo de arquivo de saída – WaterLevel.dat	147
Figura 8.1 - Esquema representativo do escoamento superficial em uma microbacia urbana.....	155

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Condições de contorno do modelo de infiltração bidimensional	75
Tabela 5.1 - Composição granulométrica e índices físicos dos solos 1 e 2.....	80
Tabela 5.2 - Resultados do ajuste da curva de retenção modelo de Van Genuchten.....	81
Tabela 5.3 - Ensaio de condutividade hidráulica saturada para o Solo 1	84
Tabela 5.4 - Ensaio de condutividade hidráulica saturada para o Solo 2	85
Tabela 5.5 - Parâmetros da equação de condutividade hidráulica não saturada	93
Tabela 5.6 - Variação do volume na trincheira durante a alimentação e recessão - Solo 1	95
Tabela 5.7 - Variação do volume na trincheira durante a alimentação e recessão - Solo 2	96
Tabela 5.8 - Ajuste do modelo de infiltração horizontal de Philip para os Solos 1 e 2.....	96
Tabela 5.9 - Acompanhamento da redistribuição - Solo 1 - Valores de umidade.....	99
Tabela 5.10 - Acompanhamento da redistribuição - Solo 2 - Valores de umidade.....	100
Tabela 5.11 - Fases de alimentação e recessão: Simulação A - valores de lâmina d'água e volume infiltrado, simulados e observados, Solos 1 e 2	111
Tabela 5.12 - Fases de alimentação e recessão: Simulação B - valores de lâmina d'água e volume infiltrado, Solos 1 e 2.....	123
Tabela 7.1 - Estimativa de custos diretos de implantação de uma trincheira de infiltração.....	153
Tabela 8.1 - Valores do coeficiente de escoamento superficial C adotados pela Prefeitura Municipal de São Paulo.....	156
Tabela 8.2 - Valores do coeficiente k (SCS, 1975).....	157

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	-	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BIDISUL	-	Sulcos Bidimensionais de Infiltração
CNEN	-	Comissão Nacional de Energia Nuclear
CRHEA	-	Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada
EESC	-	Escola de Engenharia de São Carlos
ESALQ	-	Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz
FAPESP	-	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
IDF	-	Intensidade Duração Frequência
NBR	-	Norma Brasileira Registrada
PVC	-	Poli Cloreto de Vinila
SCS	-	Soil Conservation Service
USP	-	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

a	-	Parâmetro de ajuste da curva idf
A_l	-	Área Lateral da trincheira de infiltração, m^2
A_{ij}	-	Coeficiente de linearização da equação do modelo de infiltração
A_{inf}	-	Área efetiva de infiltração, m^2
b	-	Parâmetro de ajuste da curva idf
B	-	Largura da trincheira, m
c	-	Parâmetro de ajuste da curva idf
C	-	Sortividade, parâmetro de ajuste da Equação de Philip
C	-	Contagem da sonda de nêutrons
C_p	-	Contagem padrão da sonda de nêutrons
g	-	Aceleração da gravidade, m/s^2
G_{ij}	-	Coeficiente de linearização da equação do modelo de infiltração
h	-	Profundidade da trincheira, m
H	-	Deslocamento da coluna de mercúrio, mm
h_c	-	Distância entre o nível de mercúrio, na cuba, e a superfície do solo, m
H_0	-	Potencial de pressão constante na superfície do solo, mH ₂ O
H_f	-	Potencial mátrico constante na frente de molhamento, mH ₂ O
i	-	Intensidade de precipitação, mm/h
i	-	Taxa de infiltração, $m^3/s.m^2$
I	-	Infiltração acumulada até o instante t , m^3/m^2
i_i	-	Taxa de infiltração em $t=0$, $m^3/s.m^2$
i_f	-	Taxa de infiltração constante em $t \rightarrow \infty$, $m^3/s.m^2$
k_f	-	Fator de forma da bacia hidrográfica, m/m
$k(\theta)$	-	Condutividade hidráulica não saturada, m/s
K	-	Condutividade hidráulica saturada, m/s
l	-	Comprimento da trincheira, m
L	-	Comprimento da coluna saturada, m
m	-	Coeficiente de ajuste da equação de Van Genuchten
m_a	-	Massa de água, g

m_c	-	Massa da cápsula, g
m_s	-	Massa de solo, g
n	-	Coefficiente de ajuste da equação de Van Genuchten
q	-	Densidade de fluxo, m/s
q_a	-	Vazão de descarga específica, $m^3/s.m^2$
q_{fr}	-	Taxa média de infiltração, m/s
Q_{fr}	-	Vazão de infiltração, m^3/s
Q_{out}	-	Vazão vertida, m^3/s
q_p	-	Vazão de pico do hidrograma unitário, m^3/s
P	-	Pressão externa atuante na fase sólidos-água-ar no solo, $kg/m.s^2$
P_0	-	Pressão atuante na fase estado padrão, $kg/m.s^2$
P_{ar}	-	Pressão de ar na fase sólidos-água-ar, $kg/m.s^2$
P_{ar0}	-	Pressão de ar na fase estado padrão, $kg/m.s^2$
P_{osm}	-	Pressão osmótica, $kg/m.s^2$
P_l	-	Pressão de líquido, $kg/m.s^2$
P_{atm}	-	Pressão atmosférica, $kg/m.s^2$
t	-	Tempo de precipitação, minutos
t	-	Tempo, s
T	-	Período de retorno, anos
T	-	Temperatura da fase sólidos-água-ar no solo, $^{\circ}C$
T_0	-	Temperatura da fase estado padrão, $^{\circ}C$
t_e	-	Tempo de esvaziamento, min
t_p	-	Tempo para atingir o pico do hidrograma, min
U	-	Umidade gravimétrica, g/g
V	-	Volume do sistema, m^3
V_{acf}	-	Volume efetivo de armazenamento, m^3
V, V_s	-	Volume útil de armazenamento, m^3
V_{af}	-	Volume afluente, m^3
V_{ef}	-	Volume efluente, m^3
V_p	-	Volume de projeto, m^3

V_{prec}	-	Volume de água precipitado sobre a área de contribuição, no intervalo de tempo considerado, m^3
V_{inf}	-	Volume de água infiltrado, no intervalo de tempo considerado, m^3
V_t	-	Volume de armazenamento da trincheira, m^3
z	-	Distância entre a superfície do solo e o centro da cápsula porosa do tensiômetro
Z	-	Distância vertical, em relação a um dado referencial, da fase sólidos-água-ar
Z_0	-	Distância vertical, em relação a um dado referencial, da fase estado padrão
α	-	Parâmetro de ajuste da equação de Van Genuchten
Δh	-	Diferença de carga total, mH_2O
ϕ	-	Porosidade da brita, %
ϕ_g	-	Potencial gravitacional da água no solo, cmH_2O
ϕ_m	-	Potencial mátrico da água no solo, cmH_2O
ϕ_{ma}	-	Potencial mátrico que corresponde à entrada de ar, cmH_2O
ϕ_{mr}	-	Potencial mátrico que corresponde à umidade volumétrica residual, em cmH_2O ;
ϕ_n	-	Potencial pneumático da água no solo, cmH_2O
ϕ_o	-	Potencial osmótico da água no solo, cmH_2O
ϕ_p	-	Potencial de pressão da água no solo, cmH_2O
ϕ_t	-	Potencial total da água no solo, cmH_2O
ϕ_T	-	Potencial de temperatura da água no solo, cmH_2O
γ	-	Parâmetro da equação que define a função matemática para $k(\theta)$
γ_w	-	Peso específico da água, kg/m^3
μ_a	-	Potencial químico da água no solo, J/m^3
θ	-	Umidade volumétrica, cm^3/cm^3 ;
θ_0	-	Umidade volumétrica inicial, cm^3/cm^3
θ_r	-	Umidade volumétrica residual, cm^3/cm^3
θ_s	-	Umidade volumétrica de saturação, cm^3/cm^3
ρ_a	-	Densidade da água, 1000 kg/m^3
ρ_{Hg}	-	Densidade do mercúrio, 13600 kg/m^3
ρ_r	-	Densidade aparente, ou densidade relativa do solo, g/cm^3
v	-	Volume específico de armazenamento, m^3

LISTA DE VARIÁVEIS DO MODELO COMPUTACIONAL

AIJ(i,j)	-	Coefficiente de linearização da equação do modelo
ACTIV	-	Diferença de potencial para ativar o aumento do perfil
ALFA	-	Parâmetro da equação de Van Genuchten
BIJ(i,j)	-	Coefficiente de linearização da equação do modelo
BETA	-	Coefficiente n da equação de Van Genuchten
BETA11	-	Coefficiente m da equação de Van Genuchten
C(i,j)	-	Derivada da função de umidade volumétrica em relação ao tempo
CANG	-	Tangente do ângulo de inclinação do talude da trincheira
DELTAT	-	Discretização do tempo, segundos
DELTAX	-	Discretização do espaço na direção horizontal, cm
DELTAZ	-	Discretização do espaço na direção vertical, cm
DIJ(i,j)	-	Coefficiente de linearização da equação do modelo
EIJ(i,j)	-	Coefficiente de linearização da equação do modelo
FIJ(i,j)	-	Coefficiente de linearização da equação do modelo
H(i,j)	-	Potencial mátrico, cmH ₂ O
HM(i,j)	-	Matriz de incidência
H1(i)	-	Vetor com as incógnitas
HI(i,j)	-	Potencial mátrico inicial, cmH ₂ O
HTEMPALI	-	Altura da lâmina d'água durante o tempo de alimentação, cm
INCR	-	Incremento de linhas do perfil
KAPA(i,j)	-	Condutividade hidráulica, cm/s
LAG	-	Altura da lâmina d'água, cm
LCOMP	-	Comprimento da trincheira, cm
NCS	-	Número de colunas à superfície
NCF	-	Número de colunas no fundo da trincheira
NLS	-	Número de linhas da trincheira
NLSCA	-	Número de linhas da trincheira com água
NLSSA	-	Número de linhas da trincheira sem água
NTC	-	Número total de colunas
NTL	-	Número total de linhas

NVEZES	-	Número de vezes para aumentar o perfil
NZDREN	-	Profundidade de drenagem, cm
NPN1	-	Número de linhas da matriz de incidência
NPN2	-	Número de colunas da matriz de incidência
Q	-	Vazão fornecida à trincheira, cm^3/s
T	-	Tempo decorrido desde o início da simulação, s
TEMPO	-	Intervalo de tempo para o traçado das equipotenciais, s
TTREG	-	Tempo total de irrigação, s
TETA(i,j)	-	Umidade volumétrica, cm^3/cm^3
TETAI(i,j)	-	Umidade volumétrica inicial, cm^3/cm^3
TETAR(i,j)	-	Umidade volumétrica residual, cm^3/cm^3
TETAS(i,j)	-	Umidade volumétrica de saturação, cm^3/cm^3
VOL1	-	Volume total infiltrado, cm^3

RESUMO

A infiltração das águas de chuva dentro dos lotes urbanos é uma possível forma de promover o controle descentralizado do escoamento superficial na origem, com vistas ao gerenciamento das águas pluviais urbanas e conseqüente atenuação das cheias. Neste trabalho, foram conduzidos ensaios de campo com trincheiras de infiltração, em dois solos distintos, um arenoso e outro argiloso, com o objetivo de avaliar quantitativamente o comportamento hidráulico das estruturas de infiltração em resposta a volumes de escoamento. As trincheiras foram alimentadas com volumes de água controlados, e o campo de umidade do experimento foi monitorado com sonda de nêutrons, durante o processo de redistribuição da água no solo. Foi realizada a modelagem matemática do fenômeno bidimensional de infiltração em torno de trincheiras de seção retangular, em resposta à entrada de águas pluviais provenientes de áreas impermeabilizadas contíguas. A comparação entre os resultados experimentais e simulados pela equação bidimensional de Richards' indica uma pequena defasagem dos valores de volume infiltrado e umidade do solo nos processos de infiltração e drenagem interna simulados em relação aos observados. A capacidade de infiltração da trincheira mostrou-se maior nos dados observados, possivelmente devido à simplificação de distribuição unimodal dos diâmetros dos poros adotada na modelagem numérica, uma vez que, experimentalmente, observou-se multimodalidade nos dois solos estudados. A curva de van Genuchten é, juntamente com a equação de Richards', a base do modelo computacional, e divergências no seu ajuste em relação aos dados observados podem conduzir a pequenas divergências dos volumes infiltrados e perfis de umidade ao longo do processo de infiltração simulado, em relação ao observado. São apresentadas algumas considerações de dimensionamento sobre a implantação de trincheiras de infiltração em lotes residenciais, bem como discussões com respeito aos planos diretores urbanos. É apresentado um estudo simplificado, baseado no método racional, sobre a redução no hidrograma de cheia proporcionada pelo uso de trincheiras em uma micro bacia urbana, o qual revelou reduções da ordem de até 94% do deflúvio superficial direto gerado pelo lote.

Palavras-chave

Trincheiras de infiltração; controle do escoamento superficial na origem; ensaios de infiltração; gerenciamento de águas pluviais urbanas; sistemas descentralizados de drenagem urbana, plano diretor de drenagem urbana.

ABSTRACT

Stormwater infiltration process at the scale of housing is a possible way to promote the decentralized runoff control in order to manage the urban water and to attenuate flood peaks. In this work, field essays with infiltration devices at two different soils, either sandy and clay-loam soils, are assessed in order to study the hydraulic behavior of infiltration trenches to attenuate incoming runoff volume inputs. The infiltration trench experiments set a controlled water supply for specific boundary conditions, and the experimental moisture field were monitored with neutron probe during the water redistribution process at soil core. Bi-dimensional (2D) mathematical modeling is depicted at specific boundary conditions with a rectangular-trench layout, thereby mimicking a potential situation of runoff incoming from adjacent impervious areas. The comparison between experimental and numerical results, simulated by two-dimensional Richards' Equation, shows a small lag-time difference of both infiltrated volumes and soil moisture contents during infiltration and drainage periods. The trench infiltration capacity of observed data appears to be greater than simulated results, possibly due to an overall simplification of a uni-modal, homogeneous pore diameter distribution adopted by the modeling scheme. Experimental retention curves outline indirect evidences of multi-modal, heterogeneous behavior of pore structure. Bon van *Genuchten*-type retention curve and *Richards*-momentum equations represent the baseline approach to the computational model of non-saturated soils. Some fitting discrepancies between observed and simulated results could lead to negligible different estimations of infiltrated volumes and moisture profiles. Finally, further discussions on project design and best management practices (BMPs) of infiltration trenches at housing scale as well discussions on Urban Master Plan are outlined herewith. A simplified study, based on rational method, is presented on the reduction of incoming hydrograph with the use of infiltration trenches. Preliminary results perform volume reductions of approximately 94% from incoming runoff generated at housing lots.

Key-words

Infiltration trenches; source control of the runoff; field infiltration experiments; urban rainwater management and control; decentralized urban drainage systems; urban stormwater planning.

1. INTRODUÇÃO

O problema das cheias urbanas vem sendo tratado com frequência como um dos principais desafios a serem vencidos pela Engenharia atual, tendo em vista os inúmeros transtornos causados à população dos municípios atingidos por enchentes periódicas.

A princípio, o que determina a propensão de uma bacia hidrográfica à ocorrência de enchentes é o seu fator de forma k_f , expresso pela relação entre a largura média e o comprimento da bacia. Quanto menor o valor de k_f , maior a propensão ao armazenamento de águas pluviais, ou seja, bacias de forma achatada tendem a acumular mais água que as de geometria longa e estreita.

No entanto, com o processo de urbanização, especialmente quando este ocorre sem o planejamento adequado, surgem novos fatores que influenciam a ocorrência de enchentes. O principal deles é a impermeabilização das áreas por pavimentos, pátios e telhados. Sem a atenuação, a interceptação e a infiltração do escoamento proporcionados pela cobertura vegetal, aumentam os volumes de cheia e vazões de pico do hidrograma da bacia. Com a continuidade do processo de ocupação desordenada de toda a área da bacia, e, principalmente, das baixadas e áreas de várzea, as redes de micro e macro drenagem tornam-se subdimensionadas, incapazes de veicular a vazão adicional.

Os sistemas de drenagem urbana, da forma como têm sido concebidos, têm por objetivo conduzir o escoamento o mais rápido possível para os cursos d'água próximos, agravando o quadro de enchentes à jusante das áreas onde é gerado o escoamento superficial.

Tradicionalmente, a problemática das cheias urbanas é vista pela ótica da construção ou ampliação de obras hidráulicas que possam contê-las. No entanto, os órgãos públicos responsáveis nem sempre possuem recursos suficientes para materializar soluções estruturais, ou estas são fisicamente inviáveis por uma série de razões, de modo que os problemas de enchentes permanecem sem solução, ou com soluções pouco duradouras.

A ineficiência dos sistemas de drenagem urbana causa impactos negativos principalmente no setor econômico e na saúde pública dos municípios atingidos, devido às muitas perdas materiais associadas às enchentes e à natureza de veiculação hídrica da maior parte das doenças atendidas em postos de saúde públicos.

Recentemente tem havido, por parte dos órgãos tomadores de decisão em recursos hídricos, a busca de soluções para tais problemas que focalizem as razões fundamentais dos mesmos, e venham ao encontro do conceito de desenvolvimento urbano sustentado. As soluções buscadas consistem na tentativa de restabelecer as condições naturais de regularização das cheias na bacia, ou atender à vazões de restrições pré-determinadas. Uma possível forma de recuperar tais condições é recorrer à infiltração ou à retenção das águas de chuva no lote urbano onde são geradas, promovendo o retardamento e diminuição do escoamento superficial, e a conseqüente redução dos volumes e picos do hidrograma.

Estes sistemas de controle do escoamento, chamados sistemas de controle na origem, vêm sendo objeto de pesquisa e têm sido implementados com êxito em diversas bacias hidrográficas em todo o mundo. No entanto, ainda existem lacunas a serem preenchidas, com relação aos aspectos de dimensionamento, construtivos e de eficácia de tais soluções.

Neste trabalho, estudou-se um sistema de controle do escoamento superficial na origem, baseado na infiltração das águas pluviais por meio de trincheiras de infiltração. O aspecto estudado foi o comportamento hidráulico de tais estruturas, em resposta a eventos de chuva simulados. Foram realizados experimentos com trincheiras instaladas em dois tipos distintos de solo, e os resultados obtidos foram confrontados com os dados fornecidos por um modelo numérico de simulação, baseado nas equações de Richards' e Philip para o escoamento em solo não saturado, desenvolvida em sua forma bidimensional.

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é estudar o comportamento hidráulico de trincheiras de infiltração como dispositivos alternativos no gerenciamento de águas pluviais urbanas, para o controle do escoamento superficial e o auxílio à recarga do aquífero subterrâneo. Especificamente, pode-se delinear os seguintes objetivos:

- i. Escolha de dois solos de propriedades hidráulicas distintas e realização de ensaios de campo e laboratório para sua caracterização;
- ii. Realização de experimentos de infiltração em trincheiras para quantificar a variação do volume infiltrado e o desenvolvimento do campo de umidade;
- iii. Modelagem do fenômeno bidimensional de infiltração em torno de trincheiras de seção retangular, em resposta à entrada de águas pluviais provenientes de áreas impermeabilizadas contíguas;
- iv. Comparação entre os resultados experimentais e numéricos;
- v. Proposta de uma metodologia de dimensionamento de trincheiras de infiltração;
- vi. Apresentar, de forma simplificada, a redução no hidrograma da bacia proporcionada pelo uso do sistema de trincheiras.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Na presente síntese, são apresentados os tópicos gerais relacionados à problemática das enchentes em bacias hidrográficas urbanas, bem como as possíveis soluções, baseadas em técnicas convencionais e alternativas em engenharia de drenagem de águas pluviais.

3.1. Histórico e panorama atual da drenagem urbana

O sistema natural de drenagem em uma bacia hidrográfica é composto pelos caminhos percorridos pelo escoamento superficial, quando as características físicas da bacia ainda não foram afetadas pela intervenção humana (*Makropoulos et al., 1999*). O relevo e a vegetação naturais contribuem para a atenuação do escoamento superficial, retardando sua chegada aos cursos d'água receptores (*Andoh e Declerck, 1997*). O processo natural de interceptação pela vegetação e infiltração das águas de chuva favorece que os volumes e picos de cheia sejam condizentes com a capacidade de veiculação de vazão das calhas dos rios (*Makropoulos et al., 1999*).

Com a urbanização da bacia, as construções e pavimentações diminuem a permeabilidade da área, e, conseqüentemente, o volume de água infiltrado no subsolo (*Makropoulos et al., 1999; Andoh e Declerck, 1997*). A urbanização introduz, na bacia hidrográfica, grandes áreas de superfícies impermeáveis, alterando a vegetação e as características do solo, e, portanto, as condições de drenagem (*Lawrence et al., 1996*).

Em decorrência disto, aumenta-se o escoamento superficial ou deflúvio direto, e medidas devem ser tomadas de modo a encaminhar convenientemente as águas pluviais.

As Figuras 3.1a e 3.1b ilustram o processo de aumento do escoamento superficial devido à urbanização de uma bacia hidrográfica.

(a)

(b)

Figura 3.1 – Efeitos da urbanização sobre a distribuição das águas na bacia hidrográfica. Fonte: Domingues, A. F., 2004.¹

Ao longo da história, a drenagem urbana desenvolveu-se com o único objetivo de promover o transporte hidráulica e economicamente eficaz do escoamento superficial de áreas urbanas para os cursos d'água próximos (Sieker, F., 1998). De fato, até mesmo a bibliografia que se tinha disponível no Brasil sobre drenagem urbana, até poucos anos atrás, consistia, basicamente, de manuais de projeto de galerias, sarjetas e bueiros. Nos

¹ Apresentação da palestra “Conservação e Reuso de Água” de Antônio Felix Domingues, Superintendente de Conservação de Água e Solo da Agência Nacional de Águas – Ana, em 7/10/04, no 76º ENIC – Encontro Nacional da Indústria da Construção, Vitória-ES.

últimos anos, tem-se observado que tal postura em relação às águas pluviais causa impactos significativos na macrodrenagem (Ellis e Marsalek, 1996).

A tendência da urbanização é ocorrer no sentido de jusante para montante, devido às características de relevo (Tucci, C. E. M., 1995). Os municípios exigem, de novos loteamentos, projetos de drenagem urbana eficientes apenas no sentido de escoar as águas pluviais, sem se preocupar com o acréscimo da vazão sobre o restante da bacia.

O aumento da frequência de enchentes a jusante ocorre pela sobrecarga da microdrenagem sobre a macrodrenagem, e, as áreas mais afetadas, devido à construção das novas habitações a montante são as mais antigas, localizadas à jusante.

De fato, há exemplos de cursos d'água cuja vazão de pico aumentou mais de quinze vezes durante um século de urbanização da bacia contribuinte, como é o caso ilustrado na Figura 3.2, de dois importantes rios da Região Metropolitana de São Paulo – RMSP, o Tietê e um de seus principais afluentes, o Tamanduateí. Segundo o Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo – DAEE, em sua Revista Águas e Energia Elétrica - RAEE, de outubro/98, em 1893, a vazão máxima do Tamanduateí, na Várzea do Carmo, era de 30 m³/s. Depois de passar por índices de 120 m³/s (1930) e de 484 m³/s (1977), a estimativa, em 1998, era de 800 m³/s. A calha atual foi projetada para 480 m³/s nesse trecho. Na edição da RAEE de abril/99, é apresentado o caso do rio Tietê. No trecho compreendido entre a foz do Tamanduateí e Osasco, a vazão de projeto do plano de 1894 era de 174 m³/s, passando a 400 m³/s no projeto de Saturnino Brito (1925); 650 m³/s no Plano HIBRACE (1968) e 1.188 m³/s no Projeto PROMON, de 1986. Os estudos de enchentes elaborados pelo Consórcio HIDROPLAN (1995) já indicaram valores cerca de 20% superiores aos obtidos no Projeto PROMON (1). Esta mesma defasagem entre capacidades e demandas hidrológicas também é verificada em diversos rios e córregos que sofreram intervenções na RMSP.

Figura 3.2 – Aumento da vazão dos rios Tamanduateí e Tietê, na RMSP. Fonte: Revista Águas e Energia Elétrica, publicação do Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo – DAEE-SP, edições de outubro/98 e abril/99.

Quando os leitos dos rios, muitas vezes canalizados, tornam-se incapazes de veicular a vazão adicional proveniente da impermeabilização, e/ou quando as margens estão urbanizadas, instala-se o quadro de enchentes periódicas nos meses de chuva. A Figura 3.3 ilustra a situação típica da calha de um canal da macrodrenagem antes e após a urbanização.

Figura 3.3 – Fases da degradação da drenagem natural. Fonte: Martins, José Rodolfo S., 1995.² (modificado)

² Drenagem Urbana, ed. ABRH, 428p.

Como o escoamento das águas é mais complexo no ambiente urbano que no rural, a hidrologia urbana tem evoluído como uma ramificação importante da hidrologia (*Ellis e Marsalek, 1996*), e cada vez mais sente-se a necessidade de implantar tecnologias sustentáveis em drenagem urbana, por meio de sistemas mais eficientes que os atuais conjuntos de sarjetas, galerias e canais.

3.2. Tecnologias alternativas em drenagem urbana

Atualmente, muito se tem falado, no meio acadêmico, sobre gerenciamento otimizado em drenagem urbana. Por meio de soluções estruturais ou não, o objetivo deste gerenciamento é limitar as mudanças impostas pela urbanização a patamares hidrologicamente sustentáveis, ou minimizar os impactos destas mudanças, uma vez que elas já estejam estabelecidas. Em geral não é viável recuperar as condições de escoamento anteriores à urbanização, e a limitação dos impactos a níveis aceitáveis deve ser a meta dos programas de gestão das águas pluviais (*Lawrence et al., 1996*).

As medidas de controle de inundações podem ser classificadas em estruturais, quando o homem modifica o rio, e não estruturais, quando o homem convive com o rio (*Tucci, C. E. M., 1995*).

As medidas não estruturais consistem em:

- Mapeamento de áreas de inundação: a partir de registros históricos de chuvas e curvas chave dos canais da macrodrenagem, estabelece-se cotas máximas de inundação para chuvas de diversos períodos de retorno, delimitando as áreas críticas.
 - Leis de zoneamento e plano diretor de drenagem urbana: integrado a outros planos setoriais do município, deve prever alteração da ocupação urbana e conter um prognóstico dos conseqüentes impactos em áreas críticas, e, com horizonte de projeto suficientemente longo, estabelecer restrições quanto ao loteamento de áreas de risco de inundação. A unidade geográfica a ser adotada no planejamento é a bacia hidrográfica.
 - Princípio de não ampliação da cheia natural em bacias em urbanização: manter as águas pluviais em seu ciclo hidrológico natural deve ser o fundamento básico do controle de inundações urbanas (*Huhn e Stecker, 1997*). Este conceito deve ser aplicado em todo novo empreendimento realizado na bacia, desde um simples aterro até a construção de pontes, rodovias e impermeabilização dos espaços urbanos (*Tucci e Genz, 1995*). Pode-se fixar, por exemplo, um índice máximo de impermeabilização do terreno a ser construído
-

(Tucci, C.E.M., 1995). Este índice seria semelhante ao coeficiente máximo de aproveitamento do terreno e à taxa máxima de ocupação do lote, fiscalizados pela prefeitura por ocasião da aprovação do projeto. No entanto, este tipo de índice é de difícil fiscalização, uma vez que a realidade da obra pode não condizer com o projeto apresentado. A solução mais efetiva para este problema é a orientação e educação permanente da sociedade.

- Fiscalização eficiente: uma seqüência de anos sem enchentes costuma ocasionar uma pressão da sociedade para que haja ocupação do leito maior do rio, o que ocorre principalmente pela população de mais baixa renda, processo que somente poderá ser contido por uma fiscalização rígida, alicerçada em um bom plano diretor. Outro aspecto que requer fiscalização intensiva é o que envolve as ligações clandestinas de esgotos domésticos nas redes de águas pluviais, e vice versa. No primeiro caso, tem-se uma sobrecarga do sistema de drenagem, com risco de extravasamento durante os picos de chuva; no segundo, tem-se a diluição dos efluentes domésticos por águas pluviais, ocasionando maior dificuldade de tratamento.

- Sistemas de alerta ligados à defesa civil: para minimizar os impactos das ondas de cheia, prevenindo a população e evacuando áreas, quando for o caso.

- Manutenção adequada de canais, galerias e pavimentos: para que não haja diminuição das seções devido à presença de lixo ou entulho, reduzindo a capacidade do sistema;

- Programas de informação e educação da comunidade: a população tende a reclamar obras hidráulicas para a contenção de enchentes, o que provoca um certo desgaste no poder público, no sentido de implantar medidas não estruturais em drenagem urbana. O bom funcionamento de um sistema preventivo de enchentes urbanas fundamenta-se num triângulo que tem como vértices a legislação, a fiscalização e a educação ambiental. Esta última envolve os aspectos de preservação do sistema de drenagem, redução da geração do deflúvio e adesão às práticas de prevenção.

Quando a ocupação das áreas de risco é um quadro já instalado, a solução usualmente adotada consiste em implantar medidas estruturais ou ações, como relocação, populacional para o controle das cheias urbanas, o que, freqüentemente, não soluciona o problema, mas o transfere para jusante, como veremos a seguir.

Entre as medidas de controle na macrodrenagem a mais comumente praticada é a canalização de trechos críticos (Tucci, C.E.M. in *Drenagem Urbana*). Num primeiro estágio esta solução funciona bem, pois, apesar do aumento do hidrograma a jusante, há a

retenção pelas áreas a montante, ainda não urbanizadas. Com o aumento da ocupação urbana, o poder público prossegue com a canalização a montante. Desta forma, à medida em que o escoamento se desloca para jusante, é acrescido de novos aumentos de volume devido à urbanização, resultando em acréscimos significativos na vazão máxima (*Cruz et al., 1998*), e as enchentes retornam a jusante. Neste estágio, em geral, já não há possibilidade de aumento lateral da calha, devido à ocupação urbana das margens, e as alternativas para promover o aumento da capacidade do canal recaem em soluções como: o aprofundamento da calha, a alteração da geometria da seção transversal, ou ainda a redução da rugosidade do canal, por meio de revestimento, a custos, muitas vezes, incompatíveis com a disponibilidade do poder público.

Surge então um outro tipo de medida de controle na macrodrenagem, baseado no retardamento artificial dos picos de cheia. Uma das estruturas utilizadas para o controle e atenuação da vazão de pico de um hidrograma, em projetos de drenagem urbana, ou mesmo em bacias rurais, é a implantação de uma bacia de retenção que propicie o armazenamento temporário do volume de água que chega a uma determinada seção (*Porto, R.M., 1989*).

Trata-se de reservatórios de armazenamento, instalados ao longo (in line) ou às margens (off line) dos cursos d'água, com a função de absorver o excesso de vazão durante precipitações críticas e, posteriormente, liberar a água retida em condições condizentes com a capacidade dos canais de jusante. As bacias de retenção, ou piscinões, permitem o retardo do escoamento, atenuando o pico dos hidrogramas e possibilitando a recuperação da capacidade de amortecimento perdida devido à impermeabilização (*Cruz et al., 1998*).

A Figura 3.4 apresenta o esquema de funcionamento típico de uma bacia de retenção, implantado em dois piscinões na região do ABCD, em São Paulo.

Figura 3.4 – Esquema de funcionamento de um piscinão “off line”. Fonte: Revista Águas e Energia Elétrica, outubro/98, DAEE-SP

Estudos recentes comprovam a eficiência das bacias de retenção na redução dos picos nos hidrogramas de cheia. Entretanto, os custos de implantação deste tipo de estrutura são altos, pois envolvem a aquisição de extensas áreas urbanas e operações de grande porte, com movimento de terra, interrupção do tráfego local, instalação de vertedouros para a entrada da vazão excedente na bacia e sistemas de bombeamento para o retorno das águas ao curso d'água. Muitas vezes as bacias ou reservatórios de retenção são física ou economicamente inviáveis, devido a inexistência de áreas para sua implantação, conflitos com outras instalações urbanas ou falta de recursos financeiros para sua construção. O controle na macrodrenagem envolve também problemas ambientais, devido à carga de lixo transportada e às interligações clandestinas entre as redes de drenagem e esgoto (Cruz *et al.*, 1998). Além disso, há também problemas com relação à operação e manutenção dos piscinões, que nem sempre cabem às mesmas entidades que os construíram, o que gera conflitos com relação às responsabilidades de cada órgão quando surgem problemas operacionais.

Para reduzir o número de cheias em uma bacia hidrográfica há duas possibilidades: aumentar sua capacidade de drenagem ou reduzir seu hidrograma afluente (Gedolf *et al.*, 1994). Embora a segunda opção seja mais condizente com o conceito de desenvolvimento urbano sustentável, a maior parte das soluções em drenagem urbana recai sobre a primeira

alternativa, e, apenas quando esta já não é possível, as soluções convergem para a redução do escoamento superficial. Estas soluções consistem em evitar o acréscimo de vazão nos hidrogramas urbanos, uma vez que a contenção das águas pluviais pode ser econômica ou fisicamente inviável. Nas bacias hidrográficas urbanas, o deflúvio se forma nos lotes residenciais, comerciais e industriais, bem como nas áreas de estacionamento e pavimentos, e é nestes locais, ou seja, na origem da formação do problema que ele deve ser combatido.

As técnicas de controle na origem podem ser adotadas como soluções complementares ou alternativas aos sistemas de drenagem convencionais (*Mikkelsen et al., 1996*). Elas podem atuar no sentido de retardar o escoamento superficial, por meio de pequenos reservatórios de retenção instalados nos lotes, ou de infiltrar as águas de chuva, por meio de estruturas destinadas a este fim, tais como pavimentos permeáveis e trincheiras ou valas de infiltração. Estas soluções tendem a apresentar bons resultados no controle de enchentes, uma vez que, num lote urbano, a parcela do pátio impermeabilizada representa um fator significativo no hidrograma do terreno (*Tucci, C.E.M., 1995, in Drenagem Urbana*).

Muitas são as medidas estruturais passíveis de ser utilizadas dentro do conceito alternativo de drenagem urbana (*Hun e Stecker, 1997*), entre as quais pode-se destacar:

- Reservatórios de retenção nos lotes urbanos;
- Superfícies gramadas de percolação e infiltração;
- Trincheiras de infiltração como elementos isolados, nos lotes, ou como componentes de um sistema integrado de estruturas de infiltração em grandes áreas;
- Valas e canaletas gramadas de infiltração;
- Galerias permeáveis;

Embora não existam limites claros entre o controle na origem e o de jusante, para fins de classificação, pode-se identificar como dispositivos de controle na origem, os reservatórios de retenção nos lotes, telhados e estacionamento, bem como os pavimentos permeáveis e as demais técnicas de infiltração (*Makropoulos et al., 1999*). Estas últimas são o foco principal deste trabalho, e serão abordadas com maiores detalhes mais adiante.

O armazenamento em lotes pode ser obtido por meio dos telhados, pequenos reservatórios residenciais, estacionamento e áreas esportivas (*Tucci et al., 1998*). No Brasil, já foram realizados trabalhos de simulação do armazenamento em lotes urbanos (*Tucci, 1998; Cruz et al., 1998*), para condições preestabelecidas de chuva e permeabilidade, chegando-se à conclusão de que, para lotes com dimensões entre 300 e

600 m² seriam suficientes reservatórios com volume de armazenamento entre 1,50 e 3,00 m³.

Este tipo de estrutura requer um investimento para a sua implantação. Entretanto, uma vantagem adicional pode ser obtida de tais construções, considerando que as mesmas podem reter as águas de chuva para o posterior aproveitamento em atividades que não requeiram água potável (Pratt, 1999). A principal desvantagem destas estruturas residenciais, em comparação com as bacias de retenção na macrodrenagem, está na dificuldade que se tem em gerenciar um grande número de pequenos equipamentos de controle descentralizados (Makropoulos et al., 1999). Neste aspecto, cabe um comentário específico para a situação no Brasil. Nas grandes cidades, é comum a não observância às leis de uso e ocupação do solo, e ainda mais comum a pouca fiscalização em relação a este aspecto da expansão urbana. Neste cenário, o gerenciamento (que inclui a fiscalização) de equipamentos descentralizados de drenagem torna-se ainda mais problemático.

A Figura 3.5 apresenta um modelo de reservatório de retenção de águas pluviais no lote.

Figura 3.5 – Esquema de funcionamento de um reservatório de retenção no lote. Fonte: Cordeiro Netto, O. M.,

2004.³

³ Gerenciamento do saneamento em comunidades organizadas, Técnicas de minimização da drenagem de águas pluviais, notas de aula. Universidade de Brasília.

3.3. Sistemas de infiltração

Os sistemas de infiltração de águas de chuva têm a finalidade de interceptar o escoamento superficial e encaminhá-lo ao aquífero, de modo a reduzir os picos de cheia e possibilitar a recarga do lençol freático (*Lawrence et al., 1999*).

A variável mais diretamente relacionada a esta prática é a taxa de infiltração do solo, definida como a vazão por unidade de área que o solo é capaz de infiltrar (*Alfakih et al., 1999*). Esta taxa depende, principalmente, da condutividade hidráulica do solo, da relação entre o potencial matricial e a umidade, e da posição do aquífero subterrâneo. Segundo *Alfakih et al. (1999)*, solos com condutividade hidráulica entre 10^{-6} e 10^{-3} m/s apresentam boa resposta à infiltração. No entanto, *Mikkelsen et al. (1996)* ressaltam que a baixa condutividade hidráulica do solo não representa restrição técnica à implantação de estruturas de infiltração, e sim, econômica, uma vez que os volumes de armazenamento de tais estruturas são inversamente proporcionais esta propriedade do solo. Os parâmetros e variáveis de projeto envolvidos, qualquer que seja a estrutura de infiltração a implantar, são:

- As propriedades físicas e hidráulicas do solo;
- O período de retorno a ser considerado;
- As características de chuva locais (curva idf);
- O volume de armazenamento das estruturas;
- A qualidade das águas a serem infiltradas, devido ao risco de contaminação do aquífero e do solo;
- A granulometria da camada superficial de solo;
- O teor de sólidos suspensos na água.

Estes dois últimos itens, em especial o teor de sólidos, interferem diretamente no processo de colmatção. Este fenômeno, cujo risco de ocorrência atinge todos os tipos de estrutura de infiltração, consiste na obstrução dos poros do solo, devido à presença de partículas sólidas na água infiltrada (*Saripalli et al., 1999*).

Diversas são as possibilidades de se promover a infiltração das águas pluviais. Uma delas é a percolação através de pavimentos permeáveis e o uso da subbase para o armazenamento, que têm se revelado eficientes em estacionamentos, calçadas e vias de tráfego pouco intenso (*Mikkelsen et al., 1996*). A implantação deste tipo de sistema é viável, do ponto de vista hidráulico, em locais planos ou com declividades suaves, e cujo

solo possua boa capacidade de infiltração, com lençol freático relativamente profundo (Araújo *et al.*, 1999). São recomendados em estacionamentos, calçadas e vias de tráfego pouco intenso, devido à menor resistência em relação aos pavimentos convencionais.

Os pavimentos permeáveis podem ser de concreto ou asfalto, e são construídos da mesma forma que os pavimentos tradicionais, com a diferença de que o material fino é retirado da mistura (Tucci e Genz, 1995). Sob o pavimento poroso, são construídas duas camadas de base: uma de agregado médio, com espessura de aproximadamente 3 cm, e outra de agregado graúdo, também conhecida por "reservatório de pedras" (Araújo *et al.*, 1999). Neste reservatório, que será tão profundo quanto for desejável sua capacidade de armazenamento, a água advinda da superfície é armazenada e posteriormente infiltrada para o subsolo, ou coletada por tubos de drenagem e transportada para uma saída.

Figura 3.6 – Esquema de pavimento poroso. Fonte: Cordeiro Netto, O. M., 2004.

Segundo Araújo *et al.* (1999), as principais vantagens da utilização de pavimentos permeáveis, e de estruturas de infiltração de um modo geral, são: a redução ou eliminação da rede de drenagem, a preservação do equilíbrio da água no local, o controle das descargas de pico e do volume de escoamento superficial, a remoção de poluentes e uma superfície mais segura para dirigir. Em contrapartida, o sistema possui desvantagens que, de acordo com as circunstâncias, podem inviabilizar sua implantação, tais como: risco de entupimento, necessidade de inspeções regulares e um possível risco de contaminação das águas subterrâneas. A manutenção regular com equipamentos especiais, que aplicam ao

pavimento altas pressões de "sopro" ou sucção, é requerida para preservar o seu bom funcionamento (Lawrence et al., 1996).

* Outra alternativa de sistema de infiltração são as trincheiras, como elementos isolados em lotes residenciais ou como parte de um sistema que integre toda a bacia contribuinte. Este tipo de estrutura constitui-se basicamente de frestas no solo preenchidas ou não com brita. Uma vez que as águas pluviais são drenadas de uma superfície conectada à trincheira de infiltração, estas são temporariamente armazenadas na porosidade da brita e, em seguida, infiltradas no solo (Mikkelsen e Jacobsen, 1993).

As trincheiras são tipicamente longas e estreitas, para reduzir a área superficial da base, que é supostamente obstruída por partículas finas após algum tempo de operação do sistema, e aumentar a relação entre a área efetiva de infiltração (os lados) e o volume de armazenamento (Mikkelsen et al., 1996). A geometria longa e estreita é também adequada à otimização da área em planta ocupada pelo equipamento de drenagem no lote urbano. As trincheiras atendem, geralmente, a pequenas áreas de drenagem (Lawrence et al., 1996), e requerem um pré-tratamento da água para reduzir o influxo de sólidos e a colmatagem prematura. Este tratamento primário pode ser feito por meio do revestimento da estrutura com uma manta geotêxtil removível e lavável.

As Figuras 3.7 a, b e c ilustram diferentes exemplos de trincheiras de infiltração, propostos por Lawrence et al. (1996), Mikkelsen et al. (1996) e Tucci e Genz (1995).

Figura 3.7 (a) – Exemplo de modelo de trincheira de infiltração. Fonte: Lawrence et. al., 1996, modificado.

Figura 3.7 (b) – Exemplo de modelo de trincheira de infiltração. Fonte: Mikkelsen et al., 1996

Figura 3.7 (c) – Exemplo de modelo de trincheira de infiltração. Fonte: Tucci e Genz, 1995.

° Como todas as demais estruturas de infiltração, as trincheiras são viáveis em solos com boa capacidade de percolação. É importante que o sistema seja planejado e que haja manutenção adequada, pois a principal causa de falha deste tipo de dispositivo é a colmatção precoce. Sua eficiência também é diminuída para longos períodos chuvosos, devido à possibilidade de saturação do solo (*Lawrence et al., 1996*).

° É possível promover o trabalho conjunto entre duas ou mais estruturas de infiltração e retenção do deflúvio. Uma delas é o sistema proposto por *Mikkelsen et al. (1996)*, no qual a água é drenada para uma bacia de retenção equipada com membrana de fundo, para evitar a infiltração direta; uma tubulação de descarga de fundo é conectada a um poço de infiltração com caixa separadora de óleos e graxas, para prevenir a colmatção. Desta forma, de toda a água desviada para a bacia, somente uma parte volta ao curso d'água, sendo que a outra é lentamente infiltrada no solo ao redor do poço.

Outra possibilidade de trabalho conjunto de duas estruturas alternativas de drenagem é o sistema proposto por *Sieker (1998)*, ilustrado na Figura 3.8a e 3.8b, constituído por uma vala de infiltração gramada e aberta para a atmosfera, sob a qual se instala uma trincheira

subterrânea de infiltração, preenchida com brita. Os elementos são dimensionados com o propósito de permitir a máxima infiltração possível do escoamento superficial. Isto é obtido por meio do armazenamento das águas de chuva na vala por um curto período de tempo, e seu posterior encaminhamento à trincheira, por meio da infiltração direta no solo. Na trincheira, a água é armazenada por um determinado tempo, até que haja total infiltração no entorno da estrutura.

Figura 3.8 – Exemplo de trabalho conjunto entre vala gramada de percolação e trincheira subterrânea de infiltração.
Fonte: Sieker, 1998, modificado.

Grotehuemann et. al (1994) propõem um sistema semelhante, em que valas de infiltração a céu aberto são construídas sobre trincheiras de infiltração subterrâneas, preenchidas com brita, ambas instaladas nas calçadas, em frente os lotes residenciais a elas conectados, conforme ilustra a Figura 3.9. As estruturas de cada lote são interligadas por meio de uma tubulação perfurada localizada no centro da seção transversal das trincheiras, que, além de conectar as estruturas, tem a função de encaminhar a vazão excedente ao sistema convencional de drenagem. *Grotehuemann et. al (1994)* observam que o sistema tem melhor eficiência para eventos isolados, pois necessita de um determinado tempo de

esvaziamento e infiltração das trincheiras. Em eventos de chuva consecutivos, dentro de um curto período de tempo, as estruturas podem falhar por sobrecarga, e somente simulações de longo período podem avaliar a viabilidade do sistema em garantir as vazões de projeto.

Figura 3.9 – Proposta de sistema de trincheiras de infiltração implantado em loteamentos. Fonte: Grotehuemann et. al, 1994, modificado.

- * As vantagens e desvantagens das trincheiras e poços de infiltração são praticamente as mesmas dos pavimentos permeáveis. Os maiores riscos são a colmatção da superfície do solo e a contaminação deste e do aquífero, devido à carga de poluição presente nas águas pluviais (Mikkelsen et al., 1996).
- Com relação à colmatção, pode-se estudar diversas formas de se promover o pré-tratamento da água para reduzir o influxo de partículas sólidas no solo, como, por exemplo, o uso de mantas geotêxteis.

Alguns estudos vêm sendo feitos sobre a possibilidade de contaminação do solo e do aquífero em resposta à infiltração de águas pluviais. Mikkelsen et al. (1996) avaliam que

não há evidências de alto risco de contaminação das águas subterrâneas, mas ressalta que a qualidade do solo superficial tende a diminuir após longos períodos de operação dos sistemas, devido às camadas superiores de solo funcionarem como um filtro microbiológico e químico dos poluentes presentes nas águas pluviais.

Barraud et al. (1999) monitoraram, durante um ano, duas estruturas de infiltração em Valence, França, situadas em solo de alta condutividade hidráulica (aproximadamente 10^{-2} m/s), e conectadas a áreas impermeáveis de 300 e 1300 m². Eles encontraram no solo ao redor das estruturas altas concentrações de metais pesados e hidrocarbonetos, e notaram redução significativa desses poluentes alguns centímetros abaixo das estruturas, registrando baixíssimo impacto nas águas subterrâneas.

No Brasil, há o atenuante de que as redes de drenagem são independentes das de esgoto, embora saiba-se que existem ligações clandestinas entre ambas. De qualquer forma, a maior parte dos contaminantes fica retida na região subsuperficial do solo, onde há a presença de substâncias húmicas, que retêm poluentes orgânicos por meio de reações hidrofóbicas. Desta forma, *Ellis e Marsalek (1996)* afirmam que, na maioria dos casos, o controle do escoamento superficial por meio da infiltração das águas de chuva pode ser praticado em áreas urbanas, tanto nos sistemas combinados quanto nos separados.

3.3.1. Exemplos de aplicação e simulação de sistemas de infiltração

* Embora as técnicas de infiltração ainda requeiram maiores constatações de seu desempenho a longo prazo, elas têm sido vistas amplamente como componentes viáveis do desenvolvimento urbano sustentado (*Makropoulos et al., 1999; Mikkelsen et al., 1996*). A despeito de toda a deficiência ainda existente de informações e estudos detalhados sobre seu funcionamento, estruturas de infiltração vêm sendo implementadas com êxito em vários lugares do mundo.

Segundo *Fujita (1997)* e *Mikkelsen et al., 1996*, no Japão, entre os anos de 1983 e 1995, o governo da região metropolitana de Tóquio implantou mais de 30.000 poços de infiltração, 285 km de trincheiras de infiltração e 495.000 km² de pavimentos permeáveis, em áreas públicas e privadas. A manutenção e limpeza das estruturas é feita com periodicidade que varia de bimestral a anual, dependendo localidade. Outras cidades japonesas, tais como Yokohama, Amagasaki, Sapporo, Chiba e outras têm adotado sistematicamente a prática da infiltração das águas de chuva. Os objetivos das estruturas de infiltração implementadas no Japão vão além do controle do escoamento superficial. Segundo *Fujita (1997)*, elas visam restaurar o ciclo hidrológico perdido com a

urbanização, promovendo a recarga dos aquíferos subterrâneos e prevenindo, assim, a intrusão marinha, problema comum no país.

Segundo *Warnaars et al. (1999)*, na cidade de Copenhagen, Dinamarca, dispositivos de infiltração existem e operam bem há mais de cem anos. Esta informação, contudo, somente é trazida à luz em discussões informais, sendo raramente reportada em publicações científicas.

Em 1994, *Warnaars et al.* avaliaram o funcionamento de duas trincheiras de infiltração subterrâneas, com volume útil de 4 m³ cada, conectadas a 600 m² de telhados, na região central de Copenhagen, próximo à estação de trens Norrebro, área densamente urbanizada, cujo solo possui condutividade hidráulica de 2×10^{-6} m/s. Ao longo dos dois anos e nove meses de observações, ocorreram 89 eventos de chuva, em 7 dos quais as estruturas sofreram sobrecarga, sendo acionado o sistema de extravasamento e encaminhada a vazão excedente à rede de drenagem local. A maior sobrecarga foi registrada durante um evento de 26,2 mm em 5 dias, ao longo dos quais as estruturas receberam um volume de 14,6 m³. O maior volume sem que houvesse sobrecarga do sistema ocorreu durante um evento de 63,6 mm em 20 dias, ao longo dos quais as trincheiras receberam um volume de 27,4 m³.

Coombes et al. (1999) monitoraram por dois anos o funcionamento de um sistema de retenção e infiltração de águas de chuva implantado em Figtree Place, subúrbio de New Castle, Austrália, 160 km ao norte de Sidney. O sistema é resumidamente esquematizado na Figura 3.10, e foi instalado em uma área que compreende 27 unidades residenciais. Foram monitorados os aspectos quantitativos e qualitativos do sistema, tais como a qualidade das águas de chuva provenientes dos telhados e a porcentagem de redução do abastecimento doméstico e do volume encaminhado ao sistema de drenagem. A redução no abastecimento de água foi da ordem de 60%.

Figura 3.10 - Sistema de gerenciamento de águas de chuva implantado em Figtree Place, New Castle, Austrália.

Fonte: Combes et. al, 1999, modificado.

Em 2002, *Coombes et al.* apresentaram uma metodologia de avaliação dos benefícios econômicos devidos à implantação de sistemas de controle na origem em loteamentos urbanos, em duas diferentes regiões de New South Wales, Austrália, Lower Hunter, com 450.000 habitantes, e Central Coast, com 289.000 habitantes. O trabalho, baseado na simulação de cenários, foi direcionado no sentido de avaliar o quanto o volume necessário para o abastecimento público de água potável pode ser aliviado por sistemas alternativos de abastecimento, tais como o reuso de águas de chuva. O estudo demonstrou que o uso de reservatórios de retenção de águas de chuva, instalados em lotes residenciais, com o objetivo de abastecer os usos domésticos de água que não requerem água potável, tais como banheiros e áreas externas, pode reduzir em até 50 % a demanda de água para o abastecimento público urbano, e em até 40 % o volume de águas de chuva encaminhadas

para o sistema de drenagem urbana. A simulação para a região de Lower Hunter revelou um retardamento de 34 anos na implantação de novas fontes de abastecimento em relação ao cenário sem os reservatórios de retenção.

Grotehusmann et al. (1994) simularam a operação de um sistema de 38 valas e 56 trincheiras de infiltração interconectadas, no distrito de Beckeradsdelle, na cidade de Gelsenkirchen, Alemanha, em uma área de 75ha drenada por um sistema convencional de galerias e canais, cujo solo possui baixa condutividade hidráulica ($<10^{-7}$ m/s) e a topografia apresenta declividade alta, com camada impermeável a 2m de profundidade média. Nestas condições, a simulação mostrou que, com a instalação do sistema de infiltração proposto, com capacidade de armazenamento de 4.140m³, haveria uma redução superior a 40% das áreas conectadas ao sistema de drenagem convencional.

Estudo semelhante foi realizado por *Sieker e Klein (1998)*, para uma bacia de 22km², densamente urbanizada (aproximadamente 300.000 habitantes) na região leste da cidade de Berlin, Alemanha, drenada por 220km de canais e galerias, com seis bacias de retenção com capacidade de 200.000m³. As simulações da implantação de um sistema descentralizado de estruturas de armazenamento e infiltração conduziram a uma redução de 30% das áreas impermeáveis conectadas ao sistema existente de drenagem.

Simulações de mesma natureza realizadas por *Gedolf et al. (1994)* para a bacia do rio Shirako, que drena uma área de 10 km² na região noroeste de Tóquio, Japão, trouxeram outra conclusão importante a respeito da implantação de sistemas descentralizados de infiltração: em uma região que opera com sistemas combinados de esgotos pluviais e cloacais, a redução nas vazões de pico proporciona redução nos custos de tratamento de esgotos. Isso porque é economicamente mais viável tratar um certo volume de esgoto altamente concentrado, do que um volume maior de efluentes diluídos em águas pluviais. Além disso, a própria qualidade das águas pluviais é melhorada, uma vez que, ao reduzir a formação do escoamento superficial, reduz-se também sua contaminação por poluentes depositados nas áreas impermeáveis das regiões urbanizadas.

Medidas de infiltração podem ser realizadas também na macrodrenagem, como mostra *Ferguson (1995)*, em seu estudo para a cidade de Athens, Georgia. Em uma bacia urbana de 2 ha, ele simulou o comportamento de três diferentes estruturas de contenção de cheias na macrodrenagem da bacia:

- a. um reservatório de retenção ao longo do curso do rio (on-line), com orifício de fundo;
- b. um reservatório de infiltração on-line, com vertedor sem comportas, e

- c. um reservatório de infiltração às margens do canal (off-line), com entrada e saída por vertedor.

Ferguson (1995) estimou a vazão afluyente pelo método do Soil Conservation Service, do hidrograma unitário triangular. A condutividade hidráulica do solo é de $7,2 \times 10^{-7}$ m/s, o *curve number (CN)* adotado foi de 79,5, e o hietograma de 24h com precipitação total de 165 mm, para um período de retorno $Tr = 25$ anos. Ele obteve os seguintes volumes de armazenamento: (a) reservatório de detenção on-line: 786 m³; (b) reservatório de infiltração on-line: 1.747 m³, com restrição de profundidade máxima igual a 15,5cm, o que implica numa área de 1.14 ha, inviável para a bacia; (c) reservatório de infiltração off-line: 781m³, correspondente a uma área de 0,51 ha, disponível na bacia.

Segundo *Mikkelsen et al. (1996)*, a diferença mais significativa entre reservatórios de detenção e de infiltração é que, no primeiro caso, o volume de armazenamento é determinado considerando que a saída ocorre por um sistema hidráulico, tal como orifício de fundo ou vertedor, e, no segundo, a saída se dá por infiltração no solo, e depende da sua condutividade hidráulica, bem como da geometria e do nível d'água na estrutura.

No Brasil, alguns estudos já foram realizados com sistemas de infiltração de águas pluviais, como o trabalho experimental de Souza (2002), em que foi monitorado, durante 33 meses, o funcionamento de trincheiras de infiltração instaladas no Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. O estudo levou em conta critérios de dimensionamento, avaliação do desempenho, efeitos de colmatção e análise de custos, para as condições brasileiras. Durante o período de observação, não foram registradas vazões excedentes à capacidade de infiltração das trincheiras, embora tenham sido observados eventos de chuva de períodos de retorno superiores aos de projeto. Os dados observados revelaram eficiência total dos dispositivos de infiltração, durante os três anos hidrológicos monitorados.

3.3.2. Planejamento de sistemas de infiltração

Tendo em vista que a tecnologia relacionada à prática de infiltração é ainda específica para determinadas condições locais, e não aplicável de um modo geral, não existem na literatura muitos estudos comparativos entre os custos da infiltração de águas pluviais e das técnicas convencionais de drenagem urbana (*Mikkelsen et al., 1996*).

A primeira questão a ser respondida para a elaboração de qualquer projeto de drenagem urbana é “qual o período de retorno que se deseja atender?”, ou para uma determinada obra hidráulica existente, “a que período de retorno esta obra pode atender?”.

O período de retorno de um determinado evento é o inverso da probabilidade de ele ser igualado ou superado em um ano qualquer (Porto, R. L. L., 1995).

Ao se decidir, portanto, que uma obra será projetada para uma vazão com período de retorno T anos, automaticamente, decide-se o grau de proteção conferido à população (Porto, R. L. L., 1995). A escolha do período de retorno de uma obra hidráulica para o controle de enchentes deve ser definida em âmbito político e econômico, uma vez que cabe aos representantes da comunidade decidir o grau de proteção desejável, e o quanto se dispõe a pagar por ele.

Encontrar o ponto ótimo entre a proteção ideal e o custo aceitável é uma tarefa complexa, uma vez que, em geral, os benefícios advindos de um projeto de drenagem são de natureza qualitativa, e dificilmente podem ser quantificados.

No entanto, alguns valores são aceitos de forma mais ou menos ampla no meio técnico, e eles variam em torno de 2 a 10 anos para projetos de micro drenagem, e a partir de 25 anos para projetos de macro drenagem.

Quando não se dispõe de registros de precipitações, para a estimativa do período de retorno, ou quando estes estão incompletos para uma determinada região, pode-se lançar mão das curvas de intensidade-duração-frequência (curvas idf).

Estas curvas relacionam as três variáveis citadas por meio de parâmetros previamente ajustados, e, geralmente, têm a forma da Equação 3.1:

$$i = \frac{a \cdot T^b}{(t + c)^d} \quad (3.1)$$

Em que:

i = intensidade de precipitação, em mm/h;

T = período de retorno, em anos;

t = tempo de precipitação, ou duração da chuva, em minutos

a , b , c e d são parâmetros ajustados empiricamente.

A curva idf para a cidade de São Carlos, proposta por Barbassa (1991) é dada pela equação 3.2:

$$i = \frac{1519 \cdot T^{0,236}}{(t + 16)^{0,935}} \quad (3.2)$$

Determinado o período de retorno a ser atendido, deve-se proceder aos demais critérios de projeto pertinentes a cada tipo de obra em particular. Fujita (1997) enumera algumas

observações pertinentes à implementação de sistemas de infiltração em uma bacia hidrográfica:

- Avaliação quantitativa dos benefícios. A eficiência desta etapa depende fundamentalmente da quantidade e qualidade de informações disponíveis e das ferramentas de que se dispõe para manipulá-las e analisá-las.
- Planejamento da manutenção das estruturas, seja preventiva ou corretiva;
- Programas de incentivo à cooperação da população, por meio de auxílio no projeto das estruturas residenciais, leis de incentivo tributário, trabalhos de divulgação e educação;
- Disponibilização de informações sobre experiências em outros países;
- Incentivo à fabricação de equipamentos, produtos e peças hidráulicas apropriadas à implantação de estruturas de infiltração, em escala industrial, com padronização comercial;
- Construção de modelos físicos que permitam a visualização e o estudo detalhado do funcionamento das estruturas;
- Normatização de técnicas construtivas e elaboração de manuais de projeto;
- Inclusão dos projetos de infiltração no planejamento urbano;
- Avaliar os riscos de falha das estruturas por colmatção, bem como os riscos de contaminação do solo e do aquífero.

Coombes et al. (1999), num estudo de caso para a cidade costeira de New Castle, Austrália, enumera os seguintes aspectos avaliados pela agência de licenciamento e fiscalização ambiental local quanto à implantação de sistemas de reuso e infiltração de águas de chuva em grande escala:

- A possibilidade de contaminantes não detectados serem infiltrados nas águas subterrâneas;
- A possibilidade das práticas de retenção e infiltração comprometerem a integridade estrutural das construções existentes;
- Os possíveis problemas de saúde pública pelo mau uso das águas de chuva armazenadas para reaproveitamento;
- O risco de secas severas produzirem reduções significativas no abastecimento público, uma vez que os sistemas de abastecimento seriam projetados contando com o fornecimento adicional proveniente das águas pluviais;
- O risco de eventos de chuva extremos produzirem enchentes em unidades residenciais, pela sobrecarga dos sistemas locais de infiltração e armazenamento.

Coombes et al. (1999) identificaram uma relação de questões a serem respondidas para uma avaliação concreta destes itens:

- Qual a manutenção requerida para o sistema, e quanto custa?
- Qual a economia possível de águas de abastecimento para uso residencial interno e externo?
- Qual a redução possível na capacidade das redes de micro e macrodrenagem?

Na prática de gerenciamento sustentado de águas urbanas, a escolha da melhor técnica, ou combinação de técnicas viáveis para a solução de cada caso pode ser bastante complexa.

Veldkamp et al. (1997) desenvolveram um método de escolha constituído de cinco etapas:

- Definição do problema;
- Escolha das tecnologias viáveis e/ou disponíveis;
- Processo interativo de seleção das alternativas, com base em critérios preestabelecidos, dados referentes ao solo e à quantidade e qualidade da água, e com o auxílio de ferramentas apropriadas de simulação e dimensionamento;
- Combinação de técnicas;
- Organização das possíveis soluções encontradas em um ranking de custo e sustentabilidade.

Outras metodologias de escolha semelhantes a esta vêm sendo desenvolvidas atualmente (*Barraud et al., 1999*) com o propósito de auxiliar os projetistas a definir a solução mais adequada a ser utilizada em cada situação, uma vez que trata-se de uma forma alternativa de se promover a drenagem das águas pluviais e que, portanto, deve ser introduzida de maneira eficiente e otimizada, a fim de evitar erros que possam provocar problemas futuros.

3.3.3. Dimensionamento de estruturas de infiltração

Para comparar a eficiência de estruturas de infiltração com a de outros métodos de drenagem de águas pluviais é necessário ter em mãos uma metodologia de projeto (Mikkelsen e Jacobsen, 1993). A literatura apresenta alguns métodos, que serão discutidos a seguir.

Jonasson (1984, apud Mikkelsen e Jacobsen, 1993; Mikkelsen et al., 1996)⁴ propôs o *rain envelope method*, descrito por dois parâmetros, dados pelas Equações 3.3 e 3.4:

$$v = \frac{V}{A_r} \quad (3.3)$$

e

$$q_{fr} = \frac{Q_{fr}}{A_r} \quad (3.4)$$

em que:

v = volume específico de armazenamento (L);

V = volume útil de armazenamento (L^3);

q_{fr} = taxa média de infiltração, constante no tempo (LT^{-1});

Q_{fr} = vazão de infiltração da estrutura (L^3T^{-1});

A_r = área impermeável de drenagem conectada à trincheira (L^2).

Jonasson (1984, apud Mikkelsen et al. 1996) propõe que Q_{fr} seja obtida a partir da formulação de Darcy para escoamento em solo saturado, considerando que a infiltração ocorre somente em metade da área lateral da estrutura, supondo a colmatção total da área da base após algum tempo de operação do sistema, considerando que o nível d'água esteja localizado na seção média entre a base e o topo da trincheira, de modo que:

$$Q_{fr} = K \frac{A_l}{2} \quad (3.5)$$

em que:

K = condutividade hidráulica saturada do solo (LT^{-1});

A_l = área lateral da estrutura de infiltração (L^2);

O volume de armazenamento é obtido por balanço de massa, conforme a Equação 3.6:

$$V = V_{af} = V_{ef} \quad (3.6)$$

em que:

V_{af} = volume afluente à estrutura (L^3);

V_{ef} = volume de saída da estrutura (L^3).

Sendo que o volume afluente é estimado com base na curva IDF.

A principal desvantagem do *rain envelope method*, segundo Mikkelsen et al. (1996) é que, ao calcular o volume de entrada com base na curva IDF, o método negligencia o efeito

⁴ Jonasson, S.A. (1984). Dimensioning methods for stormwater infiltration systems. Proc. Third Int. Conf. on Urban Storm Drainage, Göteborg, Sweden, June 4-8, 1984, 3, 1037-1046.

de chuvas sucessivas, o que representa o principal risco de sobrecarga das estruturas de infiltração.

É importante ressaltar também que o processo de infiltração das águas pluviais se dá, em parte do tempo de operação do sistema, durante uma tormenta, em meio não saturado. Considerar que todo o processo ocorre em solo saturado significa subdimensionar a estrutura.

Mikkelsen e Jacobsen (1993) apresentaram um método de dimensionamento de estruturas de infiltração que leva em conta o efeito de chuvas sucessivas negligenciado pelo uso das curvas IDF no cálculo do volume de armazenamento. Uma vez que a taxa de infiltração q_{fr} é constante, o tempo de esvaziamento total da estrutura de infiltração é dado pela Equação 3.7:

$$t_e = \frac{V}{q_{fr}} \quad (3.7)$$

O método proposto utiliza séries históricas como entrada de um modelo de simulação do escoamento superficial e armazenamento, a partir do qual elabora-se um ábaco que fornece o volume específico de armazenamento em função do tempo de esvaziamento t_e , para vários períodos de retorno. Com base na geometria da estrutura de infiltração, e considerando escoamento bidimensional, calcula-se, a partir das equações 3.8 a 3.10, o tempo de esvaziamento t_e , com o qual obtém-se, no ábaco, o volume específico de armazenamento.

$$q_{fr} = \frac{Q_{fr}}{A_r} = \frac{K \frac{A_l}{2}}{A_r} = \frac{K \cdot 2 \cdot l \cdot h / 2}{A_r} = \frac{Klh}{A_r} \quad (3.8)$$

$$v = \frac{V}{A_r} = \frac{l \cdot h \cdot w \cdot \phi}{A_r} \quad (3.9)$$

$$v = q_{fr} \cdot \frac{w \cdot \phi}{K} = q_{fr} \cdot t_e \quad (3.10)$$

em que:

l, w, h = comprimento, largura e profundidade da trincheira (L);

ϕ = porosidade da brita no interior da trincheira (adimensional);

t_e = tempo de esvaziamento (T).

Ferguson (1995) estimou o volume de armazenamento a partir do hidrograma de entrada calculado pelo método do Soil Conservation Service, para estruturas de infiltração

na macrodrenagem, instaladas ao longo (on-line) e às margens (off-line) do canal. Os hidrogramas de entrada, em ambos os casos, são mostrados na Figura 3.11, e o volume de armazenamento é obtido geometricamente.

Figura 3.11 - hidrogramas de entrada dos sistemas de infiltração on-line e off-line. Fonte: Ferguson, 1995.

Em que:

V_s = volume de armazenamento

Q_p = vazão de pico do hidrograma unitário

t_p = tempo para atingir o pico do hidrograma

q_a = vazão de descarga específica

Q_{out} = vazão vertida

Os métodos de dimensionamento de estruturas de infiltração baseiam-se no balanço hídrico no interior do dispositivo, ou seja, o volume de armazenamento deve ser igual ao volume de entrada, menos o de saída. A diferença entre os métodos consiste em como obter tais volumes, seja pelo hidrograma unitário, seja pelo método racional, ou, no caso dos volumes de saída, qual o modelo de infiltração adotado. O método proposto neste trabalho, que será apresentado mais adiante, trabalha com a curva idf para a estimativa do volume de entrada, e com dois diferentes modelos de infiltração, Philip e Richards', para o volume de saída.

* A elaboração de manuais de projeto de estruturas de infiltração é o primeiro para viabilizar sua utilização em grande escala. No entanto, ainda há muitos aspectos a serem estudados, como, por exemplo, o comportamento hidráulico das estruturas de infiltração em meio não saturado, que foi o objetivo deste trabalho. Para tanto, é necessário um conhecimento básico sobre a dinâmica da água no solo, e sobre as propriedades que influenciam na infiltração.

3.4. Dinâmica da água no solo

Dois pontos são de fundamental importância para o conhecimento do movimento da água no solo: o conceitos de umidade e potencial (*Libardi, 2000*). No estudo da infiltração, aplica-se estes conceitos na análise da condutividade hidráulica do solo.

3.4.1. Condutividade hidráulica

A condutividade hidráulica é a mais importante propriedade que governa o movimento da água no solo (*Soto, 1999*). Ela é igual, numericamente, ao volume de água que atravessa verticalmente, em um segundo, uma amostra de solo de dimensões $1 \times 1 \times 1 \text{ m}^3$, sob uma diferença de potencial total de 1 J/m^3 . Trata-se, portanto, de um coeficiente que expressa a facilidade com que a água é transportada através do solo (*Libardi, 2000*).

A água, em estado líquido no solo, flui em decorrência dos gradientes de potencial existentes, sendo que o fluxo ocorre da região de maior potencial para a região de menor potencial (*Soto, 1999*). A condutividade hidráulica de um solo é função direta de sua geometria porosa e da umidade. O movimento da água é mais lento no solo não saturado do que no solo saturado, devido às descontinuidades dos poros com água e ar (*Soto, 1999*). Desta forma, quando a umidade do solo é igual à de saturação, sua condutividade hidráulica é máxima. (*Libardi, 2000*). Daí a importância de utilizar métodos de cálculo em solo não saturado para estimar os volumes de armazenamento de estruturas de infiltração.

Deste modo, para os fins propostos neste trabalho, interessa o conhecimento da condutividade hidráulica não saturada, ou seja, da curva de condutividade em função da umidade $k=f(\theta)$. A Equação 3.11, proposta por *Darcy (1856, apud Libardi, 2000)* quantifica o movimento de água no solo saturado, e foi adaptada por *Buckingham (1907, apud Libardi, 2000)* para solos não saturados (eq. 3.12).

$$\vec{q} = -K \nabla \phi t \quad (3.11)$$

$$\vec{q} = -k(\theta) \nabla \phi t \quad (3.12)$$

Em que:

q = densidade de fluxo (LT^{-1}): relação entre vazão e área onde ocorre efetivamente o fluxo, que é a seção porosa do solo. Apesar de possuir dimensão de velocidade, não é numericamente igual a esta, pois não considera a área total, somente a área efetiva de fluxo;

$k(\theta)$ = condutividade hidráulica não saturada, em função da umidade (LT^{-1});

K = condutividade hidráulica saturada (LT^{-1}) e

ϕt = potencial total da água no solo (L).

Mais adiante, serão descritos os métodos de laboratório e campo para a determinação da condutividade hidráulica saturada e não saturada.

3.4.2. Potencial total da água no solo

O estudo dos potenciais da água no solo é feito em termos de diferença de potencial em relação a um determinado estado de referência padrão, pré-fixado. O conceito de estado padrão é adotado porque, em dinâmica da água no solo, o que interessa é sempre a diferença de potencial, e não o seu valor absoluto. Portanto, torna-se útil adotar um estado padrão que possa ser utilizado em todas as medidas de potencial da água no solo, em qualquer lugar que sejam feitas, sob quaisquer condições de temperatura e pressão. Para o estudo do movimento da água no solo, considera-se como estado padrão a água, à mesma temperatura da água no solo, sob pressão atmosférica, num referencial de posição conhecido.

Sendo assim, define-se potencial da água no solo a diferença entre o potencial químico da água na fase sólidos-água-ar e o potencial químico da água na fase estado padrão (Libardi, 2000). O potencial total da água no solo é formado pelas componentes de gravidade, pressão, temperatura, pneumática e mátrica.

Os potenciais da água no solo têm como unidade energia por unidade de massa de água (J/kg). Entretanto, é útil expressá-los em termos de unidade de energia por unidade de volume de água (J/m³). Dimensionalmente, o resultado desta unidade é o de pressão, N/m² ou Pa (Libardi, 2000).

Utilizamos aqui o termo água para efeito de simplificação. Na verdade, em Física dos Solos, a denominação correta é feita em termos de solução, pois a água apenas em circunstâncias ideais se apresenta na forma pura no solo. Estudos mais aprofundados devem ser tratados, portanto, em termos de potenciais da solução no solo, e potenciais da componente água na solução no solo.

O potencial total da solução no solo, ϕ_t , em condições não saturadas, é composto pelos potenciais de pressão (ϕ_p), pressão de ar, ou pneumático (ϕ_n), mátrico (ϕ_m), gravitacional (ϕ_g), de temperatura (ϕ_T) e osmótico (ϕ_o): $\phi_t = \phi_p + \phi_n + \phi_m + \phi_g + \phi_T + \phi_o$.

Conforme será visto adiante, para os problemas práticos de engenharia, em que se estuda a infiltração de água em solos não saturados, as principais componentes do potencial total são os potenciais mátrico e gravitacional. Isso porque os potenciais de temperatura e osmótico possuem ordem de grandeza muito inferior aos demais, e porque os

potenciais de pressão e pneumático são nulos na zona não saturada de rígidos (não expansivos).

3.4.2.1. Potencial de pressão

A componente de pressão do potencial total da água no solo, ou simplesmente potencial de pressão (ϕp), corresponde à variação parcial do potencial químico da água devida apenas à diferença entre a pressão externa que atua na fase sólidos-água-ar no solo, num estado considerado, e a pressão externa que atua na fase estado padrão.

$$\phi p = \int_{P_0}^P \frac{\partial V}{\partial m_a} dP = \int_{P_0}^P v_a dP \quad (3.13)$$

em que:

ϕp = potencial de pressão, em J/m^3 ;

P = pressão externa atuante na fase sólidos-água-ar no solo, no estado considerado;

P_0 = pressão atuante na fase estado padrão;

V = volume do sistema;

m_a = massa de água;

v_a = volume específico da água = $\frac{\partial V}{\partial m_a}$

No caso de solos saturados tem-se que:

$$\phi p = P_l + P_{atm} - P_0 \quad (3.14)$$

em que

P_l = pressão de líquido e

P_{atm} = pressão atmosférica.

Em caso de solos não saturados, se o solo for rígido (não expansivo), tem-se:

$$\phi p = 0 \quad (3.15)$$

No caso de solo não saturado expansivo, vale a Equação 3.13, considerando que:

Para $m_a \rightarrow 0$ (solo seco) $\Rightarrow v_a \rightarrow 0$

Para $m_a \rightarrow m_{a\text{ máx}}$ (saturação) $\Rightarrow v_a \rightarrow 1/\rho_a$

Os experimentos conduzidos com trincheiras de infiltração neste trabalho foram realizados em dois solos não expansivos, na condição não saturada, em que $\phi p = 0$.

3.4.2.2. Potencial pneumático

Quando a pressão do ar no solo, no ponto de medida, for diferente da pressão no estado padrão, origina-se a componente denominada potencial pneumático, que, por isso, representa o efeito das variações da pressão do ar no solo sobre o potencial da água no solo (Libardi, 2000, in *Dinâmica da Água no Solo*). O potencial pneumático é expresso por:

$$\phi n = \int_{P_{ar0}}^{P_a} \left(\frac{1}{\rho_a} - v_a \right) dP_{ar} \quad (3.16)$$

em que:

ϕn = potencial pneumático, em J/m^3 ;

P_a = pressão do ar na fase sólidos-água-ar no estado considerado;

P_{ar0} = pressão do ar na fase estado padrão;

Para solos saturados, em que $v_a = 1/\rho_a$, tem-se $\phi n = 0$.

Para solos não saturados, não expansivos, tem-se $v_a = 0$, e, portanto:

$$\phi n = \frac{1}{\rho_a} (P_{ar} - P_0) \quad (3.17)$$

Para solos não saturados expansivos, aplica-se a Equação 3.16, sem simplificações.

Em condições experimentais de campo, pode-se considerar $\phi n = 0$, porque a pressão de ar que atua na água no solo é a pressão atmosférica local, considerada como pressão de referência (Libardi, 2000)

3.4.2.3. Potencial de temperatura

O potencial de temperatura (ϕT) corresponde à variação parcial do potencial químico da água devida apenas a uma diferença entre a temperatura da fase sólidos-água-ar no solo, no estado considerado, e a temperatura da fase estado padrão. Matematicamente, o potencial de temperatura é definido por:

$$\phi T = \int_{T_0}^T \frac{\partial(-S)}{\partial m_a} dT \quad (3.18)$$

em que:

ϕT = potencial de temperatura, em J/m^3 ;

T = temperatura da fase sólidos-água-ar no solo, no estado considerado;

T_0 = temperatura da fase estado padrão;

S = entropia do sistema;

m_a = massa de água

Conforme salienta *Libardi (2000)*, quando se considera o potencial de temperatura no potencial da água no solo, muitas equações nas quais o potencial total da água é utilizado não fornecem resultados quantitativos corretos. Deste modo, o conceito de potencial é limitado a sistemas isotérmicos, ou aproximadamente isotérmicos, em que a influência da temperatura possa ser desprezada. Em caso de sistemas verdadeiramente não isotérmicos, lança-se mão da termodinâmica dos processos irreversíveis.

Na prática, e para os fins a que se propôs este trabalho, pode-se considerar que, nas camadas sub superficiais do solo, a temperatura é praticamente constante ao longo do dia, e que o sistema estudado é isotérmico, em que $\phi T = 0$.

3.4.2.4. Potencial gravitacional

Define-se potencial gravitacional ϕg como a diferença do produto da aceleração da gravidade g pela distância vertical Z , em relação a um dado referencial, entre as fases sólidos-água-ar no estado considerado e a fase estado padrão:

$$\phi g = g(Z - Z_0) \quad (3.19)$$

Como o plano horizontal de referência, em relação ao qual são medidas verticalmente as distâncias Z e Z_0 é arbitrário, convém fazê-lo coincidir com a fase estado padrão, de modo que $Z_0=0$, e a Equação 3.19 fica reduzida a:

$$\phi g = gZ \quad (3.20)$$

3.4.2.5. Potencial osmótico

O potencial osmótico deriva da diferença de composição entre a solução no solo, contendo água, sais minerais e substâncias orgânicas, e a água pura (*Soto, 2004*). Ele ocorre devido à solução nos poros possuir sais em dissolução, e exercer uma sucção osmótica para levar a solução no solo do estado original ao estado padrão (água pura).

$$\phi o = -\frac{g}{\gamma_w} \cdot (-P_{osm}) \quad (3.21)$$

em que:

γ_w = peso específico da água, $ML^{-2}T^2$

P_{osm} = pressão osmótica, $ML^{-1}T^2$

Para efeito de simplificação, considerou-se, neste trabalho, que a solução utilizada nos experimentos de infiltração em campo constitui-se de água pura, o que anula os efeitos do potencial osmótico.

3.4.2.6. Potencial mátrico

Nos ensaios conduzidos em campo neste trabalho, como será visto adiante, destaca-se a componente mátrica do potencial total da água no solo. O potencial mátrico é a componente que representa os efeitos da matriz do solo sobre o potencial total da água no solo, incluindo forças associadas com a adsorção e a capilaridade, responsáveis pela retenção da água no solo. É definido como a variação parcial do potencial da água no solo devida apenas a uma diferença entre a umidade da fase sólidos-água-ar e da fase estado padrão (Libardi, 2000).

O potencial mátrico pode ser entendido como a "pressão de sucção" necessária para remover a água retida na matriz do solo. Quanto mais seco estiver o solo, maior será a sucção necessária para desprender água de sua matriz, o que conduz intuitivamente à noção de que o potencial mátrico é função da umidade, e é sempre negativo. Matematicamente:

$$-\phi_m(\theta) = \int_{\theta}^{\theta_0} \frac{\partial \mu_a}{\partial \theta} d\theta \quad (3.22)$$

em que:

ϕ_m = potencial mátrico do solo;

θ = umidade volumétrica;

θ_0 = umidade volumétrica da fase estado padrão;

μ_a = potencial químico da água no solo.

3.4.3. Curva de retenção

O conhecimento da curva de potencial mátrico em função da umidade, $\phi_m = f(\theta)$, é de fundamental importância para o estudo da infiltração da água no solo. Esta relação é conhecida como curva de retenção do solo.

Algumas relações são comumente utilizadas para calibrar a curva de retenção de um solo. Os principais modelos são:

- Brooks e Corey (1964)

$$\theta = (\theta_s - \theta_r) \cdot \left(\frac{\phi_m}{\phi_{m_r}} \right)^2 + \theta_r \quad (3.23)$$

em que:

θ = umidade volumétrica (cm^3/cm^3)

θ_s = umidade volumétrica de saturação (cm^3/cm^3)

θ_r = umidade volumétrica residual (cm^3/cm^3)

ϕ_m = potencial mátrico ($\text{cm}_{\text{H}_2\text{O}}$)

ϕ_{ma} = potencial mátrico que corresponde à entrada de ar ($\text{cm}_{\text{H}_2\text{O}}$)

λ = parâmetro de ajuste do modelo

O modelo de Brooks e Corey possui a desvantagem da descontinuidade da função para $\phi_m = 0$.

- **Van Genuchten (1980)**

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + (\alpha_v \cdot \phi_m)^n\right]^m} \quad (3.24)$$

em que:

α_v = parâmetro de ajuste da curva (cm^{-1})

n = coeficiente de ajuste da curva

m = coeficiente de ajuste da curva ($m = 1 - 1/n$)

O modelo de Van Genuchten é vantajoso para a modelagem numérica, por não possuir descontinuidade.

- **Fredlund et al (1994, apud Soto, 2004)**

$$\theta = \theta_s \cdot \left[1 - \frac{\ln\left(1 + \frac{\phi_m}{\phi_{mr}}\right)}{\ln\left(1 + \frac{10^6}{\phi_{mr}}\right)}\right] \cdot \left[\frac{1}{\ln\left(e + \left(\frac{\phi_m}{\phi_{ma}}\right)^n\right)}\right]^m \quad (3.25)$$

em que:

ϕ_{mr} = potencial mátrico que corresponde à umidade volumétrica residual, em $\text{cm}_{\text{H}_2\text{O}}$;

$e = 2,71828$;

10^6 = valor limite de sucção para qualquer tipo de solo, em kPa;

n, m = coeficientes de ajuste da curva;

Mais adiante, no capítulo sobre metodologia, será visto o método utilizado para a obtenção das curvas de retenção dos solos 1 e 2 e o modelo ajustado.

Fenômeno de histerese

Para um mesmo solo, a curva de retenção pode descrever uma trajetória diferente em função do acréscimo ou decréscimo de qualquer de suas variáveis (processos de drenagem e umedecimento). Assim, verifica-se que, num determinado solo, as trajetórias de secagem

e umedecimento podem não coincidir para um mesmo valor de sucção, manifestando-se o fenômeno denominado histerese. (Soto, 2004).

Este comportamento da curva de retenção, ilustrado na Figura 3.12, afeta diretamente as condições de fluxo no solo não saturado, e pode ser atribuído a diferentes causas, segundo Soto (2004):

Figura 3.12 – Exemplo da influência dos processos de secagem e umedecimento na forma da curva de retenção.

Fonte: Otto, S.R.L., Alcaide, M., 2001.

- O efeito de ângulo de contato do menisco de água, mais intenso no umedecimento do que na drenagem;
- Irregularidades geométricas dos poros interconectados que atingem equilíbrio em posições diferentes para os dois procedimentos, com diferentes volumes de água;
- Bolhas de ar capturadas nos vazios do solo no processo de umedecimento;
- Alterações da estrutura do solo produzidas pela expansão ou contração nos solos argilosos, nos processos de umedecimento e drenagem.

3.5. Modelos de infiltração

Define-se infiltração como a entrada de água no solo através da interface solo-atmosfera (Libardi, 2000). O termo taxa de infiltração refere-se à quantidade de água que atravessa a unidade de área da superfície do solo por unidade de tempo. A infiltração acumulada (I) é a quantidade total de água infiltrada no solo desde o início da infiltração até o instante t , expressa em termos de altura d'água, ou volume por unidade de área.

É fato experimental que, durante o processo de infiltração, estando o solo inicialmente seco, a taxa de infiltração tende a decrescer com o tempo, atingindo um valor final constante. Um gráfico relacionando a taxa de infiltração, a partir de uma superfície inundada, com o tempo, é chamado lei de infiltração, e o valor final constante é conhecido como capacidade de infiltração.

Existem diversas equações propostas para expressar a lei de infiltração da água em solos. Segundo Libardi (2000), são equações desenvolvidas empiricamente ou a partir de considerações físicas, e aplicam-se somente a solos homogêneos e que permanecem homogêneos durante o processo.

3.5.1. Equação de Green & Ampt (1911, *apud Libardi, 2000*)⁵

Para o desenvolvimento de sua equação de fluxo, estes autores assumiram que, procedendo ao processo de infiltração, mantendo-se uma carga hidráulica H_0 constante na superfície do solo, existe uma frente de molhamento bem nítida e precisamente definida, atrás da qual o solo se encontra uniformemente saturado, com condutividade hidráulica K_0 , e que o potencial mátrico nesta frente permanece sempre constante, independentemente do tempo e posição, e igual ao valor do potencial mátrico do solo antes da infiltração.

$$i = -K_0 \frac{(H_0 + L + H_f)}{L} \quad (3.26)$$

em que:

i = taxa de infiltração;

t = tempo, s;

L = comprimento da coluna saturada, m;

K_0 = condutividade hidráulica saturada, m/s;

H_0 = potencial de pressão constante na superfície do solo, mH₂O

$-H_f$ = potencial mátrico constante na frente de molhamento, mH₂O

3.5.2. Equação de Kostiakov (1932, *apud Libardi, 2000*)⁶

Trata-se de uma equação inteiramente empírica, da forma:

$$i = i_i \cdot t^{-a} \quad (3.27)$$

⁵ Green, W.H. & Ampt, G.A. (1911). Studies in soil physics. I. The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Science* 4, 1-24.

⁶ Kostiakov, A.N. (1932). On the dynamics of the coefficient of water percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration. *Trans. 6th Comm. Intern. Soc. Soil Sci., Moscou, Part A*, 17-21.

em que:

t = tempo, s

i = taxa de infiltração no instante t , em $m^3/s.m^2$

i_i = taxa de infiltração em $t=0$, em $m^3/s.m^2$

a = constante de decaimento da taxa de infiltração, tal que $0 < a < 1$.

A infiltração acumulada I até o instante t é dada por;

$$I = i_i \cdot \frac{t^{(1-a)}}{1-a} \quad (3.28)$$

Esta equação é válida para instantes t inferiores ao tempo T em que se atinge a capacidade de infiltração igual à condutividade hidráulica saturada K_0 :

$$K_0 = i_i T^{-a} \quad (3.29)$$

De modo que se atenda a condição de que, para $t \rightarrow \infty$, $i \rightarrow K_0$.

3.5.3. Equação de Horton (1940, apud Libardi, 2000)⁷

Na natureza, existem muitos processos de decaimento que obedecem à lei de que a taxa de variação de uma determinada grandeza que se aproxima de um valor final constante é proporcional à diferença entre seu valor num determinado tempo e o valor final constante. No caso em questão, a grandeza é a taxa de infiltração i , cujo valor final constante é i_f . A equação de Horton baseia-se nesta lei, e é expressa por:

$$i = i_f + (i_i - i_f) \cdot e^{-C \cdot t} \quad (3.30)$$

em que:

i = taxa de infiltração no instante t , em $m^3/s.m^2$;

i_f = taxa de infiltração constante em $t \rightarrow \infty$, em $m^3/s.m^2$;

i_i = taxa de infiltração em $t=0$, em $m^3/s.m^2$;

C = constante de decaimento da taxa de infiltração.

t = tempo, s

3.5.4. Equação de Philip (1957, apud Libardi, 2000)⁸

⁷ Horton, R.E. (1940). An approach toward a physical interpretation of infiltration-capacity. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 5: 399-417.

⁸ Philip, J.R. (1957). The theory of infiltration 4. Sorptivity and algebraic infiltration equations. Soil Sci. 84, 257-264.

Trata-se de uma equação desenvolvida a partir da equação do perfil de umidade. Para a obtenção da lei de infiltração, Philip considera duas possibilidades: infiltração vertical e infiltração horizontal.

O primeiro caso é expresso pela equação:

$$I = C\sqrt{t} + Ft \quad (3.31)$$

A infiltração em uma coluna de solo horizontal é dada por:

$$i = \frac{C}{2\sqrt{t}} \quad (3.32)$$

e a infiltração acumulada, no caso horizontal, é:

$$I = C\sqrt{t} \quad (3.33)$$

em que:

t = tempo;

I = infiltração acumulada até o instante t , em m^3/m^2 ;

i = taxa de infiltração no instante t , em $m^3/s.m^2$;

F = valor constante para o qual tende a taxa de infiltração para tempos longos de infiltração, relacionada com a contribuição da gravidade para o movimento d'água..

C = sortividade, grandeza relacionada com a capacidade do solo homogêneo absorver água em relação à sua umidade inicial.

A vantagem da equação proposta por Philip (1957, *apud* Libardi, 2000) para explicar a lei de infiltração, segundo Libardi (2000), é o fato de ela ser baseada na teoria e de suas constantes possuírem significado físico.

3.5.5. Equação de Richards' (1931, *apud* Tabuada et al, 1995a)⁹

Os modelos tradicionais vistos até aqui quantificam a infiltração de forma unidimensional. Entretanto, no caso das trincheiras de infiltração, o movimento da água no entorno da estrutura ocorre nas duas direções de sua seção transversal, e sofre uma variação, ainda que pequena, ao longo do comprimento da trincheira. Portanto, a utilização de um modelo unidimensional forneceria uma aproximação pouco condizente com a realidade. Desta forma, buscou-se um modelo que descreve-se o movimento da água no solo não saturado de forma bidimensional.

⁹ Richards, L.A. (1931). Capillary conduction of liquids through porous medium. Physics, 1, 318-333.

O modelo de Richards' baseia-se na substituição da Equação de Darcy-Buckingham na Equação da Continuidade, originando uma equação diferencial que descreve o movimento da água no solo como função da condutividade hidráulica não saturada $K(\theta)$.

- Equação de Darcy-Buckingham, para a quantificação do movimento da água em meio não saturado:

$$\vec{q} = -k(\theta)\nabla\phi t \quad (3.34)$$

em que:

$k(\theta)$ é a condutividade hidráulica em função da umidade, e

ϕt é o potencial total da água no solo, ou seja, é a soma dos potenciais de pressão, pneumático (ar), mátrico, gravitacional, de temperatura e osmótico.

- Equação da continuidade:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = -\vec{\nabla}q \quad (3.35)$$

em que:

t é tempo;

θ é a umidade volumétrica, e

q é a densidade de fluxo (relação entre a vazão que passa pelo solo e a área efetiva de escoamento, com dimensão LT^{-1});

Substituindo 3.34 em 3.35 tem-se:

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \vec{\nabla}(k(\theta)\vec{\nabla}\phi t) \quad (3.36)$$

A equação 3.36 é conhecida como Equação de Richards', e pode ser escrita em termos de condutividade hidráulica não saturada ou em termos de potencial mátrico (curva de retenção).

O uso de equações empíricas ou semi-empíricas como modelos de infiltração, apenas permite computar os volumes infiltrados, enquanto que Richards' leva em consideração as condições iniciais de umidade do solo, e, não apenas quantifica os volumes infiltrados, mas também descreve o movimento da água no solo.

Em 1995, *Tabuada et al.* propuseram um método que quantifica bidimensionalmente o campo de umidade em torno de sulcos curtos de irrigação, estruturas utilizadas na agricultura, e que são semelhantes em geometria e comportamento hidráulico às trincheiras de infiltração. Sendo assim, o método pôde ser aplicado às estruturas de drenagem, com as mesmas considerações e condições de contorno relativas às estruturas de irrigação.

O modelo de *Tabuada et al. (1995a)* tem como base a equação de Richards para o movimento da água em meios porosos não saturados, que é função do potencial total da água no solo e da condutividade hidráulica não saturada. A equação é desenvolvida em sua forma bidimensional, e as seguintes hipóteses são adotadas:

- Solo não expansivo ($\phi_p=0$ na zona não saturada);
- Meio homogêneo e isotrópico (vale o ajuste unimodal de van Genuchten);
- Efeitos de temperatura, osmose e histerese desprezíveis ($\phi_T=0$; $\phi_o=0$).

Os dados de entrada do modelo são:

- A curva de retenção do solo, $\phi_m = f(\theta)$;
- A condutividade hidráulica do solo em função do grau de saturação $k(\theta)$;
- As condições de contorno, que relacionam o potencial mátrico ϕ_m com as variáveis espaço e tempo.

As condições de contorno são específicas para cada região do domínio, no entorno da estrutura de infiltração, e para cada uma das três fases da infiltração:

- Abastecimento: a água é aduzida à trincheira, e a lâmina d'água é crescente;
- Recessão: ocorre após o término do abastecimento e a lâmina d'água é decrescente;
- Redistribuição: movimento da água no solo após o término da recessão, ou seja, quando não houver mais lâmina d'água na trincheira.

O volume total infiltrado, num dado intervalo de tempo, é calculado através do somatório dos volumes infiltrados em cada trecho do domínio e em cada fase da infiltração, anterior ao instante considerado. Os volumes parciais, a cada intervalo, são determinados com base nas condições iniciais do intervalo estudado. Desta forma, obtém-se o principal parâmetro de projeto de uma trincheira de infiltração, que é a sua capacidade de infiltração.

Posteriormente, *Tabuada et al. (1995b)* trataram de sulcos longos, abastecidos com água em seu extremo montante, com ocorrência de escoamento superficial longitudinal e, portanto, com o desenvolvimento de uma frente de avanço ao mesmo tempo em que se processa a infiltração no perímetro molhado, o que ocorre de forma transiente. Para tanto, foi utilizada a equação de Richards em conjunto com as equações de Saint-Venant. No caso das trincheiras de infiltração, a frente de avanço é desprezível, uma vez que trata-se de uma estrutura suficientemente curta para que a variação longitudinal do escoamento não sofra alterações consideráveis. Neste trabalho, *Tabuada et al. (1995b)* consideram sulcos curtos aqueles com menos de 15 metros de comprimento.

Mais adiante, no item sobre modelagem numérica, será visto detalhadamente como a equação de Richards' foi desenvolvida em forma bidimensional e discretizada para solução computacional, a fim de quantificar o movimento da água na zona não saturada, no entorno de trincheiras de infiltração.

Esta síntese inicial procurou expor o problema das enchentes sob a ótica da deficiência de planejamento da ocupação urbana, que constitui, no Brasil e em vários lugares do mundo, a principal causa das cheias em bacias urbanas. Procurou-se apresentar as possíveis formas de reversão desse processo, visando restabelecer o ciclo hidrológico natural da bacia. A metodologia apresentada a seguir foi formulada no intuito de monitorar o desempenho de trincheiras de infiltração e modelar o fenômeno bidimensional da infiltração em torno de trincheiras, com vistas a propor uma metodologia de dimensionamento e projeto. A seguir, faz-se uma análise simplificada da eficiência de um sistema de trincheiras de infiltração instalado em um loteamento.

4. METODOLOGIA

A revisão bibliográfica mostrou que a redução das cheias urbanas envolve medidas estruturais e não estruturais para o controle do deflúvio superficial direto, e que elas podem funcionar através da infiltração ou retenção das águas de chuva. Neste trabalho estudou-se as trincheiras de infiltração como elementos de controle do escoamento superficial na origem, ou seja, nos lotes urbanos onde é gerado.

A sequência de atividades adotada foi a seguinte:

- Trabalho experimental:
 - Escolha das áreas para a implantação de trincheiras experimentais;
 - Ensaios de campo e laboratório para a caracterização dos solos escolhidos;
 - Ensaios com trincheiras experimentais.
 - Averiguação da eficiência das trincheira para o período de retorno e chuva de projeto considerados;
- Simulação numérica:
 - Escolha do modelo;
 - Adaptação para a situação das trincheiras.
 - Simulação para os dois solos estudados.
- Comparação entre os resultados experimentais e numéricos;
- Apresentação de uma metodologia para o dimensionamento de trincheiras de infiltração;
- Avaliação da redução do hidrograma de cheia de uma micro bacia urbana, devida à utilização de trincheiras de infiltração.

4.1. Trabalho experimental

4.1.1. Escolha e classificação dos solos

Os trabalhos experimentais foram realizados em duas áreas, com características distintas de infiltração: Solo 1, argiloso, localizado no interior da Estação Climatológica do

CRHEA (Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada) da Escola de Engenharia de São Carlos, e Solo 2, arenoso, localizado no interior do campus da USP em São Carlos, nas imediações do Departamento de Hidráulica e Saneamento.

Em cada solo foi instalada uma área experimental coberta, para minimizar os efeitos das intempéries na condução e nos resultados dos ensaios, e fechada, para restringir o acesso ao local.

Realizou-se a análise granulométrica conjunta em amostras dos dois solos, conforme Norma NBR-6502. O procedimento de ensaio consistiu em submeter amostras representativas das áreas de estudo, a um processo peneiramento, em uma sequência de peneiras de aberturas conhecidas e decrescentes, normalizadas pela NBR-5734/80. O tempo de peneiramento e a frequência de vibração do agitador mecânico de peneiras são normalizados pela NBR-6502.

Anotou-se a massa de amostra retida em cada peneira, obtendo-se a porcentagem da amostra que passa pela peneira. Em seguida, plotou-se estes dados de porcentagem que passa *versus* diâmetro dos grãos (ou abertura da peneira) em gráficos de granulometria normalizados pela NBR 5734/80, obtendo-se a composição granulométrica das amostras.

As curvas de granulometria dos solos 1 e 2 estão apresentadas na seção resultados, figuras 5.1 e 5.2, bem como a tabela 5.1, com o resumo da classificação granulométrica de ambos os solos.

4.1.2. Caracterização dos solos

Os solos 1 e 2 foram caracterizados por ensaios de laboratório e campo. Foram determinadas:

- Curva de retenção (laboratório);
- Condutividade hidráulica saturada (laboratório);
- Condutividade hidráulica não saturada (campo);
- Taxa de infiltração (campo).

Os ensaios de laboratório foram realizados no laboratório de solos do Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos.

4.1.2.1. Determinação da curva de retenção

A finalidade do ensaio de determinação da curva de retenção, ou curva característica dos solos, foi relacionar a umidade com o potencial mátrico do solo.

As curvas de retenção dos solos 1 e 2 foram obtidas pelo processo de drenagem. As amostras foram retiradas de blocos indeformados, de dimensões $25 \times 25 \times 25 \text{ cm}^3$, coletados à profundidade de 120 cm, nas duas áreas experimentais. Esta profundidade foi escolhida no intuito de obter uma amostra livre de raízes e possíveis impurezas e materiais de aterro presentes no local. Este procedimento visa a homogeneidade e representatividade da amostra, de modo a reduzir as incertezas associadas a coleta.

Após a coleta, os blocos foram envolvidos em parafina, para preservar as condições de umidade da amostra. As Figuras 4.1 e 4.2 ilustram um dos blocos coletados. O procedimento descrito a seguir foi realizado para os dois blocos de amostras indeformadas dos solos 1 e 2:

Figura 4.1 - Bloco de solo indeformado, envolto em parafina e preso por chapas de metal.

Figura 4.2 - Bloco sem parafina.

Foram retiradas quinze amostras cilíndricas do bloco, e transferidas para anéis de PVC de 5 cm de diâmetro e 1 cm de altura tomando-se o cuidado de, durante a transferência, não alterar a estrutura das amostras. A Figura 4.3 ilustra o procedimento de transferência das amostras cilíndricas para os anéis de PVC.

Figura 4.3 - Retirada da amostra cilíndrica.

As amostras foram colocadas sobre uma placa porosa umedecida, e submetidas a um processo de saturação por 24 horas, da forma ilustrada na Figura 4.4.

Figura 4.4 - Processo de saturação das amostras de solo.

Após a saturação, a placa porosa, juntamente com as amostras, foi colocada no interior de uma câmara de pressão, semelhante a uma panela de pressão, também conhecida como câmara de pressão de Richards, ilustrada na Figura 4.5.

Figura 4.5 - Esquema da câmara de pressão de Richards (Fonte: Libardi, 2000, Dinâmica da Água no Solo)

A placa cerâmica tem sua face inferior coberta por um diafragma de borracha, selado na borda. Tomou-se o cuidado de que as amostras estivessem em perfeito contato com a placa. Aplicou-se, na parte superior da câmara, uma pressão P conhecida, de modo que a água contida na amostra se movesse para a parte inferior da câmara, através da placa porosa, e para a parte exterior do sistema, através do tubo de saída. A placa saturada permite a percolação somente da água contida na amostra, de maneira que o ar injetado permanece sob pressão na parte superior da câmara, não atravessando a placa. A tensão superficial na interface líquido-gás em cada poro da placa de cerâmica suporta a pressão, não permitindo a passagem do ar através da placa, daí a necessidade da placa estar perfeitamente saturada, sem nenhuma bolha de ar em seus poros. A pressão máxima que uma placa saturada pode suportar, sem que o ar a atravesse, é inversamente proporcional ao diâmetro do poro.

Após um determinado tempo de aplicação da pressão P , o gotejamento através do tubo de saída cessou, indicando que o sistema atingiu a condição de equilíbrio, em que o potencial mátrico da amostra, naquela condição de umidade, é igual à pressão P aplicada.

Nesta etapa, retirou-se a amostra e determinou-se sua umidade. Em seguida, repetiu-se o processo, aplicando-se uma pressão P maior que a pressão de equilíbrio anterior. Fez-se isso até que não houvesse mais alteração na umidade da amostra, por mais que fosse aumentada a pressão P . O valor de umidade da amostra de solo, nesta ocasião, é chamado de umidade residual θ_r , e a umidade da amostra no início do experimento é chamada umidade de saturação θ_s .

Um ensaio completo para a determinação da curva de retenção de uma amostra de solo dura, em média, 40 dias. As Figuras 4.6 e 4.7 ilustram a câmara de pressão utilizada.

Figura 4.6 - Câmara de pressão de Richards'

Figura 4.7 - Câmaras de pressão conectadas a um sistema de injeção e medição de pressão

Para traçar a curva de retenção fez-se a calibração dos pontos obtidos pela Equação 3.24, apresentada no Capítulo 3, proposta por *Van Genuchten (1980)*.

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + (\alpha_v \cdot \phi_m)^n\right]^m} \quad (3.24)$$

Para determinar θ_s , θ_r , α_v , m e n , foram utilizadas duas ferramentas: o programa Curvaret, desenvolvido pelos departamentos de Física e Meteorologia e de Agricultura da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - ESALQ, da Universidade de São Paulo, específico para o ajuste dos dados obtidos em laboratório à equação de Van Genuchten, e o software Systat®, que ajusta pontos experimentais a qualquer modelo desejado. As figuras 4.8 a 4.13 mostram as áreas de trabalho do Curvaret e do Systat.

Fig. 4.8 - Tela de inicialização do CurvaRet

Figura 4.9 - Tela de entrada de dados do CurvaRet

Figura 4.10 - Tela de saída de dados do CurvaRet

Figura 4.11 - Ambiente de trabalho do Systat®

Figura 4.12 – Tela de inserção do modelo no Systat®

Figura 4.13 – Tela de saída de dados do Systat®

Os resultados dos ajustes obtidos para os dois solos, por meio dos dois softwares, é apresentado na seção 5, Figuras 5.3 e 5.4 e Tabela 5.2.

4.1.2.2 Determinação da Condutividade Hidráulica Saturada

Para determinar a condutividade hidráulica ou permeabilidade saturada dos solos 1 e 2 foi realizado o ensaio de permeabilidade a carga constante normalizado pela NBR-13292.

O ensaio de permeabilidade a carga constante fundamenta-se na lei de Darcy, descrita pela Equação 4.1.:

$$v = k \frac{\Delta h}{L} \quad (4.1)$$

Onde:

v = velocidade de descarga;

k = coeficiente de condutividade hidráulica;

L = comprimento da amostra de solo;

Δh = diferença de carga total.

Para a realização do ensaio, extraiu-se uma amostra cilíndrica de solo indeformado, de aproximadamente 12 cm de altura e 5 cm de diâmetro, do mesmo bloco utilizado para o ensaio de curva de retenção. Esta amostra foi introduzida em um permeâmetro de carga constante, ilustrado na Figura 4.14.

Figura 4.14 - Permeâmetro de carga constante.

O ensaio consistiu, basicamente, em manter constante a carga total aplicada na amostra, e medir a vazão correspondente, a partir do volume de água percolado e do tempo de ensaio.

Isolando o coeficiente k na equação 4.1, obtém-se:

$$k = \frac{v \cdot L}{\Delta h} \quad (4.2)$$

mas $v = Q/A$ e $Q = V/t$, portanto:

$$k = \frac{V \cdot L}{A \cdot t \cdot \Delta h} \quad (4.3)$$

Durante a realização do ensaio, obteve-se os fatores da direita da Equação 4.3, tornando possível o cálculo do coeficiente k . O ensaio foi realizado para os solos 1 e 2, com três valores distintos de Δh , e o coeficiente de condutividade hidráulica saturada foi obtido a partir das médias destes três valores.

No capítulo 5, Tabelas 5.3 e 5.4, são apresentadas as planilhas de acompanhamento e resultados dos ensaios de condutividade hidráulica saturada para os solos 1 e 2.

4.1.3. Equipamentos de campo

Para a realização destes ensaios, bem como os experimentos com as trincheiras de infiltração, foi necessário dispor de equipamentos que permitissem a medida da umidade e do potencial mátrico do solo em condições de campo. Para a medida da umidade, optou-se por utilizar um equipamento conhecido como sonda de nêutrons. Para a medida do potencial mátrico, utilizou-se tensiômetros.

Sonda de nêutrons

Trata-se de um equipamento, utilizado para a determinação da umidade do solo em condições de campo, que consiste de uma fonte radioativa, um detetor, um circuito eletrônico para amplificação de sinais conectado a um mostrador digital e um tubo de acesso instalado no solo.

Para a medição da umidade, o equipamento é posicionado sobre o tubo instalado verticalmente no solo, no interior do qual insere-se a sonda até a profundidade desejada, por meio de um cabo que faz a interligação entre a fonte radioativa e os componentes eletrônicos.

O princípio de funcionamento do equipamento é baseado na propriedade de moderação de nêutrons rápidos pela água presente no solo. A fonte radioativa, constituída por uma cápsula de Amerício-241:Berílio, emite um campo de radiação de nêutrons rápidos, os quais, ao colidir com núcleos de átomos de hidrogênio, tornam-se lentos, ou termalizados. Por não possuir carga elétrica, os nêutrons termalizados não podem ser detectados diretamente; mas podem ser absorvidos pelo núcleo dos átomos de um gás (Boro Trifluorídrico ou Hélio-3), o qual torna-se um emissor de fótons, que por sua vez podem ser facilmente detectados por um dispositivo eletrônico adequado. Os pulsos elétricos gerados são conduzidos à superfície, ampliados e apresentados no mostrador em forma de contagem. A umidade do solo é obtida com o emprego de uma curva de calibração que expressa a relação entre contagens e umidade volumétrica, sendo definida para cada tipo de solo.

O método dos nêutrons para a determinação da umidade do solo está alicerçado em duas importantes considerações: (i) o hidrogênio é praticamente o único elemento que

modera os nêutrons rápidos, tornando-os lentos, e (ii) o hidrogênio no solo está quase que inteiramente na forma de água. Por isso, a densidade da nuvem de nêutrons termalizados reflete a umidade do solo (Beltrame & Taylor 1980).

A Figura 4.15 traz o esquema de funcionamento da sonda de nêutrons. A única diferença entre o esquema ilustrado e a sonda utilizada neste trabalho é que, no desenho, a cápsula com a fonte radioativa está separada do restante do equipamento. Na sonda utilizada na pesquisa, o equipamento é encaixado sobre o tubo de acesso, e a fonte desce pelo interior do tubo sem que haja contato manual direto entre o operador e a cápsula. A Figura 4.16 ilustra a operação da sonda.

Os tubos de acesso utilizados neste trabalho foram de alumínio, material recomendado pelo fabricante, por permitir pouca atenuação da radiação, com diâmetro $D=2,5''$.

Figura 4.15 - Esquema de funcionamento da sonda de nêutrons.

Figura 4.16 - Sonda de nêutrons utilizada neste trabalho.

Calibração da sonda de nêutrons

A calibração da sonda de nêutrons, nos solos 1 e 2, foi feita da seguinte forma:

- Foram instalados tubos de acesso para a sonda de nêutrons, nas áreas experimentais, em posições representativas da área de estudo;
- Irrigou-se a área ao redor de cada tubo, num raio de aproximadamente 1 metro;
- Procedeu-se à contagem padrão da sonda, conforme especificado adiante;
- Foram efetuadas leituras de contagem até a profundidade $z=1,80\text{m}$, em intervalos de 5 cm. Em cada ponto, realizou-se 5 leituras, registrando-se a média;
- Simultaneamente ao item anterior, foram coletadas, com o auxílio de um trado, amostras de solo a 10 cm do tubo. Os nêutrons emitidos pela sonda atingem um raio de 15 cm. Utilizou-se um trado de 1 1/2" para a amostragem, realizada a cada 10 cm de profundidade;
- As amostras coletadas foram imediatamente embaladas em sacos plásticos, etiquetadas e fechadas hermeticamente, para evitar a perda de umidade por evaporação;
- Em laboratório, determinou-se o teor de umidade, em massa, de todas as amostras, via método gravimétrico descrito a seguir:
 - a) Mediu-se a massa de três cápsulas de alumínio para cada amostra a ser analisada, encontrando-se os valores de m_c (massa da cápsula) de cada uma;

- b) Foram numeradas as cápsulas e anotadas as respectivas massas;
- c) Colocou-se uma porção das amostras no interior das cápsulas, e mediu-se novamente a massa ($m + m_c$), massa de solo e água = massa da cápsula;
- d) As cápsulas destampadas foram levadas à estufa, por 24 horas, à temperatura de 100°C;
- e) Foram retiradas as cápsulas da estufa, tampando-as imediatamente, para evitar a absorção de umidade do meio;
- f) Foram pesadas todas as cápsulas, obtendo-se ($m_s + m_c$), massa de solo + massa da cápsula;
- g) A diferença entre as massas obtidas em c e f é a massa de água m_w ;
- h) Dividiu-se m_w por m_s para obter o teor de umidade gravimétrico $U\%$;
- i) A umidade volumétrica $\theta\%$ foi obtida, à partir da umidade gravimétrica $U\%$, de acordo com a equação 4.4, proposta por Libardi (2000):

$$\theta = \rho_r \cdot U \quad (4.4)$$

Onde:

θ = umidade gravimétrica;

ρ_r = densidade aparente, ou densidade relativa do solo, definida pela razão entre a densidade do solo e a densidade da água. Considera-se a densidade da água $\rho_a = 1 \text{ g/cm}^3$.

U = umidade gravimétrica.

- Foram plotados os valores de umidade volumétrica no eixo das ordenadas contra os valores de contagem normalizados pela contagem padrão C/C_p no eixo das abcissas;
- Ao confrontar os valores de $\theta\%$ com os valores de C/C_p , tomou-se o seguinte cuidado: as amostras foram coletadas a cada 10 cm; portanto, a umidade medida em laboratório é a média destes 10 cm de coluna de solo no trado. Sendo assim, comparou-se cada valor de umidade obtido em laboratório com a média de 3 contagens da sonda, realizadas a 0, 5 e 10 cm ao longo do comprimento da amostra de solo, no trado.
- Repetiu-se todo o procedimento dias após a primeira coleta, para obter amostras de solo seco, e traçar a curva de calibração ao longo de vários valores de umidade do solo. Ao todo, foram analisados os valores de umidade em 72 pontos, sendo 36 em cada área experimental estudada.

Contagem padrão da sonda de nêutrons

A forma de operação da sonda, baseada na contagem de nêutrons termalizados por átomos de hidrogênio, proporciona precisão satisfatória na determinação do teor de umidade do solo. No entanto, podem haver pequenas variações diárias na contagem de uma mesma amostra, nas mesmas condições de umidade. Isso ocorre em decorrência da natureza estocástica das interações radioativas entre os nêutrons emitidos pela fonte e os átomos de hidrogênio presentes na amostra.

Este efeito pode ser minimizado através da normalização das contagens por meio da relação com uma contagem padrão, realizada diariamente. O equipamento possui a função contagem padrão, que, quando ativada, faz com que a sonda efetue 32 contagens sucessivas, e calcule sua média, fornecendo a contagem padrão.

O local de realização da contagem padrão (C_p) sugerido pelo fabricante é a caixa da sonda, estando esta recolhida no interior de sua blindagem. Internamente, esta blindagem é revestida de forma homogênea por uma cera que propicia a medição de contagens constantes ao longo da vida útil do equipamento. Desta forma, as leituras de contagem (C) realizadas no decorrer dos experimentos foram normalizadas pela Contagem Padrão (C_p), e esta relação foi utilizada para o cálculo do teor de umidade, de acordo com a calibração de cada solo em estudo. O cálculo do teor de umidade foi feito com base na equação 4.5:

$$\theta = a \cdot \frac{C}{C_p} + b \quad (4.5)$$

As Figuras 5.7a e 5.7b apresentam o resultado da calibração da sonda de neutrons para os solos 1 e 2.

Proteção radiológica no uso da sonda de nêutrons

Para que fosse possível adquirir e operar a sonda de nêutrons, foi necessário o atendimento às exigências de proteção radiológica da CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear, por tratar-se de uma fonte emissora de radiação ionizante. Os procedimentos de adequação das atividades às normas da CNEN consistiram em:

- i. Aquisição de licença de pessoa física para o uso, preparo e manuseio de fontes radioativas;
- ii. Credenciamento do Laboratório de Hidráulica Ambiental, junto à CNEN, como instalação radioativa, e

iii. Licenciamento para importação de material radioativo.

Para o atendimento ao item i, os responsáveis pela operação da fonte (mestranda e orientador da pesquisa) participaram de um curso de radioproteção com 40 horas de duração, destinado a profissionais de nível superior. A aprovação neste curso, e a comprovação de vínculo científico com a universidade, permitiram a aquisição de um registro pessoal, junto à CNEN, específico para a operação da sonda de neutrons.

Com relação ao item ii, foi elaborado um relatório de análise de segurança, conforme determinações da CNEN, com todas as especificações da fonte radioativa, do laboratório ao qual a mesma pertence e dos procedimentos de radioproteção adotados quando do manuseio da fonte. Este relatório foi submetido à análise da equipe técnica da CNEN e, uma vez aprovado, permitiu o credenciamento do referido laboratório como instalação radioativa. O relatório de análise de segurança do Laboratório de Hidráulica Ambiental compõe o ANEXO I deste trabalho. As cópias dos registros pessoais e do laboratório compõem o ANEXO 2.

Tendo sido licenciado o laboratório e adquiridas as licenças pessoais para operação da fonte radioativa, solicitou-se a licença para importação, em atendimento ao item iii. Desta forma, foi possível adquirir a sonda de nêutrons necessária ao desenvolvimento dos trabalhos de pesquisa.

Em atendimento às exigências da CNEN, as áreas de trabalho experimental possuem acesso restrito, e as operações são monitoradas por dosímetros de leitura direta, conforme ilustra a figura 4.17. O local onde a sonda é guardada quando não está em atividade, é sinalizado e possui acesso restrito.

Figura 4.17 - Monitoramento das doses de radiação com detector Geiger-Muller.

Tensiômetros

A medida do potencial mátrico em condições de campo é útil para determinar, de maneira indireta, o teor de umidade de um solo, quando se conhece sua curva de retenção. Esta medida é possível com o uso de um instrumento conhecido como tensiômetro. Ele consiste, basicamente, de uma cápsula porosa fixada à extremidade de um tubo preenchido com água. No extremo oposto, o tubo é conectado a uma cuba contendo mercúrio.

O tubo é enterrado no solo, à profundidade em que se deseja fazer a medição do potencial mátrico. Deve-se observar que a cápsula porosa esteja em perfeito contato com o solo. Isto pode ser facilitado se for feito o umedecimento prévio do solo, de maneira que este esteja saturado no momento da instalação do tensiômetro. O contato entre a cápsula e o solo é fundamental para que, através dos poros da cápsula, a água do tensiômetro entre em contato hidráulico e se equilibre com a água no solo.

O princípio de funcionamento é semelhante ao da câmara de pressão de Richards', onde a cápsula porosa substitui a placa cerâmica. No entanto, não se aplica uma pressão no tensiômetro com o intuito de alterar a umidade do solo; ao contrário, dependendo do teor de umidade do solo, a água no tensiômetro fluirá através da cápsula até entrar em condição de equilíbrio com a água no solo, e este movimento de água gera uma sucção na coluna de mercúrio. Colocando-se uma régua ligada à coluna, mede-se o deslocamento de mercúrio, e, por meio da equação 4.6, calcula-se o potencial mátrico.

A carga hidráulica total é dada por:

$$h = \left(\frac{\rho_{Hg} - \rho_{H_2O}}{\rho_{H_2O}} \right) \cdot H - h_c - z \quad (4.6)$$

em que:

$$\rho_{Hg} = 13600 \text{ kg/m}^3;$$

$$\rho_{H_2O} = 1000 \text{ kg/m}^3;$$

H = deslocamento da coluna de mercúrio;

h_c = distância entre o nível de mercúrio, na cuba, e a superfície do solo, e

z = distância entre a superfície do solo e o centro da cápsula porosa.

Para solos expansivos, não se pode desprezar a parcela de h devida à variação do potencial pneumático no solo, o que conduz à Equação 4.7:

$$\phi_p + \phi_m = -12,6H + hc + z \quad (4.7)$$

Em que ϕ_p é o potencial pneumático da água no solo e

ϕ_m é o potencial mátrico.

Já considerando a natureza negativa destes potenciais.

Para solos não expansivos, que é o caso dos solos 1 e 2 estudados neste trabalho, o potencial pneumático é nulo, e a Equação 4.7. se reduz a:

$$\phi_m = -12,6H + hc + z \quad (4.8)$$

A Equação 4.8. foi utilizada para converter as leituras fornecidas pelos manômetros de mercúrio em medidas de potencial mátrico.

4.1.4. Determinação da condutividade hidráulica não saturada

Para estabelecer uma relação numérica entre a umidade do solo e a sua condutividade hidráulica, *Libardi et al. (1980)* propõem um ensaio de campo, que foi realizado para os Solos 1 e 2. O procedimento de realização do ensaio, nos solos 1 e 2, foi o seguinte:

- Delimitou-se, com chapas de aço enterradas à profundidade de 0,50 m, uma área de 2,50x2,50 m² no interior da área experimental; A função destas chapas, de espessura 2mm, é isolar a área a ser irrigada e direcionar o fluxo de água no sentido vertical.
- No interior da área delimitada, foram instalados tensiômetros, às profundidades de 10, 20, 30, 40, 50, 75, 100 e 125 cm, e 4 tubos de acesso para a sonda de nêutrons, enterrados à profundidade de 170 cm.

- Iniciou-se o processo de irrigação da área delimitada, à uma vazão conhecida. Durante as horas seguintes ao início da irrigação, foram efetuadas diversas leituras de potencial mátrico e umidade, à profundidades 20, 50, 75 e 125 cm;
- Após algumas horas, constatou-se o regime permanente em todas as profundidades observadas, ou seja, as leituras de umidade e potencial não variavam mais no tempo. Neste momento, cessou-se a irrigação, e este foi considerado o instante $t=0$ de redistribuição;
- Cobriu-se a área com uma lona plástica, para minimizar a perda de água do solo por evaporação. A figura 4.18 ilustra a área experimental de ensaios de condutividade hidráulica em condições de campo.

Figura 4.18 – Ensaio de condutividade hidráulica em campo

- Iniciou-se a medição diária da umidade do solo às profundidades de 10 a 150 cm, e do potencial às profundidades em que foram instalados os tensiômetros. Para as medidas de umidade, considerou-se a média das contagens obtidas nos 4 tubos de acesso da sonda;
- O acompanhamento diário foi encerrado quando foram encontrados valores de umidade do solo iguais aos anteriores à irrigação, o que aconteceu após 15 dias do início do experimento. Os perfis de umidade registrados para os Solos 1 e 2 são apresentados na seção 5, figuras 5.7 e 5.8.
- Os passos seguintes consistiram na análise dos dados e determinação dos perfis de umidade e curvas de condutividade hidráulica. A sequência de cálculos para a determinação da condutividade hidráulica não saturada foi a seguinte:

- Fez-se o gráfico $\theta_0 - \theta$ versus $\ln t$ de cada profundidade z para $t > 1$ dia. O coeficiente angular desta curva é, de acordo com a Equação 4.9, igual a $1/\gamma$.

$$\theta_0 - \theta = \frac{1}{\gamma} \ln t + \frac{1}{\gamma} \ln \left(\frac{\gamma \cdot K_0}{az} \right) \quad (4.9)$$

Em que:

θ_0 é a umidade volumétrica inicial, em $t=0$ (cm^3/cm^3);

θ é a umidade volumétrica no instante t (cm^3/cm^3);

K_0 é a condutividade hidráulica no instante $t=0$;

z é a profundidade;

γ é parâmetro da Equação 4.10, que define a função matemática para $K(\theta)$;

$$K(\theta) = K_0 \cdot e^{-\gamma(\theta_0 - \theta)} \quad (4.10)$$

Em que:

$\alpha = \gamma / \bar{\gamma}$, sendo $\bar{\gamma}$ o valor médio de γ desde a superfície até a profundidade z .

- Plotou-se o gráfico $\bar{\theta}_0 - \bar{\theta}$ versus $\ln t$ e calculou-se K_0 a partir dos coeficientes angular e linear da Equação 4.11.

$$\bar{\theta}_0 - \bar{\theta} = \frac{1}{\bar{\gamma}} \ln t + \frac{1}{\bar{\gamma}} \ln \left(\frac{\bar{\gamma} \cdot K_0}{z} \right) \quad (4.11)$$

- Com os valores de θ_0 , γ e K_0 , ajustou-se a Equação 4.10, para cada profundidade z :

Ao longo dos 14 dias de ensaio, foram realizadas determinações dos perfis de umidade entre 0 e 1,50 de profundidade. Esses perfis, obtidos para os solos 1 e 2, são apresentados nas Figuras 5.8 e 5.9.

As Figuras 5.10 e 5.11 apresentam os gráficos de $\theta_0 - \theta$ versus $\ln t$ para cada solo, dos quais foram extraídos os parâmetros γ da equação 4.11, para cada profundidade z , até 1,50m, que são apresentados na Tabela 5.5. Os gráficos de $\bar{\theta}_0 - \bar{\theta}$ versus $\ln t$, de onde se extraiu os valores de K_0 para cada profundidade, são ilustrados nas Figuras 5.12 e 5.13. Os valores de K_0 são também apresentados na Tabela 5.5.

4.1.5. Ensaios com trincheiras experimentais

Os ensaios de infiltração nas trincheiras experimentais foram conduzidos de maneira a estudar seu comportamento hidráulico em resposta à adução de determinados volumes de água. Foram construídas trincheiras experimentais nos Solos 1 e 2, com o intuito de

estudar as três fases do processo de infiltração: adução, recessão e redistribuição. Para a obtenção de dados, utilizou-se os seguintes equipamentos:

- Nas fases de adução e recessão: transdutores de pressão para o acompanhamento do nível d'água na trincheira;
- Na fase de redistribuição: sonda de nêutrons para o acompanhamento do perfil de umidade no entorno da trincheira.

Os volumes aduzidos às trincheiras foram determinados com base na curva de chuva para a cidade de São Carlos (Equação 3.2), para um período de retorno de 2 anos e tempo de precipitação de 25 minutos, em um lote de 250 m², com área impermeável de 150 m² (60% de ocupação). A intensidade de precipitação, nessas condições, é de 55,5 mm/h, que, em 25 minutos, gera uma lâmina de precipitação de 23,14 mm, equivalente a um volume de 3,47 m³ sobre a área de 150 m². Este volume foi utilizado para realizar os experimentos de campo com trincheiras nos dois solos.

Sistema de leitura de nível d'água por meio de transdutores de pressão

Os transdutores de pressão são instrumentos sensíveis à variação de coluna d'água. São compostos por um sistema elétrico de detecção feito por uma membrana, que deve ser submetida, em uma das faces, à pressão atmosférica, e, em outra, à coluna d'água que se deseja medir. A membrana de detecção sofre deformação proporcional ao gradiente de pressão a que é submetida, e esta deformação gera a emissão de pulsos elétricos de fraca intensidade. Estes pulsos são amplificados e transmitidos a uma placa de aquisição de dados instalada em um micro computador, equipado com um software registrador gráfico das variações de pulso. Por meio da calibração prévia dos valores registrados com valores observados de coluna d'água, estabeleceu-se uma correlação entre as duas variáveis, que foi válida para as leituras futuras. As Figuras 4.19 a 4.21 ilustram o esquema de funcionamento do sistema de transdutores, o transdutor com o amplificador de sinais, e a tela do registrador gráfico.

Figura 4.19 - Esquema de funcionamento do sistema de transdutores.

Figura 4.20 - Transdutor de pressão e amplificador de sinais.

Figura 4.21 - Tela do software da placa de aquisição de dados do sistema de transdutores

Instalações Experimentais

Em cada área experimental foram instaladas duas trincheiras de infiltração: uma piloto, na qual foram conduzidos os ensaios iniciais de estudo do solo e calibração dos instrumentos, e uma experimental, em que foram realizados os ensaios de infiltração, ambas com as seguintes dimensões: largura $B=0,50\text{m}$; comprimento $L=4,00\text{m}$ e profundidade $H=0,70\text{m}$.

O trabalho experimental teve o objetivo de estudar o comportamento hidráulico das trincheiras instaladas nos dois solos, de modo que os ensaios foram conduzidos exclusivamente para este fim. As trincheiras experimentais foram alimentadas a partir de reservatórios com volumes controlados. Não foram realizados estudos sobre os efeitos da colmatção na eficiência das estruturas, pelo que utilizou-se, para a alimentação das trincheiras, água tratada, proveniente da rede de abastecimento urbano, e, portanto, livre de sólidos em suspensão, não sendo necessário o revestimento por manta geotêxtil. Além disso, trabalhou-se com todo o volume útil das trincheiras, que não foram preenchidas com brita, procedimento recomendável em trincheiras instaladas em lotes urbanos, para a contenção dos taludes, melhor fixação do geotêxtil e prevenção de acidentes.

Partiu-se da premissa de que o não preenchimento da trincheira com brita não provoca alterações significativas no seu comportamento hidráulico, sendo que, a única diferença, é que o volume útil da trincheira oca é de 100%, enquanto que, na trincheira preenchida com brita, o volume útil é igual à porosidade da brita utilizada, e este fator deve ser levado em consideração para o dimensionamento.

A alimentação de água para as trincheiras foi feita a partir de um sistema de dois reservatórios de 1,00m³ cada, interligados pelo fundo e conectados às trincheiras por meio de tubulação de PVC de 1,5" de diâmetro. A tubulação foi instalada a partir do reservatório até a extremidade longitudinal superior da trincheira, sendo, neste ponto, provida de registro de abertura rápida. A partir do registro, a tubulação foi prolongada verticalmente até o fundo da trincheira, e, deste ponto, horizontalmente até a extremidade oposta da trincheira, percorrendo todo o eixo longitudinal, junto ao solo. Neste trecho horizontal da tubulação, o tubo de PVC foi perfurado em seções equidistantes de 4 cm, cada uma com 4 furos distribuídos na circunferência do tubo, no intuito de promover uma alimentação uniforme de água por todo o comprimento da trincheira, e, deste modo, obter igual lâmina d'água ao longo da seção longitudinal.

Adotou-se a seção transversal do centro da trincheira como seção de controle, de modo que todas as três fases do processo foram estudadas a partir de observações de nível d'água e frente de umidade realizadas nesta seção. Foram instalados tubos de acesso para a sonda de nêutrons, em alinhamento, a partir do centro da seção transversal, até a distância de 0,90m do centro. Os tubos foram enterrados à profundidade de 1,70 m. A Figura 4.22 ilustra a disposição da instalação experimental.

Figura 4.22 - Esquema da instalação experimental.

Os tubos de acesso foram instalados em apenas um dos lados da seção transversal da trincheira. Isso porque, em experimentos piloto, constatou-se que a variação dos valores de umidade em posições equidistantes ao eixo longitudinal da trincheira, em um mesmo instante, é menos significativa do que o erro decorrente do tempo gasto para efetuar leituras nos dois lados da trincheira. Por este motivo, optou-se por adotar a condição de simetria, e realizar medições de umidade em apenas um dos lados da seção transversal. Desta forma, minimizou-se o tempo decorrido entre a medida da umidade no primeiro e no último ponto, de modo que as leituras puderam ser consideradas como representativas de um mesmo instante. A Figura 4.23 ilustra a trincheira experimental instalada no Solo 2.

Figura 4.23 - Trincheira experimental - Solo 2

Condução dos ensaios e processamento dos dados

Com o objetivo de avaliar quantitativamente o comportamento de infiltração das trincheiras, os experimentos foram monitorados nas três fases do processo de infiltração:

Fase 1 - Adução: alimentação da trincheira com água, caracterizada por lâmina d'água (z) crescente ($0 < z \leq H$, em que H = profundidade da trincheira).

Fase 2 - Recessão: ocorre desde o instante em que é cessada a alimentação até o instante em que a lâmina d'água no interior da trincheira se iguala a zero ($0, H \geq z > 0$).

Fase 3 - Redistribuição: drenagem interna da água no entorno da seção transversal da trincheira, iniciada no instante em que acaba a recessão ($z=0$).

As fases 1 e 2 foram monitoradas por meio de leituras de nível d'água no interior da trincheira, realizadas com transdutores de pressão acoplados a um sistema de coleta automática de dados. Uma vez conhecidas a geometria da trincheira e a vazão de alimentação, pôde-se determinar os volumes infiltrados a cada instante.

A fase 3 foi monitorada por meio de leituras de umidade volumétrica do solo realizadas com sonda de nêutrons na seção de controle.

A água foi aduzida às trincheiras a partir do sistema de reservatórios acoplados. Registrou-se, com o auxílio dos transdutores de pressão, a variação de volume na trincheira, durante as fases de adução e recessão. Para a condução do ensaio, foram utilizados dois transdutores. O primeiro, denominado T2, foi colocado no fundo da seção

de controle da trincheira, e o segundo, denominado T4, foi instalado no reservatório de alimentação. Uma vez conhecidas as geometrias do reservatório e da trincheira, foi possível acompanhar a variação de volume em ambos. As leituras foram registradas em intervalos de 60 segundos.

De posse dos valores de volume obtidos continuamente no reservatório e na trincheira, bem como das vazões de entrada e saída de água do reservatório, calculou-se a vazão de infiltração de água na trincheira, em $\text{m}^3/\text{s}.\text{m}^2$.

Em seguida, os valores observados foram confrontados com os fornecidos pela equação de Philip (1957, *apud Libardi, 2000*) para infiltração horizontal. Fez-se isso com o intuito de obter um meio simplificado de quantificar o volume infiltrado, a fim de propor uma metodologia simples de dimensionamento.

O modelo de Philip, apresentado no Capítulo 3 e descrito pelas Equações 3.32 e 3.33, foi escolhido por descrever o processo de infiltração horizontal, que é melhor ajustável ao caso das trincheiras de infiltração, em que supõe-se a condição de colmatagem do fundo, na qual a infiltração lateral torna-se predominante.

$$i = \frac{C}{2\sqrt{t}} \quad (3.32)$$

A infiltração acumulada até um determinado instante t é calculada pela Equação 3.32:

$$I = C\sqrt{t} \quad (3.33)$$

As planilhas com os volumes infiltrados observados e calculados pelo modelo de Philip são apresentadas nas Tabelas 5.6 e 5.7, para os solos 1 e 2, respectivamente. Para efeito de simplificação, as tabelas são apresentadas com intervalos de discretização de 5 minutos, embora as observações e o ajuste tenham sido feitos com discretização de 1 minuto. A partir da calibração dos dados experimentais pela equação de Philip, obteve-se a curva de decaimento da taxa de infiltração para os Solos 1 e 2, ilustradas nas figuras 5.14 e 5.15, e cujos parâmetros de ajuste encontram-se resumidos na Tabela 5.8. As Figuras 5.16 e 5.17 apresentam os gráficos dos volumes de entrada, armazenamento e infiltração, em função do tempo, para os Solos 1 e 2.

Terminadas as fases de alimentação e recessão, procedeu-se ao acompanhamento da frente de umidade no solo, em torno da seção transversal da trincheira. As medidas de umidade, com sonda de nêutrons, foram efetuadas desde o instante $t=0$, coincidente com o final da fase de recessão, até se obter valores de umidade iguais ou inferiores aos do início do ensaio, antes da adução. Neste momento, deu-se por terminado o experimento.

Uma vez determinados os valores de umidade nos diversos pontos distribuídos ao longo da seção transversal da trincheira, em cada instante da redistribuição, traçou-se linhas de iso-umidade, para uma melhor visualização do desenvolvimento do campo de umidade. Esta etapa foi realizada com o auxílio do software Idrisi. Este software, desenvolvido pela ClarkLabs e comercializado no Brasil pela SulSoft, reúne ferramentas nas áreas de processamento de imagens de sensoriamento remoto, SIG, geoestatística, apoio à decisão e análise de imagens geográficas. Fez-se uma adaptação das funções do Idrisi para o traçado do campo de umidade ao redor das trincheiras, a partir de valores pontuais de umidade, com o auxílio do recurso de interpolação do software.

As Tabelas 5.9 e 5.10 apresentam as leituras de umidade ao redor da seção transversal da trincheira, e as Figuras 5.18, 5.19 e 5.20 ilustram o desenvolvimento da frente de umidade.

4.2. Modelagem Numérica

Para quantificar a redistribuição da água no solo ao redor da trincheira, adaptou-se o modelo numérico proposto por *Tabuada et al. (1995_a)* para sulcos curtos de irrigação. A escolha do modelo baseou-se nos seguintes critérios:

- i. As trincheiras enquadram-se na mesma classificação dos sulcos curtos com relação à forma de abordagem do problema, pois são suficientemente curtas para que se possa considerar instantânea a fase de avanço da frente de molhamento ao longo da seção longitudinal. Sendo assim, a lâmina d'água é sempre a mesma ao longo do comprimento da trincheira. Isso permite uma abordagem bidimensional do problema, uma vez que as variações no campo de umidade ocorrem, principalmente, na duas dimensões da seção transversal da trincheira. Para efeito de classificação, *Tabuada et al. (1995_a)* consideram sulcos curtos aqueles com menos de 30 metros de comprimento.
- ii. As mesmas considerações admitidas no modelo de *Tabuada et al. (1995_a)* para sulcos de irrigação são assumidas para as trincheiras de infiltração: água e solo incompressíveis; meio homogêneo e isotrópico; os efeitos de histerese, temperatura e osmose são desprezíveis.
- iii. Por fim, as semelhanças entre as duas estruturas (sulcos e trincheiras) permitiram que a adaptação do modelo para o caso das trincheiras fosse de caráter geométrico, uma vez que estas possuem seção retangular, ao passo que os sulcos têm seção trapezoidal.

Feitas as considerações necessárias, o desenvolvimento do modelo baseou-se na Equação 3.35, apresentada no Capítulo 3, proposta por Richards' (1931, *apud Tabuada et al., 1995a*) para a quantificação da infiltração da água no solo.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \vec{\nabla}(k(\theta)\vec{\nabla}\phi t) \quad (3.35)$$

Desenvolvendo a equação de Richards' na forma bidimensional, tem-se:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \partial \left(\frac{k(\theta)}{\partial x} \cdot \frac{\partial \phi t}{\partial x} \right) + \partial \left(\frac{k(\theta)}{\partial z} \cdot \frac{\partial \phi t}{\partial z} \right) \quad (4.12)$$

Onde x é a direção horizontal e z a vertical da seção transversal da trincheira.

Como se trata de solo não saturado, os potenciais de pressão e pneumático são inexistentes. Considerando as hipóteses assumidas inicialmente, os potenciais osmótico e de temperatura também são nulos. Assim, a definição do potencial total da água no solo fica reduzida à equação 4.13:

$$\phi t = \phi m + \phi g \quad (4.13)$$

Em que,

ϕm é o potencial mátrico, e

ϕg é o potencial gravitacional, dado pela coordenada z da posição no solo.

Assim,

$$\phi t = \phi m + z \quad (4.14)$$

Substituindo 4.14 em 4.12, e fazendo as simplificações pertinentes, chega-se à Equação 4.15, que é a equação de Richards' na forma bidimensional, considerando as hipóteses adotadas.

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial k(\theta)}{\partial x} \cdot \frac{\partial \phi m}{\partial x} + \frac{\partial k(\theta)}{\partial z} \cdot \left(\frac{\partial \phi m}{\partial z} - 1 \right) \quad (4.15)$$

Para o desenvolvimento do modelo matemático, Tabuada et al. (1995a) utilizaram a Equação 4.16, que é a equação de Richards' bidimensional, escrita em termos de potencial mátrico:

$$c(\phi m) \frac{\partial \phi m}{\partial t} = \frac{\partial k(\phi m)}{\partial x} \cdot \frac{\partial \phi m}{\partial x} + \frac{\partial k(\phi m)}{\partial z} \cdot \left(\frac{\partial \phi m}{\partial z} - 1 \right) \quad (4.16)$$

em que:

$$c(\phi m) \frac{\partial \phi m}{\partial t} = \frac{\partial \theta}{\partial t} \Rightarrow c(\phi m) = \frac{\partial \theta}{\partial \phi m}$$

A vantagem de se trabalhar com a equação em termos de potencial mátrico é que este, ao contrário da umidade, é contínuo no perfil.

A Equação 4.16 foi discretizada, para solução computacional, pelo método das diferenças finitas, resultando em:

$$C_{i,j} \frac{(\phi_{ni,j}^{t+1} - \phi_{ni,j}^t)}{\Delta t} = \frac{1}{\Delta x} \left[K_{i,j+1/2}^t \frac{(\phi_{ni,j+1}^{t+1} - \phi_{ni,j}^{t+1})}{\Delta x} - K_{i,j-1/2}^t \frac{(\phi_{ni,j}^{t+1} - \phi_{ni,j-1}^{t+1})}{\Delta x} \right] + \frac{1}{\Delta z} \left\{ K_{i+1/2,j}^t \left[\frac{(\phi_{ni+1,j}^{t+1} - \phi_{ni,j}^{t+1})}{\Delta z} - 1 \right] - K_{i-1/2,j}^t \left[\frac{(\phi_{ni,j}^{t+1} - \phi_{ni-1,j}^{t+1})}{\Delta z} - 1 \right] \right\} \quad (4.17)$$

Em que:

t é o índice de tempo;

i é o índice de espaço na direção vertical e

j é o índice de espaço na direção horizontal.

A Equação 4.17 foi agrupada em termos, e rescrita como:

$$A_{i,j} \phi_{ni,j-1}^{t+1} + B_{i,j} \phi_{ni-1,j}^{t+1} + D_{i,j} \phi_{ni,j}^{t+1} + E_{i,j} \phi_{ni+1,j}^{t+1} + F_{i,j} \phi_{ni,j+1}^{t+1} = G_{i,j} \quad (4.18)$$

Em que:

$$A_{i,j} = \frac{K_{i,j-1/2}^t}{(\Delta x)^2} \quad (4.19)$$

$$B_{i,j} = \frac{K_{i-1/2,j}^t}{(\Delta z)^2} \quad (4.20)$$

$$D_{i,j} = -\frac{C_{i,j}^t}{\Delta t} - A_{i,j} - B_{i,j} - E_{i,j} - F_{i,j} \quad (4.21)$$

$$E_{i,j} = \frac{K_{i+1/2,j}^t}{(\Delta z)^2} \quad (4.22)$$

$$F_{i,j} = \frac{K_{i,j+1/2}^t}{(\Delta x)^2} \quad (4.23)$$

$$G_{i,j} = -\Delta z \cdot B_{i,j} + \Delta z \cdot E_{i,j} - \frac{C_{i,j}^t}{\Delta t} \cdot h_{i,j} \quad (4.24)$$

Adotou-se, para a solução do problema, a condição de simetria, na qual a infiltração não varia em relação a pontos equidistantes ao eixo longitudinal do sulco de irrigação, ou da trincheira de infiltração. Sendo assim, considera-se a área de domínio definida pelos pontos OACDEFO da Figura 4.24, que ilustra um sulco de irrigação, de seção transversal trapezoidal. A adaptação para o caso das trincheiras é mostrada na Figura 4.25.:

Figura 4.27 - Discretização do domínio para a solução da trincheira de infiltração.

A cada nó (i,j) , o valor de ϕ_m é calculado para o instante $t+1$, partindo-se do valor de ϕ_m no instante t . No primeiro intervalo Δt , ϕ_m representa a condição inicial do solo. Uma vez conhecidos os valores de ϕ_m em cada nó (i,j) , a umidade correspondente é computada utilizando-se a relação $\phi_m(\theta)$, que é a curva de retenção do solo.

Para um dado intervalo t , a partir do início da irrigação, o volume infiltrado na LxI é dado pela Equação 4.25:

$$V(t) = 2 \left[L \int \int_D (\theta_{x,z,t} - \theta_{in}) dx dz \right] \quad (4.25)$$

Em que θ_{in} é a umidade volumétrica inicial.

Da mesma forma, $\phi_{m\ in}$ representa o potencial mátrico inicial, que é o dado de entrada para a solução do problema.

As condições de contorno são diferentes nas três fases do processo: abastecimento, recessão e redistribuição, e são mostradas na Tabela 4.1. A adaptação das condições de contorno ao problema das trincheiras de infiltração é feita com base no ângulo de inclinação do talude do sulco de irrigação, que, no caso das trincheiras, é 90° .

Tabela 4.1 - Condições de contorno

Superfície de contorno (conforme Fig. 4.23)	Avanço-Abastecimento $0 < t < t_{ab}$	Recessão $t_{ab} < t < t_{rec}$	Redistribuição $t_{rec} < t < t_{red}$
CD	$\phi_m(x, Z_1, t) = h_0(t)$	$\phi_m(x, Z_1, t) = h_{rec}(t)$	$K(\phi_m) \left(\frac{\partial \phi_m}{\partial z} - 1 \right) = 0$
BC	$\phi_m(x, z, t) = h_{ob}(x, z, t)$	$\phi_m(x, z, t) = h_{rec}(x, z, t)$	$\vec{q} \cdot \vec{N} = 0$
AB	$\vec{q} \cdot \vec{N} = 0$ *	$\vec{q} \cdot \vec{N} = 0$	$\vec{q} \cdot \vec{N} = 0$
AO	$K(\phi_m) \left(\frac{\partial \phi_m}{\partial z} - 1 \right) = 0$	$K(\phi_m) \left(\frac{\partial \phi_m}{\partial z} - 1 \right) = 0$	$K(\phi_m) \left(\frac{\partial \phi_m}{\partial z} - 1 \right) = 0$
OF	$\frac{\partial \phi_m}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial \phi_m}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial \phi_m}{\partial x} = 0$
DE	$\frac{\partial \phi_m}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial \phi_m}{\partial x} = 0$	$\frac{\partial \phi_m}{\partial x} = 0$
FE	$\phi_m = \phi_{m_{inicial}}$	$\phi_m = \phi_{m_{inicial}}$	$\phi_m = \phi_{m_{inicial}}$

* N é a direção normal à superfície considerada.

O fluxo na direção N é representado por $\vec{q} \cdot \vec{N}$. Esta condição de contorno, que aparece para o trecho AB do domínio D , refere-se à inexistência de fluxo na direção perpendicular ao talude do sulco de irrigação. Na adaptação para a trincheira de infiltração, a direção N coincide com a direção x , uma vez que a inclinação do talude é 90° . A densidade de fluxo q é dada pela Equação 4.26:

$$\vec{q} = -K(\theta) \frac{\partial \phi_m}{\partial x} \vec{i} - K(\theta) \left(\frac{\partial \phi_m}{\partial z} - 1 \right) \vec{k} \quad (4.26)$$

O problema a ser resolvido consiste em obter, a cada instante, os valores de potencial mátrico que satisfaçam à Equação 4.17, quando são conhecidas as relações $K=K(\phi_m)$ e $c(\phi_m)$, as condições iniciais de umidade do solo e as condições de contorno. As relações $K(\phi_m)$ e $c(\phi_m)$ foram obtidas experimentalmente, sob a forma de curvas $\phi_m(\theta)$, para os dois solos, conforme procedimento descritos anteriormente (ensaio de curva de retenção).

As seguintes considerações foram adotadas por *Tabuada et al. (1995a)* para a solução computacional do problema:

- As relações $K(\phi_m)$ e $c(\phi_m)$ permanecem constantes durante cada iteração de cálculo, e iguais aos valores computados no final da interação anterior;

- ii. O valor do parâmetro $K(\phi_m)$ entre dois nós sucessivos é igual à média aritmética dos valores nestes dois nós, conforme mostram as Equações 4.27 e 4.28:

$$K'_{i\pm 1/2,j} = \frac{1}{2}(K'_{i,j} + K'_{i\pm 1,j}) \quad (4.27)$$

$$K'_{i,j\pm 1/2} = \frac{1}{2}(K'_{i,j} + K'_{i,j\pm 1}) \quad (4.28)$$

Para a solução do sistema de equações, utilizou-se o método iterativo de *Gauss-Seidel* (Wang e Anderson, 1982). A convergência foi considerada satisfatória quando a diferença entre os valores de potencial calculados em duas interações sucessivas (residual de Gauss-Seidel) satisfaz à equação 4.29:

$$\phi_{mi,j}^{t+1,it+1} - \phi_{mi,j}^{t+1,it} < 0,005 \text{ cmH}_2\text{O} \quad (4.29)$$

Tabuada et al. (1995_a) desenvolveram um programa computacional chamado *BIDISUL* (sulcos bidimensionais) para a solução do modelo matemático.

O modelo assume que a taxa de adução de água ao sulco seja constante, e que, no final de cada intervalo Δt o volume de água aduzido seja conhecido. Isto permite calcular a profundidade da lâmina d'água h_0 , uma vez que a geometria da estrutura de infiltração é conhecida. Desta forma, é possível calcular o volume de água infiltrado durante o mesmo período Δt utilizando a Equação 4.25. Tal volume é subtraído do volume total aplicado até o final do intervalo $(t+\Delta t)$, permitindo o cálculo de uma nova condição de contorno, de acordo com a Tabela 4.1. Este processo é repetido até que a profundidade máxima da lâmina d'água seja atingida, e, com isso, seja cessada a adução, e inicie-se o processo de recessão. Adota-se, então, um processo de cálculo similar ao anterior, para a determinação dos valores decrescentes de h_0 , até que a profundidade da lâmina seja zero. Neste instante, termina a fase de recessão e inicia-se a redistribuição, que é simulada pelos mesmos processos de cálculo, porém com condições de contorno constantes, conforme Tabela 4.1.

Além da simulação das fases de abastecimento, recessão e redistribuição, o modelo calcula as perdas de percolação durante um dado intervalo de tempo, em relação a uma dada profundidade. A evolução da distribuição da umidade do solo é também simulada e pode ser graficamente representada em forma bidimensional, em qualquer instante t da simulação. O fluxograma do modelo é apresentado na Figura 4.28. A listagem completa do modelo BidiSul é apresentada no ANEXO 3. O Capítulo 6 traz explicações mais detalhadas sobre o programa computacional, bem como um manual de instruções.

Figura 4.28 - Fluxograma do modelo BidiSul

4.2.1. Simulação numérica - procedimento

Para cada solo, foram conduzidas duas simulações:

Simulação A

O programa computacional foi rodado considerando, como condições iniciais de umidade, o mesmo perfil inicial de umidade observado em campo. O modelo foi alimentado com a mesma vazão utilizada nos experimentos de campo, e durante o mesmo tempo de aplicação.

Esta simulação foi feita com o intuito de comparar os resultados fornecidos pelo modelo com os observados experimentalmente, tanto os valores de lâmina d'água e volume infiltrado, quanto os perfis de umidade nos diferentes instantes da fase de redistribuição.

A simulação foi conduzida de modo a ser encerrada em duas possíveis circunstâncias: a lâmina d'água atingir a capacidade máxima da trincheira ou o tempo total de abastecimento (igual ao do experimento de campo) ser atingido.

Simulação B

O programa foi rodado com os mesmos parâmetros da simulação anterior, alterando, no entanto, os valores de umidade inicial para a umidade de saturação. Todo o perfil de umidade foi inicializado com valores saturados.

O objetivo desta simulação, partindo de um perfil totalmente saturado, foi avaliar o comportamento da trincheira na situação de operação mais desfavorável possível.

A vazão e tempo de alimentação foram as mesmas dos ensaios de campo. Os critérios de encerramento da simulação B foram os mesmos da simulação A.

Em ambas as simulações, observou-se o desenvolvimento da lâmina d'água no interior da trincheira nas fases de alimentação e recessão, bem como os perfis de umidade do solo ao longo da fase de redistribuição.

Os resultados das simulações A são apresentados na seção 5.3.1, em que a Tabela 5.11 apresenta a evolução do nível d'água e do volume infiltrado nas fases de alimentação e recessão; as Figuras 5.25 e 5.26 apresentam a variação do nível d'água na trincheira, para os dois solos, e as Figuras 5.27 e 5.28 apresentam os perfis de umidade nas três fases para os solos 1 e 2. Os resultados da Simulação B são apresentados na seção 5.3.2, em que a Tabela 5.12 apresenta a evolução do nível d'água e do volume infiltrado durante as fases de alimentação e recessão; as Figuras 5.31 e 5.32 apresentam a evolução do nível d'água, em comparação com a Simulação A, e as Figuras 5.33 e 5.34 ilustram o desenvolvimento do perfil de umidade fornecido pela simulação B para os Solos 1 e 2, respectivamente.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. Caracterização dos solos

5.1.1. Análise granulométrica conjunta

A análise granulométrica, realizada para os solos 1 e 2, conforme procedimento descrito no item 4.1.1 e normalizado pela NBR-6502, mostrou que o Solo 1 contém 45% de argila e silte, e o Solo 2, aproximadamente 70% de areia em sua composição. De acordo com essa distribuição granulométrica, o Solo 1 é classificado como areia fina a média siltosa vermelha, e o Solo 2, areia média a fina argilosa marrom.

Os solos 1 e 2 mostraram possuir textura suficientemente distinta para possibilitar o estudo comparativo do comportamento hidráulico das trincheiras em diferentes condições de infiltração. As figuras 5.1 e 5.2 apresentam as curvas granulométricas dos dois solos, e a tabela 5.1 traz a composição granulométrica, bem como os índices físicos dos dois solos.

Figura 5.1. – Curva granulométrica do Solo 1.

Figura 5.2. – Curva granulométrica do Solo 2.

Tabela 5.1 – Composição granulométrica e índices físicos dos solos 1 e 2

Composição granulométrica	Solo 1		Solo 2	
Argila	16,2	45,0	25,0	30,0
Silte	28,8		5,0	
Areia fina	30,0	55,0	30,0	69,9
Areia média	23,4		35,0	
Areia grossa	1,6		4,9	
Pedregulho	0,0	0,0	0,1	0,1
Massa específica do solo (ρ) (g/cm ³)	1,617		1,833	
Massa específica dos sólidos (ρ_s) (g/cm ³)	2,886		2,696	
Massa específica aparente seca (ρ_d) (g/cm ³)	1,360		1,690	
Condutividade hidráulica saturada (m/s)	5,69E-05		6,73E-05	

5.1.2. Curva de retenção

Os ensaios para a determinação da curva de retenção foram conduzidos conforme descrito no item 4.1.2, e os resultados dos ajustes dos pontos experimentais ao modelo de Van Genuchten são apresentados na Tabela 5.2. As figuras 5.3 e 5.4 apresentam as curvas ajustadas e os pontos experimentais observados para os Solos 1 e 2, respectivamente.

Tabela 5.2 – Resultados do ajuste da curva de retenção modelo de Van Genuchten

	Ajuste Solo 1		Ajuste Solo 2	
	Curvaret	Systat	Curvaret	Systat
Teta - r (cm³/cm³)	0,108	0,108	-0,081 *	-0,08
Teta - s (cm³/cm³)	0,529	0,526	0,375	0,3718
Alfa	6,7227	6,7119	6,355	6,322
m	0,2144	0,2143	0,1344	0,1340
n	1,2729	1,2728	1,1552	1,1552

* O valor negativo da umidade residual θ_r é fisicamente impossível, uma vez que trata-se de uma propriedade hidráulica do solo que significa o mínimo volume de água por volume de solo que o mesmo pode assumir. No entanto, no ajuste da curva de retenção, a regressão dos valores observados à equação de Van Genuchten gera este valor negativo. A fixação de um θ_r , igual, por exemplo, ao valor mínimo de umidade observado, de modo a "forçar" um θ_r positivo, gera inconsistência nos demais parâmetros, que não encontram convergência no processo de regressão. O ensaio de laboratório foi repetido três vezes, com amostras diferentes, coletadas em ocasiões diferentes, e os resultados se confirmaram. Uma análise das possíveis causas que podem gerar este tipo de resultado será feita adiante, na discussão dos resultados.

Figura 5.3 – Curva de retenção do Solo 1

Figura 5.4 – Curva de retenção do Solo 2

A distribuição dos pares de pontos potencial mátrico versus umidade volumétrica do Solo 2 apresentou-se heterogênea, mostrando dois módulos de pares bem definidos. Os modelos de curva de retenção que se têm disponíveis na literatura, e que foram apresentados no Capítulo 3, especialmente o modelo de van Genuchten, utilizado neste trabalho, são satisfatoriamente representativos de parte do comportamento da curva de retenção dos dois solos estudados. As Figuras 5.5 e 5.6 apresentam as curvas de retenção dos Solos 1 e 2 ajustadas em duas fases.

Figura 5.5 – Curva de retenção do Solo 1 ajustada em duas fases

Figura 5.6 – Curva de retenção do Solo 2 ajustada em duas fases

Segundo *Soto (2004)*, a forma escalonada da curva pode-se dever a que, em uma determinada faixa de sucção, os valores de umidade estejam associados a poros de dimensões relativamente uniformes. Já em outra faixa de sucção, esses valores estariam associados a um conjunto de poros de menores dimensões (distribuição bimodal dos poros).

Novos ensaios de curva de retenção foram realizados como medida de certificação, e os resultados se confirmaram. Sabe-se da experiência prática em Geotecnia, que os solos do interior do estado de São Paulo tendem a apresentar esse comportamento multi-modal de distribuição de poros. A confirmação dos resultados indica que o modelo tradicional de Van Genuchten deve ser aplicado por partes da curva de retenção quando há comportamento multi-modal.

5.1.3. Condutividade hidráulica saturada

O ensaio de condutividade hidráulica saturada foi conduzido conforme especificado no item 4.1.2, segundo a NBR-13292, baseada na formulação de Darcy para solos saturados, com o uso de um permeâmetro de carga constante e amostras indeformadas dos Solos 1 e 2. As planilhas de cálculo da condução dos ensaios são apresentadas nas Tabelas 5.3 e 5.4.

Tabela 5.4 – Ensaio de condutividade hidráulica saturada para o Solo 2

ENSAIO DE PERMEABILIDADE - CARGA CONSTANTE												
CLASSIFICAÇÃO						CORPO DE PROVA						
Local:		CAMPO EXPERIMENTAL				Altura (cm):		12,24				
Amostra:						Diâmetro (cm):		4,87				
Profundidade (m):		1,2				Área (cm²):		18,63				
Massa espec. sólidos (g/cm³):		2,7				Massa (g):		333,81				
Operador:		OSCAR				Volume (cm³):		228,00				
Permeâmetro n°:		02 GRANDE				Índice de vazios:		0,84				
						ρ (g/cm³)		1,464				
UMIDADE			Antes			UMIDADE			Depois			
	Cápsula	98	790	171	Cápsula							
	S+T+A (g)	23,86	24,2	25,73	S+T+A (g)							
	S+T (g)	22,11	22,45	23,92	S+T (g)							
	Tara (T) (g)	10,48	10,44	11,73	Tara (T) (g)							
	Água (A) (g)	1,75	1,75	1,81	Água (A) (g)							
	Solo (S) (g)	11,63	12,01	12,19	Solo (S) (g)							
	w (%)	15,0	14,6	14,8	w (%)							
DETERMINAÇÃO	Data	Horário Inicial	Horário Final	Volume de Água Percolada (cm³)	Altura de Carga Disponível (cm)	Tempo de Ensaio	Coef. Permeabilidade K _r (cm/s)	Temperatura (°C)	Correção, C _k	Coef Permeabilidade K ₂₀ (cm/s)	OBSERVAÇÕES	
1	6/12	-	-	43	27,2	240	4,33E-03	24,5	0,902	3,90E-03		
2	6/12	-	-	66	27,2	360	4,43E-03	24,5	0,902	4,00E-03		
3	6/12	-	-	81	27,2	450	4,35E-03	24,5	0,902	3,92E-03		
4												
5	6/12	-	-	78	47,3	180	6,02E-03	25,5	0,882	5,31E-03		
6	6/12	-	-	79	47,3	180	6,10E-03	25,5	0,882	5,38E-03		
7	6/12	-	-	25	47,3	60	5,79E-03	25,5	0,882	5,11E-03		
8												
9	6/12	-	-	38	72,3	30	1,15E-02	24,7	0,898	1,03E-02		
10	6/12	-	-	84	72,3	60	1,27E-02	24,7	0,898	1,14E-02		
11	6/12	-	-	82	72,3	60	1,24E-02	24,7	0,898	1,12E-02		
12												
13												
14												
15												
16												
17												
18												
Condutividade hidráulica saturada							6,73E-03	cm/s				

O Solo 1 apresentou condutividade hidráulica saturada igual a 0,00569 cm/s, ou 20,484 cm/h, e, para o Solo 2, observou-se 0,00673 cm/s, ou 24,228 cm/h. Como era esperado, devido ao seu maior teor de argila e silte, o Solo 1 apresentou menor condutividade hidráulica saturada.

5.1.4. Calibração da sonda de nêutrons

A calibração da sonda de nêutrons foi realizada conforme descrito no item 4.1.3, para os Solos 1 e 2. Os resultados são apresentados nas Figuras 5.7a e 5.7b.

(a)

(b)

Figura 5.7 – Calibração da sonda de nêutrons para os Solos 1 e 2

O ajuste das contagens lidas no equipamento à reta de calibração proposta pelo fabricante da sonda (Equação 4.5) forneceu R^2 de 87% para o Solo 1 e 81% para o Solo 2. Este ajuste, embora seja satisfatório, por estar dentro da margem de considerada adequada para o equipamento, é reflexo de duas fontes de incertezas:

- a) a natureza estocástica das iterações radioativas que geram as contagens fornecidas pela sonda. Apesar de normalizadas pela contagem padrão, conforme descrito no item 4.1.3, este procedimento minimiza os efeitos estocásticos, mas não os elimina por completo, e
- b) a heterogeneidade dos solos, principalmente o Solo 2, já observada nas curvas de retenção.

5.1.5. Condutividade hidráulica não saturada

A curva de condutividade hidráulica não saturada foi determinada para os Solos 1 e 2 conforme procedimento descrito no item 4.1.4, proposto por *Libardi et al. (1980)*. As Figuras 5.8 e 5.9 apresentam os resultados da primeira etapa do método, que consiste na determinação dos perfis diários de umidade. Estes perfis ilustram a capacidade de drenagem dos solos 1 e 2. No instante $t=0$, logo após o término da irrigação da área de estudos, a umidade média no Solo 1 aumentou da faixa dos 32% para os 45%, e, no Solo 2, de 21% para 28%. Isso demonstra a maior capacidade de retenção da água do Solo 1 em relação ao Solo 2.

Na primeira hora após o término da irrigação, os valores de umidade do perfil do Solo 1 sofreram redução média de 5% até a profundidade de 70 cm, e 1% a profundidades superiores a esta. Os valores de umidade do Solo 2, sofreram redução de 3% na porção mais rasa de solo e em torno de 1% a profundidades superiores a 60 cm.

Para $t > 1$ dia, a redução média nos valores de umidade foi em torno de 8% para o Solo 1 e 5% para o Solo 2. Em seguida, por meio de medições diárias de umidade, observou-se que os valores anteriores à irrigação foram atingidos cerca de 10 dias após a irrigação para o Solo 2, e ainda não tinham sido observados após 14 dias de medições no Solo 1.

Na segunda etapa, cujos resultados são mostrados nas Figuras 5.10 e 5.11, foram obtidas as curvas, em escala logarítmica, de umidade inicial menos umidade no instante t , para cada profundidade z . Do coeficiente angular destas curvas, obteve-se o parâmetro γ da equação 4.10. Ajuste semelhante, considerando os valores médios de umidade é apresentado nas Figuras 5.12 e 5.13, das quais se obteve, a partir dos coeficientes angulares das retas ajustadas para cada profundidade, o parâmetro K_0 da Equação 4.10.

Conforme proposto pelo método, a Equação 4.10 é ajustada para cada profundidade do solo, em intervalos de 10 cm. A Tabela 5.5 apresenta os parâmetros de ajuste para as profundidades 10 a 150 cm, para os Solos 1 e 2.

Figura 5.8 – Perfis de unidade volumétrica do Solo 1, ao longo de 15 dias de irrigação, até $z=1,50$

Figura 5.9 – Perfis de unidade volumétrica do Solo 2, ao longo de 15 dias de irrigação, até $z=1,50$

Figura 5.10 - $\theta_0 - \theta$ versus $\ln t$ para o Solo 1

Figura 5.11 - $\theta_0 - \theta$ versus $\ln t$ para o Solo 2

Figura 5.12 - $\bar{\theta}_0 - \bar{\theta}$ versus $\ln t$ para o Solo 1

Figura 5.13 - $\bar{\theta}_0 - \bar{\theta}$ versus $\ln t$ para o Solo 2

Tabela 5.5 – Parâmetros da equação de condutividade hidráulica não saturada

Prof. z (m)	Solo 1			Solo 2		
	θ_0 (cm ³ /cm ³)	γ	Ko	θ_0 (cm ³ /cm ³)	γ	Ko
0,10	0,4947	86,9565	1660,07	0,2595	100,0000	34,54
0,20	0,5132	68,9655	2722,47	0,2653	147,0588	74,70
0,30	0,5081	61,7284	2611,76	0,2719	117,6471	101,86
0,40	0,4999	68,9655	3598,78	0,2751	166,6667	226,42
0,50	0,4950	65,7895	3896,03	0,2716	131,5789	262,07
0,60	0,4794	58,1395	3273,50	0,2678	156,2500	307,35
0,70	0,4701	60,6061	2593,75	0,2710	144,9275	373,83
0,80	0,4621	52,3560	1868,78	0,2770	129,8701	469,03
0,90	0,4589	52,3560	1466,63	0,2790	119,0476	525,86
1,00	0,4548	58,4795	1290,76	0,2830	126,5823	666,45
1,10	0,4633	51,5464	1086,74	0,2860	114,9425	748,74
1,20	0,4557	57,1429	1068,17	0,2920	175,4386	1121,93
1,30	0,4536	56,1798	946,82	0,2937	138,8889	995,10
1,40	0,4475	57,4713	763,67	0,2946	169,4915	1619,15

A determinação da condutividade hidráulica não saturada, neste trabalho, foi feita objetivando o ajuste do modelo na simulação numérica. Na primeira fase, exploratória, ajustou-se o modelo tipo Gardner descrito pela equação 4.10, cuja calibração é mostrada na Tabela 5.5.

Observa-se, da Tabela 5.5, que a condutividade hidráulica não saturada do Solo 1 evolui de forma a apresentar maiores teores de umidade inicial, o que se traduz em valores altos de Ko e consequentemente valores de Gamma menores que 100. Para o Solo 2, os teores iniciais de umidade são, aproximadamente, a metade que no solo 1, o que é representado em baixos valores de Ko e valores de Gamma maiores de 100, evidenciando a tendência geral dos parâmetros da curva. Esta análise exploratória somente permite avaliar a dependência destes parâmetros, possivelmente revelando a natureza heterogênea do solo, e justificando uma análise exploratória posterior com modelo de van Genuchten.

Para a simulação numérica optou-se por trabalhar com o modelo de van Genuchten, obtido a partir da formulação de Mualen, para a condutividade hidráulica não saturada, em concordância com o modelo adotado para a curva de retenção. O modelo é representado pela Equação 5.1, com os mesmos parâmetros ajustados para a curva de retenção, apresentados na Tabela 5.2:

$$K(\theta) = K_0 \omega^l \left[1 - \left(1 - \omega^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (5.1)$$

em que:

K_s

$$\omega = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

$l = 0,5$ para solos de textura média a arenosa.

5.2. Ensaios com trincheiras de infiltração

Os ensaios com trincheiras de infiltração foram conduzidos conforme descrito no item 4.1.5. O acompanhamento dos ensaios foi realizado de maneiras distintas para as Fases 1 e 2, e para a Fase 3. Nas duas primeiras fases, alimentação e recessão, observou-se o nível d'água na trincheira e o volume infiltrado em cada instante. Na Fase 3, de redistribuição, acompanhou-se o campo de umidade ao redor da trincheira, com sonda de nêutrons.

As Tabelas 5.6 e 5.7 apresentam os valores de lâmina d'água e volume infiltrado nas fases de alimentação e recessão, para os Solos 1 e 2, por meio dos quais foi ajustado o modelo de infiltração horizontal de Philip, conforme descrito na metodologia, e que é apresentado na Tabela 5.8 e nas Figuras 5.14 e 5.15. A escolha do modelo horizontal foi feita baseando-se na premissa de que o fundo da trincheira é colmatado após pouco tempo de operação da mesma, impedindo ou reduzindo em grande parte a parcela de infiltração vertical, pelo fundo, predominando, portanto, a infiltração horizontal, pelas paredes da trincheira.

As Figuras 5.16 e 5.17 ilustram o desenvolvimento dos volumes de abastecimento, armazenamento e infiltração, durante as fases de alimentação e recessão, para os Solos 1 e 2, respectivamente.

O acompanhamento do perfil de umidade durante a fase de redistribuição é apresentado nas Tabelas 5.9 e 5.10. Para efeito de visualização, os dados apresentados nas tabelas foram interpolados com o auxílio da ferramenta Idrisi e são apresentados nas Figuras 5.18 e 5.19.

Tabela 5.6 - Variação do volume na trincheira durante a alimentação e recessão - Solo 1

t (min)	Na _{trinch} (cm)	Vol. Aduzido m³	Vol na Trincheira (m³)	Vol. Infiltrado m³	Q _{Inf} (m³/s)	I (m³/s/m²) Observado	I (m³/s/m²) Calculado
0	0,11	-	0,00215	-	-	-	-
1	1,71	0,08808	0,03429	0,05378	0,00093	0,00043	0,00024
2	3,72	0,12911	0,07447	0,05464	0,00001	0,00001	0,00021
3	4,87	0,17015	0,09743	0,07272	0,00030	0,00012	0,00019
4	6,02	0,20727	0,12039	0,08688	0,00024	0,00009	0,00018
5	7,11	0,24439	0,14220	0,10219	0,00026	0,00010	0,00016
6	8,20	0,27563	0,16402	0,11161	0,00016	0,00006	0,00015
7	9,35	0,30491	0,18698	0,11793	0,00011	0,00004	0,00014
8	10,50	0,36555	0,20994	0,15561	0,00063	0,00021	0,00013
9	12,28	0,42814	0,24552	0,18262	0,00045	0,00014	0,00012
10	14,00	0,48682	0,27996	0,20686	0,00040	0,00012	0,00011
15	21,80	0,71945	0,43609	0,28336	0,00015	0,00004	0,00009
20	28,41	0,97168	0,56811	0,40357	0,00044	0,00010	0,00008
25	35,24	1,22545	0,70472	0,52072	0,00041	0,00008	0,00007
30	41,78	1,48513	0,83560	0,64954	0,00041	0,00007	0,00007
35	47,41	1,72819	0,94810	0,78009	0,00047	0,00008	0,00006
40	52,11	1,96693	1,04224	0,92469	0,00046	0,00007	0,00006
45	56,24	2,19670	1,12489	1,07181	0,00051	0,00007	0,00006
50	59,69	2,41794	1,19377	1,22417	0,00054	0,00007	0,00006
55	62,62	2,63717	1,25232	1,38485	0,00049	0,00006	0,00006
60	65,08	2,84990	1,30168	1,54822	0,00054	0,00007	0,00006
65	67,15	3,05197	1,34301	1,70896	0,00057	0,00007	0,00006
70	68,82	3,25260	1,37630	1,87630	0,00057	0,00007	0,00006
75	68,59	3,45440	1,37171	2,08269	0,00048	0,00006	0,00006
80	61,30		1,22592	2,22849	0,00048	0,00006	0,00006
85	54,92		1,09849	2,35592	0,00042	0,00006	0,00006
90	48,73		0,97450	2,47990	0,00038	0,00006	0,00006
95	43,39		0,86774	2,58666	0,00036	0,00006	0,00006
100	38,28		0,76557	2,68884	0,00034	0,00006	0,00006
105	33,63		0,67258	2,78182	0,00031	0,00006	0,00006
110	29,21		0,58418	2,87022	0,00029	0,00006	0,00006
115	25,31		0,50612	2,94828	0,00027	0,00006	0,00006
120	21,69		0,43380	3,02061	0,00025	0,00006	0,00006
125	18,42		0,36836	3,08604	0,00021	0,00006	0,00006
130	15,38		0,30752	3,14689	0,00021	0,00006	0,00006
135	12,51		0,25012	3,20429	0,00019	0,00006	0,00006
140	9,81		0,19616	3,25824	0,00017	0,00006	0,00006
145	7,28		0,14565	3,30876	0,00017	0,00006	0,00006
150	4,99		0,09973	3,35468	0,00015	0,00006	0,00006
155	2,98		0,05955	3,39486	0,00013	0,00006	0,00006
160	1,20		0,02396	3,43044	0,00011	0,00005	0,00006
161	0,80		0,01592	3,43848	0,00013	0,00006	0,00006
162	0,45		0,00904	3,44537	0,00011	0,00006	0,00006
163	0,16		0,00330	3,45111	0,00010	0,00005	0,00006

Tabela 5.7 - Variação do volume na trincheira durante a alimentação e recessão - Solo 2

t (min)	Na _{trinch} (cm)	Vol. Aduzido m ³	Vol. Na Trincheira (m ³)	Vol. Infiltrado m ³	Q _i (m ³ /s)	I (m ³ /s/m ²) Observado	I (m ³ /s/m ²) Calculado
0	0,00	-	0,00000	-	-	-	-
1	1,15	0,06597	0,02300	0,04297	0,00072	0,00034	0,00048
2	2,30	0,15607	0,04600	0,11007	0,00112	0,00051	0,00037
3	4,05	0,23874	0,08100	0,15774	0,00079	0,00034	0,00030
4	5,80	0,31956	0,11600	0,20356	0,00076	0,00030	0,00024
5	7,20	0,37810	0,14400	0,23410	0,00051	0,00019	0,00019
6	8,60	0,41436	0,17200	0,24236	0,00014	0,00005	0,00016
7	10,44	0,45433	0,20877	0,24556	0,00005	0,00002	0,00014
8	12,28	0,50544	0,24555	0,25990	0,00024	0,00008	0,00012
9	14,08	0,55656	0,28165	0,27491	0,00025	0,00008	0,00011
10	15,94	0,60767	0,31885	0,28882	0,00023	0,00007	0,00010
15	24,37	0,85767	0,48732	0,37034	0,00034	0,00008	0,00007
20	32,02	1,11509	0,64048	0,47461	0,00047	0,00010	0,00007
25	38,64	1,37437	0,77286	0,60151	0,00045	0,00008	0,00007
30	44,44	1,63364	0,88882	0,74482	0,00044	0,00007	0,00007
35	49,64	1,89478	0,99275	0,90203	0,00063	0,00010	0,00007
40	54,10	2,14663	1,08200	1,06463	0,00058	0,00008	0,00007
45	58,25	2,38734	1,16500	1,22234	0,00057	0,00008	0,00007
50	61,40	2,64477	1,22800	1,41677	0,00068	0,00009	0,00007
55	64,40	2,90219	1,28800	1,61419	0,00075	0,00010	0,00007
60	66,70	3,12991	1,33400	1,79591	0,00067	0,00008	0,00007
65	68,80	3,36691	1,37600	1,99091	0,00069	0,00008	0,00007
70	68,60	3,60240	1,37200	2,23040	0,00047	0,00006	0,00007
75	59,15		1,18300	2,41940	0,00058	0,00008	0,00007
80	51,40		1,02800	2,57440	0,00048	0,00007	0,00007
85	44,75		0,89500	2,70740	0,00038	0,00006	0,00007
90	39,00		0,78000	2,82240	0,00037	0,00007	0,00007
95	34,00		0,68000	2,92240	0,00033	0,00007	0,00007
100	29,60		0,59200	3,01040	0,00027	0,00006	0,00007
105	26,20		0,52400	3,07840	0,00020	0,00005	0,00007
110	23,00		0,46000	3,14240	0,00022	0,00005	0,00007
115	19,80		0,39600	3,20640	0,00020	0,00005	0,00007
120	16,90		0,33800	3,26440	0,00018	0,00005	0,00007
125	14,40		0,28800	3,31440	0,00017	0,00005	0,00007
130	11,90		0,23800	3,36440	0,00017	0,00005	0,00007
135	9,65		0,19300	3,40940	0,00015	0,00005	0,00007
140	7,60		0,15200	3,45040	0,00013	0,00005	0,00007
145	5,75		0,11500	3,48740	0,00012	0,00005	0,00007
150	3,80		0,07600	3,52640	0,00013	0,00006	0,00007
155	1,90		0,03800	3,56440	0,00013	0,00006	0,00007
160	0,00		0,00000	3,60240	0,00012	0,00006	0,00007

Tabela 5.8 – Ajuste do modelo de infiltração horizontal de Philip para os Solos 1 e 2

	C (m ³ /s/m ²)
Solo 1	0,00571
Solo 2	0,00698

Figura 5.14 - Ajuste dos dados de infiltração ao modelo de infiltração horizontal de Philip - Solo 1

Figura 5.15 – Ajuste dos dados de infiltração ao modelo de infiltração horizontal de Philip - Solo 2

Embora seja um processo eminentemente tridimensional, a infiltração na trincheira, especialmente após os primeiros vinte a trinta minutos de irrigação apresentou volumes infiltrados próximos aos fornecidos pelo modelo de Philip. A variação observada nos primeiros dez minutos, tanto para o Solo 1 quanto para o Solo 2, é devida, provavelmente, ao fato de que, nos primeiros instantes, até que se forme uma lâmina d'água homogênea em toda a trincheira, a simplificação bidimensional de se trabalhar com as leituras de nível

na seção central da trincheira exerce grande influência na determinação do volume total infiltrado em toda a trincheira.

Figura 5.16 - Volumes de entrada, armazenamento e infiltração - Solo 1

Figura 5.17 - Volumes de entrada, armazenamento e infiltração - Solo 2

As Figuras 5.16 e 5.17 ilustram que o comportamento de recessão do escoamento foi semelhante nos dois solos, atingindo lâmina d'água igual a zero após aproximadamente 160 minutos, para volumes de alimentação de $3,5 m^3$ em 75 minutos de adução.

Tabela 5.9 - Acompanhamento da redistribuição - Solo 1 - Valores de umidade

Acompanhamento da Redistribuição - Solo 1

1.ª Medição:									
Data:	07/08/02	Hora:	(antes da irrigação)				Contagem Padrão:		5746
	Tubo A		Tubo B		Tubo C		Tubo D		
Prof.	C	Ø%	C	Ø%	C	Ø%	C	Ø%	
5			2171	3,75	3092	7,36	3463	8,82	
25			6891	22,25	7773	25,71	7742	25,58	
50			7737	25,56	7350	24,05	7148	23,26	
75	3684	9,68	8148	27,17	7871	26,09	6430	20,44	
100	9105	30,92	8619	29,02	8236	27,52	7315	23,91	
125	9576	32,77	8986	30,46	8465	28,42	7944	26,38	
150	9827	33,75	9318	31,76	8896	30,11	8404	28,18	
175	10160	35,06	8537	28,70	9109	30,94	8639	29,10	

2.ª Medição:									
Data:	07/08/02	Hora:	t=0h				Contagem Padrão:		5746
	Tubo A		Tubo B		Tubo C		Tubo D		
Prof.	C	Ø%	C	Ø%	C	Ø%	C	Ø%	
5			2742	5,99	2495	5,02	3367	8,44	
25			9006	30,54	8295	27,75	7517	24,70	
50			9673	33,15	9655	33,08	7583	24,96	
75	8388	28,11	11302	39,53	10482	36,32	8525	28,65	
100	11898	41,87	11629	40,81	10743	37,34	10030	34,55	
125	11918	41,95	12059	42,50	11021	38,43	10542	36,56	
150	11992	42,24	12119	42,74	11360	39,76	10816	37,63	
175	12310	43,48	12130	42,78	11573	40,60	10938	38,11	

3.ª Medição:									
Data:	07/08/02	Hora:	t=1h				Contagem Padrão:		5746
	Tubo A		Tubo B		Tubo C		Tubo D		
Prof.	C	Ø%	C	Ø%	C	Ø%	C	Ø%	
5			2643	5,60	3208	7,82	3201	7,79	
25			8636	29,09	8387	28,11	7621	25,11	
50			9689	30,86	9571	32,75	7686	25,36	
75	4905	14,47	10505	36,41	9844	33,82	8494	28,53	
100	10448	36,19	10931	38,08	10333	35,74	9923	34,13	
125	11163	38,99	11285	39,47	10691	37,14	10248	35,40	
150	11229	39,25	11541	40,47	10944	38,13	10769	37,44	
175	11525	40,41	11637	40,85	11200	39,13	10889	37,92	

4.ª Medição:									
Data:	07/08/02	Hora:	t=2h				Contagem Padrão:		5746
	Tubo A		Tubo B		Tubo C		Tubo D		
Prof.	C	Ø%	C	Ø%	C	Ø%	C	Ø%	
5			2433	4,78	3123	7,48	3296	8,16	
25			8943	30,29	8616	29,01	7727	25,52	
50			8705	29,36	9356	31,91	7764	25,67	
75	4736	13,80	9948	34,23	9528	32,58	8637	29,09	
100	10364	35,86	10357	35,83	9961	34,28	9733	33,39	
125	11006	38,37	10765	37,43	10258	35,44	9986	34,38	
150	10933	38,09	11138	38,89	10735	37,31	10550	36,59	
175	11265	39,39	11225	39,23	11032	38,48	10652	36,99	

5.ª Medição:									
Data:	07/08/02	Hora:	t=3:30h				Contagem Padrão:		5746
	Tubo A		Tubo B		Tubo C		Tubo D		
Prof.	C	Ø%	C	Ø%	C	Ø%	C	Ø%	
5			2361	4,50	3188	7,74	3040	7,16	
25			8624	29,04	8723	29,43	7681	25,34	
50			8546	28,73	9048	30,70	7682	25,35	
75	4673	13,56	9447	32,26	9364	31,94	8431	28,28	
100	9976	34,34	10007	34,46	9525	32,57	9431	32,20	
125	10490	36,35	10266	35,47	9885	33,98	9673	33,15	
150	10613	36,83	10692	37,14	10393	35,97	10322	35,69	
175	11172	39,02	10980	38,27	10835	37,70	10443	36,17	

6.ª Medição:									
Data:	07/08/02	Hora:	t=5h				Contagem Padrão:		5746
	Tubo A		Tubo B		Tubo C		Tubo D		
Prof.	C	Ø%	C	Ø%	C	Ø%	C	Ø%	
5			2258	4,09	3196	7,77	2984	6,94	
25			8598	28,94	8767	29,60	7751	25,62	
50			8404	28,18	9040	30,67	7795	25,79	
75	4670	13,55	9403	32,09	9043	30,68	8350	27,97	
100	9850	33,84	9727	33,36	9377	31,99	9300	31,69	
125	10068	34,70	9956	34,26	9554	32,68	9633	32,99	
150	10546	36,57	10500	36,39	10193	35,19	10151	35,02	
175	11072	38,63	10711	37,22	10418	36,07	10500	36,78	

7.ª Medição:									
Data:	08/08/02	Hora:	t=24h				Contagem Padrão:		5821
	Tubo A		Tubo B		Tubo C		Tubo D		
Prof.	C	Ø%	C	Ø%	C	Ø%	C	Ø%	
5			2220	3,83	2782	6,01	2799	6,07	
25			8261	27,20	8958	29,90	7927	25,91	
50			7851	25,61	8646	28,69	7640	24,80	
75	4367	12,14	8877	29,58	8675	28,80	8097	26,57	
100	8911	29,71	9014	30,11	8810	29,32	8994	30,04	
125	9308	31,25	9219	30,91	9078	30,36	9183	30,77	
150	9694	32,74	9564	32,24	9221	30,91	9217	30,90	
175	10402	35,48	9839	33,30	9876	33,45	9864	33,40	

8.ª Medição:									
Data:	09/08/02	Hora:	t=48h				Contagem Padrão:		5831
	Tubo A		Tubo B		Tubo C		Tubo D		
Prof.	C	Ø%	C	Ø%	C	Ø%	C	Ø%	
5			2190	3,70	2770	5,94	2732	5,80	
25			8132	26,65	8909	29,65	7872	25,64	
50			7762	25,22	8489	28,03	7508	24,24	
75	4207	11,49	8346	27,47	8347	27,48	7961	25,99	
100	8821	29,31	8734	28,97	8219	26,98	8663	28,70	
125	9299	31,15	8783	29,16	8546	28,25	8701	28,84	
150	9387	31,49	8959	29,84	8977	29,91	9133	30,51	
175	9938	33,62	9553	32,13	9440	31,70	9605	32,34	

9.ª Medição:									
Data:	12/08/02	Hora:	t=120h				Contagem Padrão:		5872
	Tubo A		Tubo B		Tubo C		Tubo D		
Prof.	C	Ø%	C	Ø%	C	Ø%	C	Ø%	
5			2112	3,34	2596	5,20	2630	5,33	
25			7858	25,38	8755	28,82	7760	25,00	
50			7388	23,58	8307	27,10	7239	23,00	
75	4144	11,14	8048	26,11	8013	25,97	7659	24,61	
100	8422	27,54	8400	27,46	8178	26,60	8238	26,83	
125	8809	29,02	8457	27,67	8459	27,68	8479	27,76	
150	9062	29,99	8765	28,86	8649	28,41	8814	29,04	
175	9234	30,65	9302	30,91	9073	30,04	9034	29,89

Tabela 5.10 - Acompanhamento da redistribuição - Solo 2 - Valores de umidade

Acompanhamento da Redistribuição - Solo 2									
1.ª Medição:									
Data:	24/07/02	Hora:	(antes da adução)				Contagem Padrão:		
			Tubo E		Tubo F		Tubo G		Tubo H
Prof.	C	Ø%	C	Ø%	C	Ø%	C	Ø%	C
5			2713	8,05	2955	8,46	3312	9,07	
25			7272	15,84	7679	16,54	7576	16,36	
50			7216	15,75	8135	17,32	7962	17,02	
75	4400	10,93	8233	17,49	8392	17,76	8107	17,27	
100	8308	17,61	8656	18,21	8440	17,84	8259	17,53	
125	8832	18,51	9165	19,08	8672	18,24	8630	18,17	
150	9325	19,35	9207	19,15	9246	19,22	8842	18,53	
175	10068	20,62	9513	19,68	9310	19,33	9265	19,25	
2.ª Medição:									
Data:	24/07/02	Hora:	t=0				Contagem Padrão:		
			Tubo E		Tubo F		Tubo G		Tubo H
Prof.	C	Ø%	C	Ø%	C	Ø%	C	Ø%	C
5			2700	8,02	3092	8,69	3295	9,04	
25			8923	18,67	8083	17,23	7581	16,37	
50			10044	20,58	9408	19,50	8849	18,54	
75	10910	22,06	11276	22,69	10182	20,82	9114	18,99	
100	12137	24,16	11703	23,42	10723	21,74	9519	19,69	
125	12170	24,22	11983	23,90	10813	21,90	9815	20,19	
150	12239	24,34	12065	24,04	11027	22,26	10030	20,56	
175	12380	24,58	12170	24,22	12547	24,86	10297	21,02	
3.ª Medição:									
Data:	24/07/02	Hora:	t=1h				Contagem Padrão:		
			Tubo E		Tubo F		Tubo G		Tubo H
Prof.	C	Ø%	C	Ø%	C	Ø%	C	Ø%	C
5			2756	8,12	3094	8,54	3230	8,93	
25			8466	17,88	8083	17,23	7525	16,28	
50			8875	18,58	9004	18,80	8730	18,34	
75	5869	13,44	10053	20,60	9604	19,83	8941	18,70	
100	10565	21,47	10473	21,32	9929	20,39	9261	19,24	
125	10900	22,05	10915	22,07	10187	20,83	9749	20,08	
150	11095	22,38	11172	22,51	10607	21,55	9920	20,37	
175	11817	23,62	11637	23,31	11812	23,61	10240	20,92	
4.ª Medição:									
Data:	24/07/02	Hora:	t=2h				Contagem Padrão:		
			Tubo E		Tubo F		Tubo G		Tubo H
Prof.	C	Ø%	C	Ø%	C	Ø%	C	Ø%	C
5			2774	8,15	3010	8,55	3211	8,90	
25			8362	17,71	7993	17,08	7517	16,26	
50			8642	18,19	8896	18,62	8628	18,16	
75	5636	13,04	9581	19,79	9569	19,77	8884	18,60	
100	10003	20,51	10234	20,91	9759	20,10	9210	19,16	
125	10441	21,26	10357	21,12	9990	20,49	9624	19,87	
150	10807	21,89	10848	21,96	10213	20,87	9882	20,31	
175	11650	23,33	11610	23,26	11277	22,69	10015	20,53	
5.ª Medição:									
Data:	24/07/02	Hora:	t=3:30h				Contagem Padrão:		
			Tubo E		Tubo F		Tubo G		Tubo H
Prof.	C	Ø%	C	Ø%	C	Ø%	C	Ø%	C
5			2728	8,07	3036	8,60	3191	8,86	
25			8100	17,26	8013	17,11	7429	16,11	
50			8422	17,81	8705	18,29	8417	17,80	
75	5576	12,94	9416	19,51	9407	19,49	8790	18,44	
100	9850	20,25	10030	20,56	9592	19,81	9091	18,95	
125	10124	20,72	10120	20,71	9836	20,23	9476	19,61	
150	10514	21,39	10413	21,21	10083	20,65	9813	20,19	
175	11222	22,60	11042	22,29	10783	21,85	9917	20,37	
6.ª Medição:									
Data:	24/07/02	Hora:	t=5h				Contagem Padrão:		
			Tubo E		Tubo F		Tubo G		Tubo H
Prof.	C	Ø%	C	Ø%	C	Ø%	C	Ø%	C
5			2746	8,10	3051	8,62	3218	8,91	
25			8060	17,19	8041	17,16	7386	16,04	
50			8306	17,61	8591	18,10	8368	17,72	
75	5377	12,60	9376	19,44	9326	19,36	8760	18,39	
100	9703	20,00	9926	20,38	9508	19,67	9121	19,00	
125	10073	20,63	10088	20,66	9758	20,09	9402	19,49	
150	10417	21,22	10370	21,14	10018	20,54	9778	20,13	
175	11163	22,50	11037	22,28	10725	21,75	9832	20,22	
7.ª Medição:									
Data:	25/07/02	Hora:	t=24h				Contagem Padrão:		
			Tubo E		Tubo F		Tubo G		Tubo H
Prof.	C	Ø%	C	Ø%	C	Ø%	C	Ø%	C
5			2633	7,95	3047	8,66	3176	8,88	
25			7845	16,93	8010	17,21	7327	16,04	
50			8069	17,21	8467	18,00	8220	17,58	
75	5052	12,12	8903	18,75	8844	18,65	8493	18,05	
100	9134	19,15	9309	19,45	9012	18,94	8525	18,10	
125	9426	19,66	9720	20,16	9341	19,51	9018	18,95	
150	9982	20,61	9794	20,29	9797	20,30	9271	19,39	
175	10700	21,85	10424	21,38	9916	20,50	9643	20,03	
8.ª Medição:									
Data:	26/07/02	Hora:	t=48h				Contagem Padrão:		
			Tubo E		Tubo F		Tubo G		Tubo H
Prof.	C	Ø%	C	Ø%	C	Ø%	C	Ø%	C
5			2615	7,92	3028	8,64	3169	8,88	
25			7675	16,67	8013	17,25	7320	16,05	
50			7745	16,79	8340	17,82	8068	17,35	
75	4857	11,80	8436	17,98	8681	18,40	8251	17,66	
100	8742	18,51	9155	19,22	8653	18,36	8493	18,08	
125	9118	19,16	9300	19,47	9010	18,97	8907	18,80	
150	9659	20,09	9506	19,83	9243	19,38	9270	19,42	
175	10375	21,33	9934	20,57	9742	20,24	9250	19,39	
9.ª Medição:									
Data:	29/07/02	Hora:	t=120h (5 dias)				Contagem Padrão:		
			Tubo E		Tubo F		Tubo G		Tubo H
Prof.	C	Ø%	C	Ø%	C	Ø%	C	Ø%	C
5			2559	7,81	2968	8,51	2929	8,45	
25			7228	15,85	7981	17,14	7374	16,10	
50			7308	15,98	8085	17,32	7827	16,88	
75	4312	10,83	8336	17,75	8230	17,57	8055	17,27	
100	8472	17,99	8822	18,59	8439	17,93	8297	17,69	
125	8852	18,64	9227	19,29	8747	18,46	8535	18,09	
150	9385	19,56	9352	19,50	8843	18,62	8885	18,70	
175	10067	20,73	9697	20,09	9549	19,84	9249	19,32	

larg./prof. (cm)	0	30	60	90	60	30	0
5	8,82	7,36	3,75		3,75	7,36	8,82
25	25,58	25,71	22,25		22,25	25,71	25,58
50	23,26	24,05	25,56		25,56	24,05	23,26
75	20,44	26,09	27,17	9,68	27,17	26,09	20,44
100	23,91	27,52	29,02	30,92	29,02	27,52	23,91
125	26,38	28,42	30,46	32,77	30,46	28,42	26,38
150	28,18	30,11	31,76	33,75	31,76	30,11	28,18
175	29,10	30,94	28,70	35,06	28,70	30,94	29,10

Figura 5.18a - Perfil de umidade observado antes da alimentação - Solo1

larg./prof. (cm)	0	30	60	90	60	30	0
5	8,44	5,02	5,99		5,99	5,02	8,44
25	24,70	27,75	30,54		30,54	27,75	24,70
50	24,96	33,08	33,15		33,15	33,08	24,96
75	28,65	36,32	39,53	28,11	39,53	36,32	28,65
100	34,55	37,34	40,81	41,87	40,81	37,34	34,55
125	36,56	38,43	42,50	41,95	42,50	38,43	36,56
150	37,63	39,76	42,74	42,24	42,74	39,76	37,63
175	38,11	40,60	42,78	43,48	42,78	40,60	38,11

Figura 5.18b - Perfil de umidade observado no instante $t=0$ da redistribuição - Solo1

larg./prof. (cm)	0	30	60	90	60	30	0
5	7,79	7,82	5,60		5,60	7,82	7,79
25	25,11	28,11	29,09		29,09	28,11	25,11
50	25,36	32,75	30,86		30,86	32,75	25,36
75	28,53	33,82	36,41	14,47	36,41	33,82	28,53
100	34,13	35,74	38,08	36,19	38,08	35,74	34,13
125	35,40	37,14	39,47	38,99	39,47	37,14	35,40
150	37,44	38,13	40,47	39,25	40,47	38,13	37,44
175	37,92	39,13	40,85	40,41	40,85	39,13	37,92

Figura 5.18c - Perfil de umidade observado no instante $t=1h$ da redistribuição - Solo1

larg./prof. (cm)	0	30	60	90	60	30	0
5	8,16	7,48	4,78		4,78	7,48	8,16
25	25,52	29,01	30,29		30,29	29,01	25,52
50	25,67	31,91	29,36		29,36	31,91	25,67
75	29,09	32,58	34,23	13,80	34,23	32,58	29,09
100	33,39	34,28	35,83	35,86	35,83	34,28	33,39
125	34,38	35,44	37,43	38,37	37,43	35,44	34,38
150	36,59	37,31	38,89	38,09	38,89	37,31	36,59
175	36,99	38,48	39,23	39,39	39,23	38,48	36,99

Figura 5.18d - Perfil de umidade observado no instante $t=2h$ da redistribuição - Solo1

larg./prof. (cm)	0	30	60	90	60	30	0
5	7,16	7,74	4,50		4,50	7,74	7,16
25	25,34	29,43	29,04		29,04	29,43	25,34
50	25,35	30,70	28,73		28,73	30,70	25,35
75	28,28	31,94	32,26	13,56	32,26	31,94	28,28
100	32,20	32,57	34,46	34,34	34,46	32,57	32,20
125	33,15	33,98	35,47	36,35	35,47	33,98	33,15
150	35,69	35,97	37,14	36,83	37,14	35,97	35,69
175	36,17	37,70	38,27	39,02	38,27	37,70	36,17

Figura 5.18e - Perfil de umidade observado no instante $t=3:30h$ da redistribuição - Solo1

larg./prof. (cm)	0	30	60	90	60	30	0
5	6,94	7,77	4,09		4,09	7,77	6,94
25	25,62	29,60	28,94		28,94	29,60	25,62
50	25,79	30,67	28,18		28,18	30,67	25,79
75	27,97	30,68	32,09	13,55	32,09	30,68	27,97
100	31,69	31,99	33,36	33,84	33,36	31,99	31,69
125	32,99	32,68	34,26	34,70	34,26	32,68	32,99
150	35,02	35,19	36,39	36,57	36,39	35,19	35,02
175	36,78	36,07	37,22	38,63	37,22	36,07	36,78

Figura 5.18f - Perfil de umidade observado no instante $t=5h$ da redistribuição - Solo1

larg./prof. (cm)	0	30	60	90	60	30	0
5	6,07	6,01	3,83		3,83	6,01	6,07
25	25,91	29,90	27,20		27,20	29,90	25,91
50	24,80	28,69	25,61		25,61	28,69	24,80
75	26,57	28,80	29,58	12,14	29,58	28,80	26,57
100	30,04	29,32	30,11	29,71	30,11	29,32	30,04
125	30,77	30,36	30,91	31,25	30,91	30,36	30,77
150	30,90	30,91	32,24	32,74	32,24	30,91	30,90
175	33,40	33,45	33,30	35,48	33,30	33,45	33,40

Figura 5.18g - Perfil de umidade observado no instante t=24h da redistribuição - Solo1

larg./prof. (cm)	0	30	60	90	60	30	0
5	5,80	5,94	3,70		3,70	5,94	5,80
25	25,64	29,65	26,65		26,65	29,65	25,64
50	24,24	28,03	25,22		25,22	28,03	24,24
75	25,99	27,48	27,47	11,49	27,47	27,48	25,99
100	28,70	26,98	28,97	29,31	28,97	26,98	28,70
125	28,84	28,25	29,16	31,15	29,16	28,25	28,84
150	30,51	29,91	29,84	31,49	29,84	29,91	30,51
175	32,34	31,70	32,13	33,62	32,13	31,70	32,34

Figura 5.18h - Perfil de umidade observado no instante t=48h da redistribuição - Solo1

larg./prof. (cm)	0	30	60	90	60	30	0
5	5,33	5,20	3,34		3,34	5,20	5,33
25	25,00	28,82	25,38		25,38	28,82	25,00
50	23,00	27,10	23,58		23,58	27,10	23,00
75	24,61	25,97	26,11	11,14	26,11	25,97	24,61
100	26,83	26,60	27,46	27,54	27,46	26,60	26,83
125	27,76	27,68	27,67	29,02	27,67	27,68	27,76
150	29,04	28,41	28,86	29,99	28,86	28,41	29,04
175	29,89	30,04	30,91	30,65	30,91	30,04	29,89

Figura 5.18i - Perfil de umidade observado no instante t=120h da redistribuição - Solo1

larg./prof. (cm)	0	30	60	90	60	30	0
5	9,07	8,46	8,05		8,05	8,46	9,07
25	16,36	16,54	15,84		15,84	16,54	16,36
50	17,02	17,32	15,75		15,75	17,32	17,02
75	17,27	17,76	17,49	10,93	17,49	17,76	17,27
100	17,53	17,84	18,21	17,61	18,21	17,84	17,53
125	18,17	18,24	19,08	18,51	19,08	18,24	18,17
150	18,53	19,22	19,15	19,35	19,15	19,22	18,53
175	19,25	19,33	19,68	20,62	19,68	19,33	19,25

Figura 5.19a - Perfil de umidade observado antes da alimentação - Solo2

larg./prof. (cm)	0	30	60	90	60	30	0
5	9,04	8,69	8,02		8,02	8,69	9,04
25	16,37	17,23	18,67		18,67	17,23	16,37
50	18,54	19,50	20,58		20,58	19,50	18,54
75	18,99	20,82	22,69	22,06	22,69	20,82	18,99
100	19,69	21,74	23,42	24,16	23,42	21,74	19,69
125	20,19	21,90	23,90	24,22	23,90	21,90	20,19
150	20,56	22,26	24,04	24,34	24,04	22,26	20,56
175	21,02	24,86	24,22	24,58	24,22	24,86	21,02

Figura 5.19b - Perfil de umidade observado no instante t=0 da redistribuição - Solo2

larg./prof. (cm)	0	30	60	90	60	30	0
5	8,93	8,54	8,12		8,12	8,54	8,93
25	16,28	17,23	17,88		17,88	17,23	16,28
50	18,34	18,80	18,58		18,58	18,80	18,34
75	18,70	19,83	20,60	13,44	20,60	19,83	18,70
100	19,24	20,39	21,32	21,47	21,32	20,39	19,24
125	20,08	20,83	22,07	22,05	22,07	20,83	20,08
150	20,37	21,55	22,51	22,38	22,51	21,55	20,37
175	20,92	23,61	23,31	23,62	23,31	23,61	20,92

Figura 5.19c - Perfil de umidade observado no instante t=1h da redistribuição - Solo2

larg./prof. (cm)	0	30	60	90	60	30	0
5	8,90	8,55	8,15		8,15	8,55	8,90
25	16,26	17,08	17,71		17,71	17,08	16,26
50	18,16	18,62	18,19		18,19	18,62	18,16
75	18,60	19,77	19,79	13,04	19,79	19,77	18,60
100	19,16	20,10	20,91	20,51	20,91	20,10	19,16
125	19,87	20,49	21,12	21,26	21,12	20,49	19,87
150	20,31	20,87	21,96	21,89	21,96	20,87	20,31
175	20,53	22,69	23,26	23,33	23,26	22,69	20,53

Figura 5.19d - Perfil de umidade observado no instante t=2h da redistribuição - Solo2

larg./prof. (cm)	0	30	60	90	60	30	0
5	8,86	8,60	8,07		8,07	8,60	8,86
25	16,11	17,11	17,26		17,26	17,11	16,11
50	17,80	18,29	17,81		17,81	18,29	17,80
75	18,44	19,49	19,51	12,94	19,51	19,49	18,44
100	18,95	19,81	20,56	20,25	20,56	19,81	18,95
125	19,61	20,23	20,71	20,72	20,71	20,23	19,61
150	20,19	20,65	21,21	21,39	21,21	20,65	20,19
175	20,37	21,85	22,29	22,60	22,29	21,85	20,37

Figura 5.19e - Perfil de umidade observado no instante t=3:30h da redistribuição - Solo2

larg./prof. (cm)	0	30	60	90	60	30	0
5	8,91	8,62	8,10		8,10	8,62	8,91
25	16,04	17,16	17,19		17,19	17,16	16,04
50	17,72	18,10	17,61		17,61	18,10	17,72
75	18,39	19,36	19,44	12,60	19,44	19,36	18,39
100	19,00	19,67	20,38	20,00	20,38	19,67	19,00
125	19,49	20,09	20,66	20,63	20,66	20,09	19,49
150	20,13	20,54	21,14	21,22	21,14	20,54	20,13
175	20,22	21,75	22,28	22,50	22,28	21,75	20,22

Figura 5.19f - Perfil de umidade observado no instante t=5h da redistribuição - Solo2

larg./prof. (cm)	0	30	60	90	60	30	0
5	8,88	8,66	7,95		7,95	8,66	8,88
25	16,04	17,21	16,93		16,93	17,21	16,04
50	17,58	18,00	17,21		17,21	18,00	17,58
75	18,05	18,65	18,75	12,12	18,75	18,65	18,05
100	18,10	18,94	19,45	19,15	19,45	18,94	18,10
125	18,95	19,51	20,16	19,66	20,16	19,51	18,95
150	19,39	20,30	20,29	20,61	20,29	20,30	19,39
175	20,03	20,50	21,38	21,85	21,38	20,50	20,03

Figura 5.19g - Perfil de umidade observado no instante t=24h da redistribuição - Solo2

larg./prof. (cm)	t=48h						
	0	30	60	90	60	30	0
5	8,88	8,64	7,92		7,92	8,64	8,88
25	16,05	17,25	16,67		16,67	17,25	16,05
50	17,35	17,82	16,79		16,79	17,82	17,35
75	17,66	18,40	17,98	11,80	17,98	18,40	17,66
100	18,08	18,36	19,22	18,51	19,22	18,36	18,08
125	18,80	18,97	19,47	19,16	19,47	18,97	18,80
150	19,42	19,38	19,83	20,09	19,83	19,38	19,42
175	19,39	20,24	20,57	21,33	20,57	20,24	19,39

Figura 5.19h - Perfil de umidade observado no instante t=48h da redistribuição - Solo2

larg./prof. (cm)	t=120h						
	0	30	60	90	60	30	0
5	8,45	8,51	7,81		7,81	8,51	8,45
25	16,10	17,14	15,85		15,85	17,14	16,10
50	16,88	17,32	15,98		15,98	17,32	16,88
75	17,27	17,57	17,75	10,83	17,75	17,57	17,27
100	17,69	17,93	18,59	17,99	18,59	17,93	17,69
125	18,09	18,46	19,29	18,64	19,29	18,46	18,09
150	18,70	18,62	19,50	19,56	19,50	18,62	18,70
175	19,32	19,84	20,09	20,73	20,09	19,84	19,32

Figura 5.19i - Perfil de umidade observado no instante t=120h da redistribuição - Solo2

Para efeito de visualização, os valores de umidade apresentados nas Figuras 5.18 e 5.19 foram interpolados, com o auxílio do software Idrisi, e são apresentados nas Figuras 5.20a-i.

Figura 5.20a - Campo de umidade antes da irrigação

Figura 5.20b - Campo de umidade em $t=0$ (início da redistribuição)

Figura 5.20c - Campo de umidade em $t=1h$

Figura 5.20d - Campo de umidade em $t=2h$

Figura 5.20e - Campo de umidade em $t=3:30h$

Figura 5.20f - Campo de umidade em $t=5h$

Figura 5.20g - Campo de umidade em $t=24h$

Figura 5.20h - Campo de umidade em $t=48h$

Figura 5.20i - Campo de umidade em $t=120h$

Os campos de iso-umidade são apresentados nas Figuras 5.20a-i, em que são visualizadas as mudanças temporais na distribuição da umidade em torno da trincheira durante e após a aplicação de água.

Observa-se que, no início, o solo se encontrava relativamente seco nas superfícies expostas da trincheira (tanto o terreno quanto as laterais internas da trincheira). Logo após a infiltração, ou seja, no início da redistribuição, a porção mais umedecida do solo concentrava-se mais abaixo do fundo da trincheira do que nos lados.

Em aproximadamente 2 horas, a maior parte da água infiltrada já tinha se afastado do “campo de visão” da sonda de nêutrons (profundidade 1,70 m). Observa-se ainda, pela comparação do andamento da redistribuição da água infiltrada nos dois solos, que a matriz no fundo da trincheira, no caso do Solo 2 (areia média), conforme era de se esperar, drena

mais rapidamente do que no caso do Solo 1 (areia fina). Tal fato fica mais evidente nas Figuras 5.20 c e d.

5.3. Simulação numérica

Foram realizadas as simulações A e B, descritas no item 4.2.1, para os solos 1 e 2. Os resultados das simulações são apresentados em duas partes: a primeira, referente às fases de alimentação e recessão, em que se obteve dados de nível d'água na trincheira e volume infiltrado, apresentados nas Tabelas 5.11 (simulação A) e 5.12 (simulação B), e nas Figuras 5.25 e 5.26 (simulação A) e 5.31 e 5.32 (simulação B), e a segunda, referente à fase de redistribuição, em que se obteve os perfis de umidade ao redor das trincheiras, apresentados nas Figuras 5.27 e 5.28 (Simulação A) e 5.33 e 5.37 (Simulação B).

5.3.1. Simulação A

As simulações para os Solos 1 e 2 foram realizadas utilizando as mesmas vazões dos experimentos de campo, ou seja, $Q = 770 \text{ cm}^3/\text{s}$ para o Solo 1 e $Q = 860 \text{ cm}^3/\text{s}$ para o Solo 2, sendo que, em ambos, o tempo de alimentação é $t=72 \text{ min}$. A simulação foi conduzida de modo a cessar quando fosse atingido o máximo nível d'água na trincheira ou o tempo total de alimentação $t=72 \text{ min}$. Considerou-se o nível $h=69\text{cm}$ como a máxima lâmina d'água possível na trincheira, cujo valor, ao ser atingido ou superado, cessaria a simulação.

As Figuras 5.21 a 5.24 apresentam os arquivos de entrada da Simulação A para os Solos 1 e 2. Detalhes sobre o formato e conteúdo dos arquivos de entrada são especificados no Capítulo 6 - Estrutura e manual de instruções do modelo computacional.

Figura 5.21 - Arquivo de entrada da Simulação A para o Solo 1: vetor com os valores iniciais de h (cmH_2O)

Figura 5.22 - Arquivo de entrada da Simulação A para o Solo 1: variáveis e parâmetros do modelo

Figura 5.23 - Arquivo de entrada da Simulação A para o Solo 2: vetor com os valores iniciais de h (cm_{H2O})

Figura 5.24 - Arquivo de entrada da Simulação A para o Solo 2: variáveis e parâmetros do modelo

Tabela 5.11 - Fases de alimentação e recessão: Simulação A - valores de lâmina d'água e volume infiltrado, simulados e observados, Solos 1 e 2

t (min)	Solo 1 Simulação A		Solo 1 Observado		Solo 2 Simulação A		Solo 2 Observado	
	lag (cm)	V inf. (m³)	lag (cm)	V inf. (m³)	lag (cm)	V inf. (m³)	lag (cm)	V inf. (m³)
0	2,81	0,00	0,11	0,00	5,10	0,00	0,00	0,00
2	3,74	0,04	3,72	0,05	3,99	0,02	2,30	0,11
4	4,49	0,11	6,02	0,09	6,79	0,07	5,80	0,20
6	4,57	0,19	8,20	0,11	9,49	0,12	8,60	0,24
8	5,08	0,27	10,50	0,16	12,15	0,16	12,28	0,26
10	5,49	0,35	14,00	0,21	14,62	0,21	15,94	0,29
12	5,75	0,44	17,67	0,23	16,95	0,27	19,39	0,32
14	5,76	0,53	20,31	0,27	19,22	0,32	22,73	0,35
16	5,77	0,62	23,30	0,30	21,37	0,38	25,90	0,39
18	5,85	0,72	25,82	0,35	23,09	0,44	29,02	0,43
20	5,86	0,82	28,41	0,40	24,86	0,50	32,02	0,47
22	6,29	0,89	31,10	0,45	27,49	0,55	34,81	0,53
24	9,00	0,92	33,80	0,50	30,82	0,57	37,44	0,57
26	11,65	0,96	36,73	0,55	33,73	0,61	39,96	0,62
28	14,19	1,00	39,43	0,60	36,88	0,64	42,09	0,70
30	16,65	1,04	41,78	0,65	39,93	0,67	44,44	0,74
32	19,06	1,08	44,08	0,70	42,81	0,70	46,46	0,81
34	21,42	1,12	46,31	0,75	45,62	0,74	48,71	0,86
36	23,35	1,17	48,50	0,81	48,30	0,78	50,68	0,93
38	25,45	1,21	50,28	0,87	51,00	0,81	52,76	0,99
40	27,52	1,26	52,11	0,92	53,26	0,86	54,10	1,06
42	29,58	1,31	53,78	0,98	55,74	0,90	55,80	1,13
44	31,59	1,35	55,50	1,04	58,30	0,93	57,60	1,19
46	33,04	1,41	56,99	1,10	60,84	0,97	58,90	1,26
48	34,61	1,47	58,48	1,16	63,03	1,02	60,20	1,34
50	36,25	1,52	59,69	1,22	65,58	1,05	61,40	1,42
52	37,59	1,58	61,01	1,29	68,11	1,09	62,20	1,50
54	39,43	1,63	61,98	1,36	70,62	1,12	63,90	1,57
56	40,69	1,69	63,19	1,42	69,30	1,20	64,90	1,65
58	41,49	1,76	64,22	1,48	67,97	1,23	65,80	1,72
60	41,57	1,85	65,08	1,55	67,14	1,25	66,70	1,80
62	41,72	1,94	65,89	1,61	65,74	1,29	67,60	1,87
64	41,92	2,03	66,81	1,67	64,37	1,33	68,40	1,95
66	42,13	2,12	67,50	1,74	63,02	1,36	69,20	2,03
68	44,17	2,16	68,13	1,81	61,68	1,40	69,70	2,11
70	45,48	2,22	68,82	1,88	60,36	1,43	68,60	2,18
72	46,75	2,28	69,39	1,94	59,04	1,47	64,40	2,26
74	44,51	2,40	70,02	2,01	57,74	1,50	60,90	2,33
76	42,34	2,45	67,21	2,11	57,35	1,51	57,40	2,40
78	40,21	2,50	64,22	2,17	56,10	1,54	54,30	2,47
80	38,07	2,55	61,30	2,23	55,19	1,57	51,40	2,52
82	35,94	2,60	58,83	2,28	53,73	1,60	48,70	2,58
84	35,51	2,61	56,19	2,33	52,84	1,63	45,90	2,63
86	33,79	2,65	53,60	2,38	51,37	1,66	43,60	2,68
88	32,30	2,69	51,08	2,43	50,69	1,68	41,20	2,73
90	30,09	2,74	48,73	2,48	49,20	1,72	39,00	2,77
92	28,75	2,77	46,60	2,52	48,00	1,75	36,90	2,81
94	26,49	2,82	44,48	2,56	47,40	1,76	35,00	2,85
96	26,05	2,83	42,35	2,61	46,16	1,79	33,00	2,89
98	25,60	2,84	40,34	2,65	45,52	1,81	31,20	2,93
100	25,16	2,85	38,28	2,69	44,31	1,84	29,60	2,96
102	24,07	2,87	36,44	2,73	43,69	1,85	28,10	2,99
104	22,60	2,91	34,55	2,76	42,47	1,88	26,80	3,02
106	21,56	2,93	32,71	2,80	42,06	1,89	25,60	3,04
108	21,11	2,94	30,99	2,83	41,10	1,92	24,30	3,07
110	20,66	2,95	29,21	2,87	40,68	1,93	23,00	3,09
112	20,21	2,96	27,66	2,90	40,26	1,94	21,70	3,12
114	19,75	2,97	26,11	2,93	39,85	1,95	20,40	3,14

Tabela 5.11 - Continuação. Fases de alimentação e recessão: Simulação A - valores de lâmina d'água e volume infiltrado, simulados e observados, Solos 1 e 2

t (min)	Solo 1 Simulação A		Solo 1 Observado		Solo 2 Simulação A		Solo 2 Observado	
	lag (cm)	V inf. (m³)	lag (cm)	V inf. (m³)	lag (cm)	V inf. (m³)	lag (cm)	V inf. (m³)
116	19,30	2,98	24,56	2,96	39,43	1,96	19,20	3,17
118	18,84	2,99	23,12	2,99	39,01	1,97	18,00	3,19
120	18,38	3,00	21,69	3,02	38,59	1,98	16,90	3,21
122	17,92	3,01	20,37	3,05	38,17	1,99	15,90	3,23
124	17,46	3,02	19,05	3,07	37,75	2,00	14,90	3,25
126	17,00	3,03	17,79	3,10	37,33	2,01	13,90	3,27
128	16,54	3,04	16,58	3,12	36,91	2,02	12,90	3,29
130	16,08	3,05	15,38	3,15	36,49	2,03	11,90	3,31
132	15,62	3,06	14,23	3,17	36,07	2,04	11,00	3,33
134	15,15	3,07	13,08	3,19	35,64	2,05	10,10	3,35
136	14,69	3,08	11,93	3,22	35,22	2,06	9,20	3,37
138	14,22	3,09	10,90	3,24	34,79	2,07	8,40	3,38
140	13,75	3,10	9,81	3,26	34,37	2,08	7,60	3,40
142	13,28	3,11	8,77	3,28	33,94	2,09	6,90	3,41
144	12,82	3,12	7,80	3,30	33,51	2,10	6,10	3,43
146	12,35	3,13	6,82	3,32	33,08	2,11	5,40	3,44
148	11,87	3,14	5,90	3,34	32,65	2,12	4,60	3,46
150	11,40	3,15	4,99	3,35	32,22	2,13	3,80	3,48
152	10,93	3,16	4,18	3,37	31,79	2,14	3,00	3,49
154	10,45	3,17	3,38	3,39	31,36	2,15	2,30	3,51
156	9,98	3,18	2,63	3,40	30,93	2,16	1,50	3,52
158	9,50	3,19	1,94	3,42	30,49	2,17	0,70	3,54
160	9,02	3,20	1,20	3,43	30,06	2,18	0,00	3,55
162	8,54	3,21	0,45	3,45	29,62	2,19		
164	8,06	3,22			29,19	2,20		
166	7,58	3,23			28,75	2,21		
168	7,10	3,24			28,31	2,22		
170	6,62	3,25			27,87	2,23		
172	6,13	3,26			27,44	2,24		
174	5,65	3,27			27,00	2,25		
176	5,16	3,28			26,55	2,26		
178	4,67	3,29			26,11	2,27		
180	4,18	3,30			25,67	2,28		
182	3,69	3,31			25,23	2,29		
184	3,20	3,32			24,78	2,30		
186	2,71	3,33			24,34	2,31		
188	2,21	3,34			23,89	2,32		
190	1,72	3,35			23,44	2,33		
192	1,22	3,36			23,00	2,34		
194	0,00	3,36			22,55	2,35		
196	0,00	3,36			22,10	2,36		
198	0,00	3,36			21,65	2,37		
200	0,00	3,36			21,19	2,38		
202	0,00	3,36			20,74	2,39		
204	0,00	3,36			20,29	2,40		
206	0,00	3,36			19,83	2,41		
208	0,00	3,36			19,38	2,42		
210	0,00	3,36			18,92	2,43		
212	0,00	3,36			18,47	2,44		
214	0,00	3,36			18,01	2,45		
216	0,00	3,36			17,55	2,46		
218	0,00	3,36			17,09	2,47		
220	0,00	3,36			16,63	2,48		
222	0,00	3,36			16,16	2,49		
224	0,00	3,36			15,70	2,50		
226	0,00	3,36			15,24	2,51		
228	0,00	3,36			14,77	2,52		

Tabela 5.11 - Continuação. Fases de alimentação e recessão: Simulação A - valores de lâmina d'água e volume infiltrado, simulados e observados, Solos 1 e 2

t (min)	Solo 1 Simulação A		Solo 1 Observado		Solo 2 Simulação A		Solo 2 Observado	
	lag (cm)	V inf. (m³)	lag (cm)	V inf. (m³)	lag (cm)	V inf. (m³)	lag (cm)	V inf. (m³)
230	0,00	3,36			14,31	2,53		
232	0,00	3,36			13,84	2,54		
234	0,00	3,36			13,37	2,55		
236	0,00	3,36			12,90	2,56		
238	0,00	3,36			12,43	2,57		
240	0,00	3,36			11,96	2,58		
242	0,00	3,36			11,49	2,59		
244	0,00	3,36			11,01	2,60		
246	0,00	3,36			10,54	2,61		
248	0,00	3,36			10,06	2,62		
250	0,00	3,36			9,59	2,63		
252	0,00	3,36			9,11	2,64		
254	0,00	3,36			8,63	2,65		
256	0,00	3,36			8,15	2,66		
258	0,00	3,36			7,67	2,67		
260	0,00	3,36			7,19	2,68		
262	0,00	3,36			6,71	2,69		
264	0,00	3,36			6,22	2,70		
266	0,00	3,36			5,74	2,71		
268	0,00	3,36			5,25	2,72		
270	0,00	3,36			4,76	2,73		
272	0,00	3,36			4,27	2,74		
274	0,00	3,36			3,78	2,75		
276	0,00	3,36			3,29	2,76		
278	0,00	3,36			2,80	2,77		
280	0,00	3,36			2,30	2,78		
282	0,00	3,36			1,81	2,79		
284	0,00	3,36			1,31	2,80		
286	0,00	3,36			0,00	2,81

Figura 5.25 - Evolução do nível d'água na trincheira Solo 1 - Simulação A e valores observados

Figura 5.26 - Evolução do nível d'água na trincheira Solo 2 - Simulação A e valores observados

Conforme pode ser observado na Tabela 5.11, na Simulação A para o Solo 1, verificou-se que, ao final da alimentação ($t=72$ min), ainda não havia sido atingido o nível d'água máximo na trincheira. Esse resultado revela uma estimativa superestimada da taxa de infiltração do solo, uma vez que, nos valores observados para o Solo 1, para a mesma vazão e tempo de alimentação, o nível máximo foi atingido. A simulação A para o Solo 2 apresentou comportamento distinto: o nível máximo na trincheira, de 70,62 cm, foi atingido aos 54 minutos da alimentação, ou seja, 14 minutos antes do observado nos experimentos de campo, revelando uma estimativa da taxa de infiltração, durante a fase de alimentação, inferior à observada em campo.

Se, durante a fase de alimentação, a capacidade de infiltração da trincheira se revelou superestimada para o Solo 1 e subestimada para o Solo 2, na fase de recessão a simulação apresentou valores de infiltração muito abaixo dos observados para ambos os solos, subestimando a capacidade da trincheira, fato que é mais facilmente visualizado nas Figuras 5.25 e 5.26. Os valores de lâmina d'água observados em campo revelaram que, na trincheira instalada no Solo 1, a fase de recessão acabou aos 164 minutos contados a partir do início da alimentação, e, no Solo 2, aos 160 minutos. Os valores simulados foram de 194 minutos para o Solo 1 e 286 minutos para o Solo 2.

Nas Figuras 5.27 e 5.28 observa-se o desenvolvimento dos perfis de umidade dos Solos 1 e 2, respectivamente, durante a fase de redistribuição.

prof/arg (cm)	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
10	0,1209	0,1209	0,1209	0,1209	0,1209	0,1209	0,1209						0,1209	0,1209	0,1209	0,1209	0,1209	0,1209	0,1209
20	0,1529	0,1529	0,1529	0,1529	0,1529	0,1529	0,1529						0,1529	0,1529	0,1529	0,1529	0,1529	0,1529	0,1529
30	0,2167	0,2167	0,2167	0,2167	0,2167	0,2167	0,2167						0,2167	0,2167	0,2167	0,2167	0,2167	0,2167	0,2167
40	0,2481	0,2481	0,2481	0,2481	0,2481	0,2481	0,2481						0,2481	0,2481	0,2481	0,2481	0,2481	0,2481	0,2481
50	0,2481	0,2481	0,2481	0,2481	0,2481	0,2481	0,2481						0,2481	0,2481	0,2481	0,2481	0,2481	0,2481	0,2481
60	0,2432	0,2432	0,2432	0,2432	0,2432	0,2432	0,2432						0,2432	0,2432	0,2432	0,2432	0,2432	0,2432	0,2432
70	0,2294	0,2294	0,2294	0,2294	0,2294	0,2294	0,2294						0,2294	0,2294	0,2294	0,2294	0,2294	0,2294	0,2294
80	0,2167	0,2167	0,2167	0,2167	0,2167	0,2167	0,2167	0,2167	0,2167	0,2167	0,2167	0,2167	0,2167	0,2167	0,2167	0,2167	0,2167	0,2167	0,2167
90	0,2251	0,2251	0,2251	0,2251	0,2251	0,2251	0,2251	0,2251	0,2251	0,2251	0,2251	0,2251	0,2251	0,2251	0,2251	0,2251	0,2251	0,2251	0,2251
100	0,2530	0,2530	0,2530	0,2530	0,2530	0,2530	0,2530	0,2530	0,2530	0,2530	0,2530	0,2530	0,2530	0,2530	0,2530	0,2530	0,2530	0,2530	0,2530
110	0,2797	0,2797	0,2797	0,2797	0,2797	0,2797	0,2797	0,2797	0,2797	0,2797	0,2797	0,2797	0,2797	0,2797	0,2797	0,2797	0,2797	0,2797	0,2797
120	0,2855	0,2855	0,2855	0,2855	0,2855	0,2855	0,2855	0,2855	0,2855	0,2855	0,2855	0,2855	0,2855	0,2855	0,2855	0,2855	0,2855	0,2855	0,2855
130	0,2973	0,2973	0,2973	0,2973	0,2973	0,2973	0,2973	0,2973	0,2973	0,2973	0,2973	0,2973	0,2973	0,2973	0,2973	0,2973	0,2973	0,2973	0,2973
140	0,3034	0,3034	0,3034	0,3034	0,3034	0,3034	0,3034	0,3034	0,3034	0,3034	0,3034	0,3034	0,3034	0,3034	0,3034	0,3034	0,3034	0,3034	0,3034
150	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096
160	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096
170	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096
180	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096	0,3096

Figura 5.27a - Solo 1 - Perfil de umidade simulado - Antes da irrigação

prof/arg (cm)	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
10	0,1211	0,1211	0,1211	0,1211	0,1211	0,1211	0,1211						0,1211	0,1211	0,1211	0,1211	0,1211	0,1211	0,1211
20	0,1537	0,1537	0,1537	0,1537	0,1537	0,1537	0,1537						0,1537	0,1537	0,1537	0,1537	0,1537	0,1537	0,1537
30	0,2150	0,2150	0,2150	0,2150	0,2150	0,2150	0,2150						0,2150	0,2150	0,2150	0,2150	0,2150	0,2150	0,2150
40	0,2459	0,2459	0,2459	0,2459	0,2459	0,2459	0,2459						0,2459	0,2459	0,2459	0,2459	0,2459	0,2459	0,2459
50	0,2478	0,2478	0,2478	0,2478	0,2478	0,2478	0,2478						0,2478	0,2478	0,2478	0,2478	0,2478	0,2478	0,2478
60	0,2432	0,2432	0,2432	0,2432	0,2432	0,2432	0,2432						0,2432	0,2432	0,2432	0,2432	0,2432	0,2432	0,2432
70	0,2301	0,2301	0,2301	0,2301	0,2301	0,2301	0,2301						0,2301	0,2301	0,2301	0,2301	0,2301	0,2301	0,2301
80	0,2177	0,2177	0,2177	0,2177	0,2177	0,2177	0,2177	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
90	0,2255	0,2255	0,2255	0,2255	0,2255	0,2255	0,2255	0,4562	0,4562	0,4562	0,4562	0,4562	0,4562	0,4562	0,4562	0,4562	0,4562	0,4562	0,4562
100	0,2521	0,2521	0,2521	0,2521	0,2521	0,2521	0,2521	0,2568	0,2571	0,2571	0,2571	0,2571	0,2568	0,2524	0,2521	0,2521	0,2521	0,2521	0,2521
110	0,2775	0,2775	0,2775	0,2775	0,2775	0,2775	0,2775	0,2776	0,2776	0,2776	0,2776	0,2776	0,2776	0,2775	0,2775	0,2775	0,2775	0,2775	0,2775
120	0,2852	0,2852	0,2852	0,2852	0,2852	0,2852	0,2852	0,2852	0,2852	0,2852	0,2852	0,2852	0,2852	0,2852	0,2852	0,2852	0,2852	0,2852	0,2852
130	0,2962	0,2962	0,2962	0,2962	0,2962	0,2962	0,2962	0,2962	0,2962	0,2962	0,2962	0,2962	0,2962	0,2962	0,2962	0,2962	0,2962	0,2962	0,2962
140	0,3028	0,3028	0,3028	0,3028	0,3028	0,3028	0,3028	0,3028	0,3028	0,3028	0,3028	0,3028	0,3028	0,3028	0,3028	0,3028	0,3028	0,3028	0,3028
150	0,3088	0,3088	0,3088	0,3088	0,3088	0,3088	0,3088	0,3088	0,3088	0,3088	0,3088	0,3088	0,3088	0,3088	0,3088	0,3088	0,3088	0,3088	0,3088
160	0,3097	0,3097	0,3097	0,3097	0,3097	0,3097	0,3097	0,3097	0,3097	0,3097	0,3097	0,3097	0,3097	0,3097	0,3097	0,3097	0,3097	0,3097	0,3097
170	0,3121	0,3121	0,3121	0,3121	0,3121	0,3121	0,3121	0,3121	0,3121	0,3121	0,3121	0,3121	0,3121	0,3121	0,3121	0,3121	0,3121	0,3121	0,3121
180	0,3472	0,3472	0,3472	0,3472	0,3472	0,3472	0,3472	0,3472	0,3472	0,3472	0,3472	0,3472	0,3472	0,3472	0,3472	0,3472	0,3472	0,3472	0,3472

Figura 5.27b - Solo 1 - Perfil de umidade simulado - Instante $t = 2$ min da fase de alimentação

prof/arg (cm)	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
10	0,1260	0,1260	0,1260	0,1261	0,1261	0,1263								0,1263	0,1261	0,1261	0,1260	0,1260	0,1260
20	0,1587	0,1587	0,1588	0,1592	0,1605	0,1644								0,1644	0,1605	0,1592	0,1588	0,1587	0,1587
30	0,1965	0,1969	0,1991	0,2077	0,2302	0,2674	0,3123							0,3123	0,2674	0,2302	0,2077	0,1991	0,1969
40	0,2230	0,2268	0,2496	0,3116	0,3888	0,4652	0,5373							0,5373	0,4652	0,3888	0,3116	0,2496	0,2268
50	0,2384	0,2560	0,3855	0,5140	0,5670	0,5700	0,5700							0,5700	0,5700	0,5670	0,5140	0,3855	0,2560
60	0,2594	0,3487	0,5012	0,5626	0,5700	0,5700	0,5700							0,5700	0,5700	0,5700	0,5626	0,5012	0,3487
70	0,3174	0,4413	0,5409	0,5689	0,5700	0,5700	0,5700							0,5700	0,5700	0,5700	0,5689	0,5409	0,4413
80	0,3961	0,4878	0,5536	0,5696	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5696	0,5536	0,4878	0,3961
90	0,4476	0,5091	0,5574	0,5695	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5695	0,5574	0,5091	0,4476
100	0,4693	0,5168	0,5574	0,5691	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5691	0,5574	0,5168	0,4693
110	0,4693	0,5152	0,5553	0,5681	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5681	0,5553	0,5152	0,4693
120	0,4504	0,5058	0,5514	0,5685	0,5698	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5698	0,5685	0,5514	0,5058	0,4504
130	0,4170	0,4902	0,5467	0,5648	0,5694	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5694	0,5648	0,5467	0,4902	0,4170
140	0,4038	0,4766	0,5438	0,5638	0,5691	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5691	0,5638	0,5438	0,4766	0,4038
150	0,4658	0,5028	0,5486	0,5648	0,5692	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5692	0,5648	0,5486	0,5028	0,4658
160	0,5351	0,5443	0,5600	0,5675	0,5697	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5697	0,5675	0,5600	0,5443	0,5351
170	0,5634	0,5649	0,5679	0,5696	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5696	0,5679	0,5649	0,5634	0,5634
180	0,5697	0,5698	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5698	0,5697

Figura 5.27c - Solo 1 - Perfil de umidade simulado - Instante $t = 72$ min da fase de alimentação (NA máximo)

prof/arg (cm)	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
10	0,1463	0,1463	0,1468	0,1487	0,1530	0,1604	0,1604						0,1604	0,1604	0,1530	0,1487	0,1468	0,1463	0,1463
20	0,2033	0,2033	0,2036	0,2051	0,2100	0,2183	0,2183						0,2183	0,2183	0,2100	0,2051	0,2036	0,2033	0,2033
30	0,2791	0,2792	0,2801	0,2839	0,2947	0,3049	0,3124						0,3124	0,3049	0,2947	0,2839	0,2801	0,2792	0,2791
40	0,3582	0,3587	0,3635	0,3793	0,4048	0,4071	0,4075						0,4075	0,4071	0,4048	0,3793	0,3635	0,3587	0,3582
50	0,4365	0,4427	0,4642	0,4741	0,4761	0,4762	0,4760						0,4760	0,4762	0,4761	0,4741	0,4642	0,4427	0,4365
60	0,5020	0,5076	0,5174	0,5239	0,5275	0,5296	0,5305						0,5305	0,5296	0,5275	0,5239	0,5174	0,5076	0,5020
70	0,5310	0,5338	0,5400	0,5462	0,5518	0,5568	0,5606						0,5606	0,5568	0,5518	0,5462	0,5400	0,5338	0,5310
80	0,5472	0,5485	0,5520	0,5565	0,5611	0,5657	0,5694	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5694	0,5657	0,5611	0,5565	0,5520	0,5485	0,5472
90	0,5579	0,5586	0,5606	0,5633	0,5661	0,5684	0,5697	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5697	0,5684	0,5661	0,5633	0,5606	0,5586	0,5579
100	0,5644	0,5647	0,5657	0,5671	0,5684	0,5694	0,5699	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5699	0,5694	0,5684	0,5671	0,5657	0,5647	0,5644
110	0,5679	0,5680	0,5684	0,5690	0,5695	0,5698	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5698	0,5695	0,5690	0,5684	0,5680	0,5679
120	0,5694	0,5695	0,5696	0,5698	0,5699	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5699	0,5698	0,5696	0,5695	0,5694
130	0,5699	0,5699	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5699	0,5699
140	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
150	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
160	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
170	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
180	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700

prof/arg (cm)	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
10	0,1470	0,1471	0,1478	0,1498	0,1543	0,1608	0,1608						0,1608	0,1608	0,1543	0,1498	0,1478	0,1471	0,1470
20	0,1735	0,1737	0,1745	0,1771	0,1829	0,1911	0,1911						0,1911	0,1911	0,1829	0,1771	0,1745	0,1737	0,1735
30	0,2081	0,2083	0,2094	0,2128	0,2202	0,2307	0,2365						0,2365	0,2307	0,2202	0,2128	0,2094	0,2083	0,2081
40	0,2529	0,2531	0,2546	0,2590	0,2685	0,2816	0,2890						0,2890	0,2816	0,2685	0,2590	0,2546	0,2531	0,2529
50	0,3099	0,3102	0,3120	0,3176	0,3292	0,3450	0,3538						0,3538	0,3450	0,3292	0,3176	0,3120	0,3102	0,3099
60	0,3787	0,3790	0,3812	0,3876	0,4007	0,4176	0,4269						0,4269	0,4176	0,4007	0,3876	0,3812	0,3790	0,3787
70	0,4526	0,4529	0,4551	0,4614	0,4737	0,4885	0,4964						0,4964	0,4885	0,4737	0,4614	0,4551	0,4529	0,4526
80	0,5159	0,5162	0,5179	0,5225	0,5309	0,5402	0,5446	0,4923	0,4378	0,4187	0,4378	0,4923	0,5446	0,5402	0,5309	0,5225	0,5179	0,5162	0,5159
90	0,5253	0,5256	0,5271	0,5300	0,5339	0,5387	0,5330	0,5109	0,4848	0,4731	0,4848	0,5109	0,5330	0,5387	0,5339	0,5300	0,5271	0,5256	0,5253
100	0,5357	0,5359	0,5368	0,5381	0,5393	0,5389	0,5346	0,5244	0,5130	0,5074	0,5130	0,5244	0,5346	0,5389	0,5393	0,5381	0,5368	0,5359	0,5357
110	0,5460	0,5461	0,5464	0,5468	0,5468	0,5458	0,5429	0,5382	0,5333	0,5309	0,5333	0,5382	0,5429	0,5458	0,5468	0,5468	0,5464	0,5461	0,5460
120	0,5551	0,5551	0,5551	0,5551	0,5548	0,5540	0,5525	0,5504	0,5484	0,5474	0,5484	0,5504	0,5525	0,5540	0,5548	0,5551	0,5551	0,5551	0,5551
130	0,5621	0,5620	0,5620	0,5619	0,5617	0,5612	0,5605	0,5596	0,5588	0,5585	0,5588	0,5596	0,5605	0,5612	0,5617	0,5619	0,5620	0,5620	0,5621
140	0,5666	0,5666	0,5666	0,5665	0,5664	0,5662	0,5659	0,5656	0,5653	0,5652	0,5653	0,5656	0,5659	0,5662	0,5664	0,5665	0,5666	0,5666	0,5666
150	0,5690	0,5690	0,5690	0,5690	0,5689	0,5689	0,5688	0,5687	0,5686	0,5686	0,5686	0,5687	0,5688	0,5689	0,5689	0,5690	0,5690	0,5690	0,5690
160	0,5699	0,5699	0,5699	0,5699	0,5699	0,5699	0,5698	0,5698	0,5698	0,5698	0,5698	0,5698	0,5698	0,5699	0,5699	0,5699	0,5699	0,5699	0,5699
170	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
180	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700

Figura 5.27e - Solo 1 - Perfil de umidade simulado - Instante t = 20 min da fase de redistribuição

prof/arg (cm)	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
10	0,1471	0,1472	0,1480	0,1503	0,1547	0,1601	0,1601						0,1601	0,1601	0,1547	0,1503	0,1480	0,1472	0,1471
20	0,1731	0,1733	0,1743	0,1772	0,1830	0,1899	0,1899						0,1899	0,1899	0,1830	0,1772	0,1743	0,1733	0,1731
30	0,2069	0,2071	0,2085	0,2123	0,2197	0,2287	0,2321						0,2321	0,2287	0,2197	0,2123	0,2085	0,2071	0,2069
40	0,2508	0,2511	0,2529	0,2578	0,2674	0,2787	0,2832						0,2832	0,2787	0,2674	0,2578	0,2529	0,2511	0,2508
50	0,3069	0,3073	0,3095	0,3158	0,3276	0,3412	0,3467						0,3467	0,3412	0,3276	0,3158	0,3095	0,3073	0,3069
60	0,3749	0,3754	0,3781	0,3853	0,3987	0,4134	0,4194						0,4194	0,4134	0,3987	0,3853	0,3781	0,3754	0,3749
70	0,4487	0,4493	0,4520	0,4591	0,4717	0,4847	0,4900						0,4900	0,4847	0,4717	0,4591	0,4520	0,4493	0,4487
80	0,5129	0,5134	0,5155	0,5208	0,5295	0,5378	0,5408	0,4874	0,4292	0,4047	0,4292	0,4874	0,5408	0,5378	0,5295	0,5208	0,5155	0,5134	0,5129
90	0,5184	0,5189	0,5209	0,5246	0,5292	0,5320	0,5276	0,5037	0,4726	0,4570	0,4726	0,5037	0,5276	0,5320	0,5292	0,5246	0,5209	0,5189	0,5184
100	0,5254	0,5257	0,5270	0,5290	0,5308	0,5306	0,5254	0,5125	0,4969	0,4889	0,4969	0,5125	0,5254	0,5306	0,5308	0,5290	0,5270	0,5257	0,5254
110	0,5339	0,5340	0,5346	0,5353	0,5355	0,5342	0,5302	0,5231	0,5155	0,5116	0,5116	0,5231	0,5302	0,5342	0,5355	0,5353	0,5346	0,5340	0,5339
120	0,5434	0,5434	0,5435	0,5436	0,5432	0,5418	0,5392	0,5355	0,5318	0,5300	0,5318	0,5355	0,5392	0,5418	0,5432	0,5436	0,5435	0,5434	0,5434
130	0,5528	0,5528	0,5527	0,5525	0,5520	0,5511	0,5496	0,5477	0,5461	0,5453	0,5461	0,5477	0,5496	0,5511	0,5520	0,5525	0,5527	0,5528	0,5528
140	0,5608	0,5608	0,5607	0,5605	0,5601	0,5596	0,5589	0,5581	0,5574	0,5570	0,5574	0,5581	0,5589	0,5596	0,5601	0,5605	0,5607	0,5608	0,5608
150	0,5663	0,5663	0,5662	0,5661	0,5659	0,5657	0,5654	0,5651	0,5649	0,5648	0,5649	0,5651	0,5654	0,5657	0,5659	0,5661	0,5662	0,5663	0,5663
160	0,5691	0,5691	0,5691	0,5691	0,5690	0,5689	0,5689	0,5688	0,5687	0,5687	0,5687	0,5688	0,5689	0,5689	0,5690	0,5691	0,5691	0,5691	0,5691
170	0,5700	0,5700	0,5700	0,5699	0,5699	0,5699	0,5699	0,5699	0,5699	0,5699	0,5699	0,5699	0,5699	0,5699	0,5699	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
180	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700

Figura 5.27f - Solo 1 - Perfil de umidade simulado - Instante t = 1h da fase de redistribuição

prof/arg (cm)	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
10	0,1472	0,1474	0,1484	0,1508	0,1550	0,1592	0,1592						0,1592	0,1592	0,1550	0,1508	0,1484	0,1474	0,1472
20	0,1732	0,1735	0,1748	0,1779	0,1833	0,1887	0,1887						0,1887	0,1887	0,1833	0,1779	0,1748	0,1735	0,1732
30	0,2070	0,2074	0,2091	0,2132	0,2201	0,2271	0,2294						0,2294	0,2271	0,2201	0,2132	0,2091	0,2074	0,2070
40	0,2510	0,2514	0,2536	0,2589	0,2678	0,2766	0,2797						0,2797	0,2766	0,2678	0,2589	0,2536	0,2514	0,2510
50	0,3070	0,3076	0,3104	0,3171	0,3281	0,3387	0,3425						0,3425	0,3387	0,3281	0,3171	0,3104	0,3076	0,3070
60	0,3751	0,3758	0,3791	0,3868	0,3991	0,4106	0,4149						0,4149	0,4106	0,3991	0,3868	0,3791	0,3758	0,3751
70	0,4489	0,4497	0,4530	0,4605	0,4720	0,4823	0,4861						0,4861	0,4823	0,4720	0,4605	0,4530	0,4497	0,4489
80	0,5131	0,5137	0,5162	0,5217	0,5297	0,5363	0,5384	0,4837	0,4236	0,3977	0,4236	0,4837	0,5384	0,5363	0,5297	0,5217	0,5162	0,5137	0,5131
90	0,5179	0,5184	0,5206	0,5243	0,5285	0,5303	0,5251	0,4999	0,4668	0,4499	0,4668	0,4999	0,5251	0,5303	0,5285	0,5243	0,5206	0,5184	0,5179
100	0,5234	0,5238	0,5252	0,5272	0,5288	0,5280	0,5220	0,5077	0,4903	0,4812	0,4903	0,5077	0,5220	0,5280	0,5288	0,5272	0,5252	0,5238	0,5234
110	0,5302	0,5304	0,5311	0,5319	0,5319	0,5302	0,5254	0,5170	0,5079	0,5031	0,5079	0,5170	0,5254	0,5302	0,5319	0,5319	0,5311	0,5304	0,5302
120	0,5385	0,5386	0,5388	0,5388	0,5382	0,5365	0,5331	0,5284	0,5237	0,5213	0,5237	0,5284	0,5331	0,5365	0,5382	0,5388	0,5388	0,5386	0,5385
130	0,5478	0,5478	0,5477	0,5475	0,5468	0,5455	0,5435	0,5409	0,5386	0,5375	0,5386	0,5409	0,5435	0,5455	0,5468	0,5475	0,5477	0,5478	0,5478
140	0,5569	0,5568	0,5567	0,5564	0,5559	0,5551	0,5541	0,5529	0,5518	0,5513	0,5518	0,5529	0,5541	0,5551	0,5559	0,5564	0,5567	0,5568	0,5569
150	0,5640	0,5640	0,5639	0,5637	0,5634	0,5631	0,5626	0,5621	0,5617	0,5615	0,5617	0,5621	0,5626	0,5631	0,5634	0,5637	0,5639	0,5640	0,5640
160	0,5682	0,5682	0,5682	0,5681	0,5680	0,5679	0,5678	0,5678	0,5676	0,5675	0,5676	0,5678	0,5678	0,5679	0,5680	0,5681	0,5682	0,5682	0,5682
170	0,5698	0,5698	0,5698	0,5698	0,5698	0,5698	0,5698	0,5697	0,5697	0,5697	0,5697	0,5698	0,5698	0,5698	0,5698	0,5698	0,5698	0,5698	0,5698
180	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700

Figura 5.27g - Solo 1 - Perfil de umidade simulado - Instante t = 2h da fase de redistribuição

prof/arg (cm)	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
10	0,1473	0,1478	0,1487	0,1512	0,1550	0,1584	0,1584						0,1584	0,1584	0,1550	0,1512	0,1487	0,1478	0,1473
20	0,1734	0,1737	0,1752	0,1785	0,1833	0,1877	0,1877						0,1877	0,1877	0,1833	0,1785	0,1752	0,1737	0,1734
30	0,2073	0,2077	0,2097	0,2139	0,2202	0,2258	0,2275						0,2275	0,2258	0,2202	0,2139	0,2097	0,2077	0,2073
40	0,2513	0,2518	0,2544	0,2598	0,2679	0,2750	0,2773						0,2773	0,2750	0,2679	0,2598	0,2544	0,2518	0,2513
50	0,3074	0,3082	0,3114	0,3182	0,3281	0,3367	0,3396						0,3396	0,3367	0,3281	0,3182	0,3114	0,3082	0,3074
60	0,3756	0,3764	0,3802	0,3880	0,3991	0,4085	0,4118						0,4118	0,4085	0,3991	0,3880	0,3802	0,3764	0,3756
70	0,4494	0,4503	0,4540	0,4616	0,4720	0,4804	0,4834						0,4834	0,4804	0,4720	0,4616	0,4540	0,4503	0,4494
80	0,5135	0,5142	0,5170	0,5225	0,5296	0,5351	0,5367	0,4816	0,4215	0,3954	0,4215	0,4816	0,5367	0,5351	0,5296	0,5225	0,5170	0,5142	0,5135
90	0,5180	0,5186	0,5208	0,5244	0,5282	0,5295	0,5238	0,4982	0,4647	0,4476	0,4484	0,4982	0,5238	0,5295	0,5282	0,5244	0,5208	0,5186	0,5180
100	0,5232	0,5236	0,5250	0,5269	0,5282	0,5271	0,5208	0,5061	0,4884	0,4769	0,4847	0,5061	0,5208	0,5271	0,5282	0,5269	0,5250	0,5236	0,5232
110	0,5296	0,5298	0,5304	0,5311	0,5311	0,5291	0,5240	0,5153	0,5058	0,5008	0,5058	0,5153	0,5240	0,5291	0,5311	0,5311	0,5304	0,5298	0,5296
120	0,5375	0,5376	0,5377	0,5377	0,5370	0,5351	0,5315	0,5285	0,5215	0,5190	0,5215	0,5285	0,5315	0,5351	0,5370	0,5377	0,5377	0,5376	0,5375
130	0,5466	0,5466	0,5465	0,5462	0,5455	0,5440	0,5418	0,5391	0,5366	0,5354	0,5366	0,5391	0,5418	0,5440	0,5455	0,5462	0,5465	0,5466	0,5466
140	0,5558	0,5558	0,5558	0,5553	0,5547	0,5539	0,5527	0,5513	0,5502	0,5498	0,5502	0,5513	0,5527	0,5539	0,5547	0,5553	0,5558	0,5558	0,5558
150	0,5633	0,5633	0,5632	0,5630	0,5627	0,5623	0,5617	0,5612	0,5607	0,5605	0,5607	0,5612	0,5617	0,5623	0,5627	0,5630	0,5632	0,5633	0,5633
160	0,5680	0,5679	0,5679	0,5678	0,5677	0,5676	0,5674	0,5672	0,5671	0,5670	0,5671	0,5672	0,5674	0,5676	0,5677	0,5678	0,5679	0,5679	0,5680
170	0,5698	0,5698	0,5698	0,5698	0,5697	0,5697	0,5697	0,5697	0,5696	0,5696	0,5696	0,5697	0,5697	0,5697	0,5697	0,5698	0,5698	0,5698	0,5698
180	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700

prof/arg (cm)	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	171
10	0,1475	0,1478	0,1491	0,1516	0,1549	0,1578	0,1578						0,1578	0,1578	0,1549	0,1516	0,1491	0,1478	0,1475
20	0,1736	0,1740	0,1757	0,1789	0,1833	0,1869	0,1869						0,1869	0,1869	0,1833	0,1789	0,1757	0,1740	0,1736
30	0,2076	0,2081	0,2102	0,2144	0,2201	0,2247	0,2261						0,2261	0,2247	0,2201	0,2144	0,2102	0,2081	0,2076
40	0,2516	0,2523	0,2551	0,2605	0,2677	0,2737	0,2755						0,2755	0,2737	0,2677	0,2605	0,2551	0,2523	0,2516
50	0,3079	0,3088	0,3122	0,3190	0,3279	0,3351	0,3374						0,3374	0,3351	0,3279	0,3190	0,3122	0,3088	0,3079
60	0,3761	0,3771	0,3812	0,3889	0,3988	0,4068	0,4094						0,4094	0,4068	0,3988	0,3889	0,3812	0,3771	0,3761
70	0,4500	0,4510	0,4550	0,4625	0,4717	0,4789	0,4813						0,4813	0,4789	0,4717	0,4625	0,4550	0,4510	0,4500
80	0,5139	0,5147	0,5177	0,5231	0,5295	0,5342	0,5354	0,4801	0,4201	0,3942	0,4201	0,4801	0,5354	0,5342	0,5295	0,5231	0,5177	0,5147	0,5139
90	0,5182	0,5188	0,5211	0,5246	0,5280	0,5288	0,5228	0,4971	0,4636	0,4465	0,4636	0,4971	0,5228	0,5288	0,5280	0,5246	0,5211	0,5188	0,5182
100	0,5232	0,5236	0,5250	0,5268	0,5280	0,5266	0,5201	0,5053	0,4874	0,4779	0,4874	0,5053	0,5201	0,5266	0,5280	0,5268	0,5250	0,5236	0,5232
110	0,5294	0,5296	0,5302	0,5308	0,5307	0,5286	0,5233	0,5144	0,5048	0,4998	0,5048	0,5144	0,5233	0,5286	0,5307	0,5308	0,5302	0,5296	0,5294
120	0,5371	0,5372	0,5373	0,5373	0,5365	0,5345	0,5308	0,5256	0,5205	0,5180	0,5205	0,5256	0,5308	0,5345	0,5365	0,5373	0,5373	0,5372	0,5371
130	0,5462	0,5462	0,5460	0,5457	0,5449	0,5434	0,5411	0,5383	0,5357	0,5345	0,5357	0,5383	0,5411	0,5434	0,5449	0,5457	0,5460	0,5462	0,5462
140	0,5554	0,5553	0,5552	0,5548	0,5543	0,5533	0,5521	0,5507	0,5495	0,5489	0,5495	0,5507	0,5521	0,5533	0,5543	0,5548	0,5552	0,5553	0,5554
150	0,5630	0,5630	0,5629	0,5627	0,5624	0,5619	0,5614	0,5608	0,5603	0,5601	0,5603	0,5608	0,5614	0,5619	0,5624	0,5627	0,5629	0,5630	0,5630
160	0,5678	0,5678	0,5678	0,5677	0,5676	0,5674	0,5672	0,5671	0,5669	0,5668	0,5669	0,5671	0,5672	0,5674	0,5676	0,5677	0,5678	0,5678	0,5678
170	0,5698	0,5698	0,5697	0,5697	0,5697	0,5697	0,5697	0,5697	0,5696	0,5696	0,5696	0,5697	0,5697	0,5697	0,5697	0,5697	0,5697	0,5698	0,5698
180	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700

Figura 5.27i - Solo 1 - Perfil de umidade simulado - Instante t = 4h da fase de redistribuição

prof/arg (cm)	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
10	0,1477	0,1480	0,1494	0,1518	0,1548	0,1572	0,1572						0,1572	0,1572	0,1548	0,1518	0,1494	0,1480	0,1477
20	0,1739	0,1743	0,1760	0,1792	0,1831	0,1862	0,1862						0,1862	0,1862	0,1831	0,1792	0,1760	0,1743	0,1739
30	0,2079	0,2085	0,2107	0,2148	0,2199	0,2239	0,2250						0,2250	0,2239	0,2199	0,2148	0,2107	0,2085	0,2079
40	0,2521	0,2528	0,2557	0,2610	0,2675	0,2725	0,2741						0,2741	0,2725	0,2675	0,2610	0,2557	0,2528	0,2521
50	0,3084	0,3094	0,3130	0,3196	0,3275	0,3337	0,3357						0,3357	0,3337	0,3275	0,3196	0,3130	0,3094	0,3084
60	0,3767	0,3778	0,3821	0,3895	0,3985	0,4053	0,4075						0,4075	0,4053	0,3985	0,3895	0,3821	0,3778	0,3767
70	0,4506	0,4517	0,4559	0,4631	0,4714	0,4776	0,4796						0,4796	0,4776	0,4714	0,4631	0,4559	0,4517	0,4506
80	0,5144	0,5152	0,5183	0,5235	0,5292	0,5333	0,5343	0,4786	0,4188	0,3930	0,4188	0,4786	0,5343	0,5333	0,5292	0,5235	0,5183	0,5152	0,5144
90	0,5185	0,5191	0,5214	0,5247	0,5277	0,5282	0,5219	0,4959	0,4624	0,4453	0,4624	0,4959	0,5219	0,5282	0,5277	0,5247	0,5214	0,5191	0,5185
100	0,5232	0,5237	0,5250	0,5267	0,5277	0,5261	0,5193	0,5043	0,4863	0,4768	0,4863	0,5043	0,5193	0,5267	0,5277	0,5267	0,5250	0,5237	0,5232
110	0,5292	0,5294	0,5300	0,5308	0,5303	0,5281	0,5226	0,5136	0,5039	0,4989	0,5039	0,5136	0,5226	0,5281	0,5303	0,5308	0,5300	0,5294	0,5292
120	0,5368	0,5369	0,5370	0,5369	0,5361	0,5340	0,5302	0,5249	0,5197	0,5171	0,5197	0,5249	0,5302	0,5340	0,5361	0,5369	0,5370	0,5369	0,5368
130	0,5458	0,5458	0,5458	0,5453	0,5444	0,5429	0,5405	0,5376	0,5349	0,5336	0,5349	0,5376	0,5405	0,5429	0,5444	0,5453	0,5458	0,5458	0,5458
140	0,5550	0,5550	0,5548	0,5545	0,5538	0,5529	0,5516	0,5501	0,5489	0,5483	0,5489	0,5501	0,5516	0,5529	0,5538	0,5545	0,5548	0,5550	0,5550
150	0,5628	0,5627	0,5626	0,5624	0,5621	0,5616	0,5610	0,5604	0,5599	0,5597	0,5599	0,5604	0,5610	0,5616	0,5621	0,5624	0,5626	0,5627	0,5628
160	0,5677	0,5677	0,5677	0,5676	0,5674	0,5673	0,5671	0,5669	0,5667	0,5667	0,5669	0,5671	0,5673	0,5674	0,5676	0,5677	0,5677	0,5677	0,5677
170	0,5697	0,5697	0,5697	0,5697	0,5697	0,5697	0,5697	0,5696	0,5696	0,5696	0,5696	0,5697	0,5697	0,5697	0,5697	0,5697	0,5697	0,5697	0,5697
180	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700

Figura 5.27j - Solo 1 - Perfil de umidade simulado - Instante t = 5h da fase de redistribuição

prof/arg (cm)	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
10	0,1479	0,1483	0,1496	0,1520	0,1547	0,1568	0,1568						0,1568	0,1568	0,1547	0,1520	0,1496	0,1483	0,1479
20	0,1741	0,1746	0,1764	0,1794	0,1829	0,1856	0,1856						0,1856	0,1856	0,1829	0,1794	0,1764	0,1746	0,1741
30	0,2082	0,2088	0,2111	0,2151	0,2197	0,2231	0,2241						0,2241	0,2231	0,2197	0,2151	0,2111	0,2088	0,2082
40	0,2525	0,2533	0,2563	0,2613	0,2672	0,2716	0,2729						0,2729	0,2716	0,2672	0,2613	0,2563	0,2533	0,2525
50	0,3090	0,3100	0,3137	0,3200	0,3272	0,3326	0,3343						0,3343	0,3326	0,3272	0,3200	0,3137	0,3100	0,3090
60	0,3774	0,3786	0,3829	0,3900	0,3981	0,4040	0,4059						0,4059	0,4040	0,3981	0,3900	0,3829	0,3786	0,3774
70	0,4512	0,4524	0,4566	0,4635	0,4710	0,4765	0,4782						0,4782	0,4765	0,4710	0,4635	0,4566	0,4524	0,4512
80	0,5148	0,5157	0,5189	0,5238	0,5290	0,5326	0,5333	0,4774	0,4175	0,3918	0,4175	0,4774	0,5333	0,5326	0,5290	0,5238	0,5189	0,5157	0,5148
90	0,5188	0,5194	0,5216	0,5248	0,5274	0,5276	0,5210	0,4949	0,4613	0,4442	0,4613	0,4949	0,5210	0,5276	0,5274	0,5248	0,5216	0,5194	0,5188
100	0,5234	0,5238	0,5251	0,5266	0,5274	0,5256	0,5186	0,5035	0,4854	0,4758	0,4854	0,5035	0,5186	0,5256	0,5274	0,5266	0,5251	0,5238	0,5234
110	0,5291	0,5293	0,5299	0,5304	0,5300	0,5276	0,5220	0,5129	0,5030	0,4979	0,5030	0,5129	0,5220	0,5276	0,5300	0,5304	0,5299	0,5293	0,5291
120	0,5366	0,5368	0,5367	0,5368	0,5357	0,5335	0,5298	0,5242	0,5189	0,5163	0,5189	0,5242	0,5298	0,5335	0,5357	0,5368	0,5367	0,5368	0,5366
130	0,5455	0,5454	0,5453	0,5449	0,5440	0,5424	0,5400	0,5370	0,5342	0,5329	0,5342	0,5370	0,5400	0,5424	0,5440	0,5449	0,5453	0,5454	0,5455
140	0,5547	0,5547	0,5545	0,5541	0,5535	0,5525	0,5511	0,5496	0,5484	0,5478	0,5484	0,5496	0,5511	0,5525	0,5535	0,5541	0,5545	0,5547	0,5547
150	0,5626	0,5625	0,5624	0,5622	0,5618	0,5613	0,5607	0,5601	0,5596	0,5593	0,5596	0,5601	0,5607	0,5613	0,5618	0,5622	0,5624	0,5625	0,5626
160	0,5676	0,5676	0,5676	0,5675	0,5673	0,5672	0,5670	0,5668	0,5666	0,5665	0,5666	0,5668	0,5670	0,5672	0,5673	0,5675	0,5676	0,5676	0,5676
170	0,5697	0,5697	0,5697	0,5697	0,5697	0,5697	0,5696	0,5696	0,5695	0,5695	0,5695	0,5696	0,5696	0,5696	0,5697	0,5697	0,5697	0,5697	0,5697
180	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700

Figura 5.27k - Solo 1 - Perfil de umidade simulado - Instante t = 6h da fase de redistribuição

prof/arg (cm)	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
10	0,1489	0,1493	0,1505	0,1523	0,1541	0,1553	0,1553						0,1553	0,1553	0,1541	0,1523	0,1505	0,1493	0,1489
20	0,1755	0,1759	0,1775	0,1798	0,1821	0,1837	0,1837						0,1837	0,1837	0,1821	0,1798	0,1775	0,1759	0,1755
30	0,2100	0,2106	0,2126	0,2156	0,2168	0,2207	0,2212						0,2212	0,2207	0,2186	0,2156	0,2126	0,2106	0,2100
40	0,2547	0,2555	0,2582	0,2620	0,2658	0,2685	0,2692						0,2692	0,2685	0,2658	0,2620	0,2582	0,2555	0,2547
50	0,3118	0,3128	0,3161	0,3208	0,3255	0,3288	0,3297						0,3297	0,3288	0,3255	0,3208	0,3161	0,3128	0,3118
60	0,3806	0,3817	0,3855	0,3909	0,3962	0,3998	0,4009						0,4009	0,3998	0,3962	0,3909	0,3855	0,3817	0,3806
70	0,4544	0,4556	0,4592	0,4643	0,4693	0,4727	0,4737						0,4737	0,4727	0,4693	0,4643	0,4592	0,4556	0,4544
80	0,5172	0,5180	0,5207	0,5243	0,5278	0,5301	0,5303	0,4734	0,4132	0,3875	0,4132	0,4734	0,5303	0,5301	0,5278	0,5243	0,5207	0,5180	0,5172
90	0,5203	0,5208	0,5226	0,5248	0,5263	0,5255	0,5182	0,4914	0,4572	0,4399	0,4572	0,4914	0,5182	0,5255	0,5263	0,5248	0,5226	0,5208	0,5203
100	0,5240	0,5244	0,5253	0,5263	0,5263	0,5237	0,5160	0,5003	0,4817	0,4719	0,4817	0,5003	0,5160	0,5237	0,5263	0,5263	0,5253	0,5244	0,5240
110	0,5291	0,5292	0,5296	0,5297	0,5287	0,5258	0,5197	0,5100	0,4997	0,4945	0,4997	0,5100	0,5197	0,5258	0,5287	0,5297	0,5296	0,5292	0,5291
120	0,5360	0,5360	0,5359	0,5355	0,5343	0,5317	0,5274	0,5216	0,5160	0,5132	0,5160	0,5216	0,5274	0,5317	0,5343	0,5355	0,5359	0,5360	0,5360
130	0,5445	0,5445	0,5443	0,5437	0,5426	0,5407	0,5380	0,5347	0,5318	0,5304	0,5318	0,5347	0,5380	0,5407	0,5426	0,5437	0,5443	0,5445	0,5445
140	0,5538	0,5537	0,5535	0,5530	0,5523	0,5511	0,5496	0,5479	0,5465	0,5459	0,5465	0,5479	0,5496	0,5511	0,5523	0,5530	0,5535	0,5537	0,5538
150	0,5619	0,5619	0,5617	0,5614	0,5610	0,5605	0,5598	0,5590	0,5585	0,5582	0,5585	0,5590	0,5598	0,5605	0,5610	0,5614	0,5617	0,5619	0,5619
160	0,5673	0,5673	0,5672	0,5671	0,5670	0,5668	0,5665	0,5663	0,5661	0,5660	0,5661	0,5663	0,5665	0,5668	0,5670	0,5671	0,5672	0,5673	0,5673
170	0,5696	0,5696	0,5696	0,5696	0,5696	0,5695	0,5695	0,5695	0,5694	0,5694	0,5694	0,5695	0,5695	0,5695	0,5696	0,5696	0,5696	0,5696	0,5696
180	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700

[illegible]

Figura 5.27m - Solo 1 - Perfil de umidade simulado - Instante $t = 24h$ da fase de redistribuição

[illegible]

Figura 5.27n - Solo 1 - Perfil de umidade simulado - Instante $t = 48h$ da fase de redistribuição

[illegible]

Figura 5.28a - Solo 2 - Perfil de umidade simulado - Antes da irrigação

[illegible]

prof/larg (cm)	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
10	0,0853	0,0853	0,0853	0,0853	0,0853	0,3720	0,3720						0,3720	0,3720	0,0853	0,0853	0,0853	0,0853	0,0853
20	0,1047	0,1047	0,1047	0,1047	0,1047	0,3720	0,3720						0,3720	0,3720	0,1047	0,1047	0,1047	0,1047	0,1047
30	0,1441	0,1441	0,1441	0,1441	0,1441	0,3720	0,3720						0,3720	0,3720	0,1441	0,1441	0,1441	0,1441	0,1441
40	0,1665	0,1665	0,1665	0,1665	0,1665	0,3720	0,3720						0,3720	0,3720	0,1665	0,1665	0,1665	0,1665	0,1665
50	0,1665	0,1665	0,1665	0,1665	0,1665	0,3720	0,3720						0,3720	0,3720	0,1665	0,1665	0,1665	0,1665	0,1665
60	0,1713	0,1713	0,1713	0,1713	0,1713	0,3720	0,3720						0,3720	0,3720	0,1713	0,1713	0,1713	0,1713	0,1713
70	0,1665	0,1665	0,1665	0,1665	0,1665	0,3720	0,3720						0,3720	0,3720	0,1665	0,1665	0,1665	0,1665	0,1665
80	0,1622	0,1622	0,1622	0,1622	0,1622	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,1622	0,1622	0,1622	0,1622	0,1622
90	0,1665	0,1665	0,1665	0,1665	0,1665	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,1665	0,1665	0,1665	0,1665	0,1665
100	0,1713	0,1713	0,1713	0,1713	0,1713	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,1713	0,1713	0,1713	0,1713	0,1713
110	0,1835	0,1835	0,1835	0,1835	0,1835	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,1835	0,1835	0,1835	0,1835	0,1835
120	0,1835	0,1835	0,1835	0,1835	0,1835	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,1835	0,1835	0,1835	0,1835	0,1835
130	0,1835	0,1835	0,1835	0,1835	0,1835	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,1835	0,1835	0,1835	0,1835	0,1835
140	0,1916	0,1916	0,1916	0,1916	0,1916	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,1916	0,1916	0,1916	0,1916	0,1916	0,1916
150	0,1916	0,1916	0,1916	0,1916	0,1916	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,1916	0,1916	0,1916	0,1916	0,1916	0,1916
160	0,1916	0,1916	0,1916	0,1916	0,1916	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,1916	0,1916	0,1916	0,1916	0,1916	0,1916
170	0,2016	0,2016	0,2016	0,2016	0,2016	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,2016	0,2016	0,2016	0,2016	0,2016	0,2016
180	0,2017	0,2017	0,2017	0,2017	0,2017	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,2017	0,2017	0,2017	0,2017	0,2017	0,2017

Figura 5.28c - Solo 2 - Perfil de umidade simulado - Instante $t = 54$ min da fase de alimentação (NA máximo)

prof/larg (cm)	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
10	0,0853	0,0853	0,0853	0,1455	0,1701	0,1656	0,1656						0,1656	0,1656	0,1701	0,1455	0,0853	0,0853	0,0853
20	0,1047	0,1047	0,1049	0,1773	0,1858	0,1858	0,1858						0,1858	0,1858	0,1858	0,1773	0,1049	0,1047	0,1047
30	0,1441	0,1481	0,1615	0,1650	0,1650	0,1650	0,1650						0,1650	0,1650	0,1650	0,1650	0,1615	0,1481	0,1441
40	0,1619	0,1650	0,1650	0,1650	0,1650	0,1650	0,1650						0,1650	0,1650	0,1650	0,1650	0,1650	0,1619	0,1619
50	0,1775	0,1775	0,1775	0,1775	0,1775	0,1775	0,1775						0,1775	0,1775	0,1775	0,1775	0,1775	0,1775	0,1775
60	0,1998	0,2012	0,1636	0,1634	0,1634	0,1634	0,1634						0,1634	0,1634	0,1634	0,1634	0,1636	0,2012	0,1998
70	0,2358	0,2842	0,2166	0,2489	0,1951	0,1702	0,1687						0,1687	0,1702	0,1951	0,2489	0,2166	0,2842	0,2358
80	0,2326	0,2651	0,2110	0,2470	0,1941	0,2266	0,3098	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3098	0,2266	0,1941	0,2470	0,2110	0,2651	0,2326
90	0,2203	0,2431	0,2145	0,2571	0,2523	0,2898	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,2898	0,2523	0,2571	0,2145	0,2431	0,2203	0,2203
100	0,2077	0,2238	0,2193	0,2764	0,2660	0,3117	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3117	0,2660	0,2764	0,2193	0,2238	0,2077	0,2077
110	0,1961	0,2077	0,2626	0,2858	0,2996	0,3045	0,2558	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,2558	0,3045	0,2996	0,2858	0,2626	0,2077	0,1961
120	0,1858	0,1943	0,2767	0,2740	0,2626	0,2855	0,2494	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,2494	0,2855	0,2626	0,2740	0,2767	0,1943	0,1858
130	0,1926	0,1861	0,2345	0,2701	0,2549	0,2411	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,2411	0,2549	0,2701	0,2345	0,1861	0,1926	0,1926
140	0,2031	0,1911	0,2548	0,2563	0,2389	0,2554	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,2554	0,2389	0,2563	0,2548	0,1911	0,2031	0,2031
150	0,1811	0,1860	0,2356	0,2189	0,2256	0,2765	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,2765	0,2256	0,2189	0,2356	0,1860	0,1811	0,1811
160	0,1827	0,1890	0,2347	0,2334	0,2667	0,3047	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3047	0,2667	0,2334	0,2347	0,1890	0,1827	0,1827
170	0,1966	0,1660	0,1678	0,1657	0,2631	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,2631	0,1657	0,1678	0,1660	0,1666	0,1966	0,1966
180	0,3046	0,3310	0,3266	0,3184	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3184	0,3266	0,3310	0,3046

Figura 5.28d - Solo 2 - Perfil de umidade simulado - Instante $t = 286$ min da fase de recessão $\equiv$ instante $t = 0$ da fase de redistribuição (NA=0)

prof/larg (cm)	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
10	0,0853	0,0853	0,0853	0,1453	0,1701	0,1656	0,1656						0,1656	0,1656	0,1701	0,1453	0,0853	0,0853	0,0853
20	0,1047	0,1047	0,1049	0,1773	0,1865	0,1865	0,1864						0,1864	0,1864	0,1865	0,1773	0,1049	0,1047	0,1047
30	0,1439	0,1479	0,1610	0,1657	0,1661	0,1661	0,1650						0,1650	0,1661	0,1661	0,1657	0,1610	0,1479	0,1439
40	0,1619	0,1651	0,1653	0,1654	0,1654	0,1654	0,1654						0,1654	0,1654	0,1654	0,1654	0,1653	0,1651	0,1619
50	0,1778	0,1779	0,1779	0,1779	0,1779	0,1779	0,1779						0,1779	0,1779	0,1779	0,1779	0,1779	0,1779	0,1778
60	0,2010	0,2010	0,1644	0,1641	0,1642	0,1642	0,1642						0,1642	0,1642	0,1642	0,1641	0,1644	0,2010	0,2010
70	0,2439	0,3720	0,2178	0,2517	0,1960	0,1706	0,1675						0,1675	0,1706	0,1960	0,2517	0,2178	0,3720	0,2439
80	0,2515	0,3720	0,2171	0,2893	0,1967	0,2272	0,1780	0,1352	0,1275	0,1253	0,1275	0,1352	0,1780	0,2272	0,1967	0,2893	0,2171	0,3720	0,2515
90	0,2205	0,3720	0,2145	0,2575	0,2512	0,2888	0,1623	0,1482	0,1403	0,1377	0,1403	0,1482	0,1623	0,2888	0,2512	0,2575	0,2145	0,3720	0,2205
100	0,2078	0,2242	0,2201	0,2735	0,2648	0,3095	0,1604	0,1630	0,1541	0,1511	0,1541	0,1630	0,1604	0,3095	0,2648	0,2735	0,2201	0,2242	0,2078
110	0,1961	0,2079	0,2619	0,2858	0,2968	0,3015	0,2653	0,1809	0,1688	0,1653	0,1688	0,1809	0,2653	0,3015	0,2968	0,2858	0,2619	0,2079	0,1961
120	0,1858	0,1944	0,2759	0,2745	0,2660	0,2854	0,3720	0,1907	0,1819	0,1793	0,1819	0,1907	0,3720	0,2854	0,2660	0,2745	0,2759	0,1944	0,1858
130	0,1922	0,1861	0,2366	0,2725	0,2568	0,2402	0,1799	0,1879	0,1935	0,1940	0,1935	0,1879	0,1799	0,2402	0,2568	0,2725	0,2366	0,1861	0,1922
140	0,2028	0,1911	0,2585	0,2582	0,2391	0,2537	0,2128	0,2108	0,2142	0,2155	0,2142	0,2108	0,2128	0,2537	0,2391	0,2582	0,2585	0,1911	0,2028
150	0,1811	0,1860	0,2387	0,2280	0,2314	0,2783	0,2446	0,1612	0,1621	0,1634	0,1621	0,1612	0,2446	0,2783	0,2314	0,2280	0,2387	0,1860	0,1811
160	0,1827	0,1891	0,2310	0,2348	0,2638	0,2057	0,1886	0,1734	0,1680	0,1669	0,1680	0,1734	0,1886	0,2057	0,2638	0,2348	0,2310	0,1891	0,1827
170	0,1950	0,1652	0,1669	0,1654	0,1889	0,1785	0,1986	0,2017	0,2026	0,2022	0,2026	0,2017	0,1986	0,1785	0,1889	0,1654	0,1669	0,1652	0,1950
180	0,3049	0,3247	0,3229	0,3142	0,2865	0,2460	0,3258	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3258	0,2460	0,2865	0,3142	0,3229	0,3247	0,3049

Figura 5.28e - Solo 2 - Perfil de umidade simulado - Instante $t = 20$ min da fase de redistribuição

prof/larg (cm)	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
10	0,0853	0,0853	0,0853	0,1452	0,1700	0,1656	0,1656						0,1656	0,1656	0,1700	0,1452	0,0853	0,0853	0,0853
20	0,1046	0,1046	0,1049	0,1773	0,1872	0,1869	0,1869						0,1869	0,1869	0,1872	0,1773	0,1049	0,1046	0,1046
30	0,1438	0,1477	0,1606	0,1664	0,1673	0,1673	0,1651						0,1651	0,1673	0,1673	0,1664	0,1606	0,1477	0,1438
40	0,1620	0,1653	0,1656	0,1658	0,1658	0,1658	0,1658						0,1658	0,1658	0,1658	0,1658	0,1656	0,1653	0,1620
50	0,1782	0,1783	0,1784	0,1784	0,1784	0,1784	0,1784	0,1784					0,1784	0,1784	0,1784	0,1784	0,1784	0,1783	0,1782
60	0,2022	0,1985	0,1651	0,1648	0,1649	0,1649	0,1649						0,1649	0,1649	0,1649	0,1648	0,1651	0,1985	0,2022
70	0,2566	0,3720	0,2190	0,2484	0,1970	0,1709	0,1678						0,1678	0,1709	0,1970	0,2484	0,2190	0,3720	0,2566
80	0,3372	0,3720	0,2245	0,3720	0,1996	0,2279	0,1838	0,1352	0,1275	0,1253	0,1275	0,1352	0,1838	0,2279	0,1996	0,3720	0,2245	0,3720	0,3372
90	0,2210	0,3720	0,2146	0,3720	0,2503	0,2855	0,1623	0,1482	0,1403	0,1377	0,1403	0,1482	0,1623	0,2855	0,2503	0,3720	0,2146	0,3720	0,2210
100	0,2079	0,3720	0,2208	0,2716	0,2636	0,3081	0,1608	0,1630	0,1541	0,1511	0,1541	0,1630	0,1608	0,3081	0,2636	0,2716	0,2208	0,3720	0,2079
110	0,1962	0,3720	0,2611	0,2853	0,2953	0,3006	0,1607	0,1809	0,1683	0,1653	0,1683	0,1809	0,1607	0,3006	0,2953	0,2853	0,2611	0,3720	0,1962
120	0,1658	0,1945	0,2750	0,2747	0,2689	0,2660	0,2380	0,1907	0,1819	0,1793	0,1819	0,1907	0,2380	0,2660	0,2689	0,2747	0,2750	0,1945	0,1658
130	0,1919	0,1861	0,2366	0,2744	0,2588	0,2403	0,3720	0,1879	0,1935	0,1940	0,1935	0,1879	0,3720	0,2403	0,2588	0,2744	0,2366	0,1861	0,1919
140	0,2025	0,1911	0,2601	0,2698	0,2394	0,2621	0,3720	0,2107	0,2141	0,2165	0,2141	0,2107	0,3720	0,2621	0,2394	0,2698	0,2601	0,1911	0,2025
150	0,1812	0,1860	0,2411	0,2343	0,2361	0,2785	0,2446	0,1612	0,1622	0,1635	0,1622	0,1612	0,2446	0,2785	0,2361	0,2343	0,2411	0,1860	0,1812
160	0,1827	0,1891	0,2283	0,2358	0,2616	0,2069	0,1888	0,1734	0,1680	0,1669	0,1680	0,1734	0,1888	0,2069	0,2616	0,2358	0,2283	0,1891	0,1827
170	0,1935	0,1647	0,1663	0,1652	0,1892	0,1784	0,1961	0,1525	0,1511	0,1505	0,1511	0,1525	0,1961	0,1784	0,1892	0,1652	0,1663	0,1647	0,1935
180	0,3050	0,3196	0,3184	0,3104	0,2825	0,2460	0,2660	0,1889	0,1835	0,1819	0,1835	0,1889	0,2660	0,2460	0,2825	0,3104	0,3184	0,3196	0,3050

prof/larg (cm)	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
10	0,0853	0,0853	0,0853	0,1450	0,1700	0,1666	0,1656						0,1656	0,1656	0,1700	0,1450	0,0853	0,0853	0,0853
20	0,1046	0,1046	0,1049	0,1772	0,1882	0,1877	0,1877						0,1877	0,1877	0,1882	0,1772	0,1049	0,1046	0,1046
30	0,1436	0,1475	0,1599	0,1675	0,1691	0,1691	0,1651						0,1651	0,1691	0,1691	0,1675	0,1599	0,1475	0,1436
40	0,1621	0,1654	0,1661	0,1664	0,1665	0,1665	0,1663						0,1663	0,1665	0,1665	0,1664	0,1661	0,1654	0,1621
50	0,1788	0,1790	0,1791	0,1791	0,1791	0,1791	0,1791						0,1791	0,1791	0,1791	0,1791	0,1791	0,1790	0,1788
60	0,2036	0,2038	0,1664	0,1659	0,1661	0,1661	0,1661						0,1661	0,1661	0,1661	0,1659	0,1664	0,2038	0,2036
70	0,3720	0,3720	0,3720	0,2238	0,2072	0,1715	0,1683						0,1683	0,1715	0,2072	0,2238	0,3720	0,3720	0,3720
80	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,2292	0,1924	0,1352	0,1275	0,1253	0,1275	0,1352	0,1924	0,2292	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720
90	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,2802	0,1624	0,1482	0,1403	0,1377	0,1403	0,1482	0,1624	0,2802	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720
100	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3056	0,1614	0,1629	0,1541	0,1511	0,1541	0,1629	0,1614	0,3056	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720
110	0,2030	0,3720	0,3720	0,3720	0,3049	0,3001	0,1614	0,1809	0,1688	0,1653	0,1688	0,1809	0,1614	0,3001	0,3049	0,3720	0,3720	0,3720	0,2030
120	0,1859	0,3720	0,2793	0,3720	0,2728	0,2873	0,1697	0,1908	0,1819	0,1793	0,1819	0,1908	0,1697	0,2873	0,2728	0,3720	0,2793	0,3720	0,1859
130	0,1913	0,3720	0,2410	0,2770	0,2615	0,2412	0,1619	0,1879	0,1934	0,1939	0,1934	0,1879	0,1619	0,2412	0,2615	0,2770	0,2410	0,3720	0,1913
140	0,2021	0,3720	0,2608	0,2618	0,2401	0,2499	0,1621	0,2107	0,2141	0,2155	0,2141	0,2107	0,1621	0,2499	0,2401	0,2618	0,2608	0,3720	0,2021
150	0,1812	0,1861	0,2437	0,2410	0,2415	0,2774	0,2331	0,1614	0,1623	0,1636	0,1623	0,1614	0,2331	0,2774	0,2415	0,2410	0,2437	0,1861	0,1812
160	0,1827	0,1891	0,2252	0,2368	0,2587	0,2092	0,3720	0,1734	0,1680	0,1669	0,1680	0,1734	0,3720	0,2092	0,2587	0,2368	0,2252	0,1891	0,1827
170	0,1912	0,1641	0,1656	0,1651	0,1895	0,1784	0,3720	0,1525	0,1511	0,1505	0,1511	0,1525	0,3720	0,1784	0,1895	0,1651	0,1656	0,1641	0,1912
180	0,3049	0,3135	0,3127	0,3057	0,2788	0,2460	0,2660	0,1889	0,1835	0,1819	0,1835	0,1889	0,2660	0,2460	0,2788	0,3057	0,3127	0,3135	0,3049

Figura 5.28g - Solo 2 - Perfil de umidade simulado - Instante t = 2h da fase de redistribuição

prof/larg (cm)	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
10	0,0853	0,0853	0,0853	0,1448	0,1700	0,1656	0,1656						0,1656	0,1656	0,1700	0,1448	0,0853	0,0853	0,0853
20	0,1046	0,1046	0,1049	0,1772	0,1892	0,1885	0,1885						0,1885	0,1885	0,1892	0,1772	0,1049	0,1046	0,1046
30	0,1434	0,1472	0,1592	0,1686	0,1711	0,1710	0,1652						0,1652	0,1710	0,1711	0,1686	0,1592	0,1472	0,1434
40	0,1622	0,1656	0,1665	0,1671	0,1672	0,1672	0,1669						0,1669	0,1672	0,1672	0,1671	0,1665	0,1656	0,1622
50	0,1793	0,1797	0,1798	0,1798	0,1798	0,1798	0,1798						0,1798	0,1798	0,1798	0,1798	0,1798	0,1797	0,1793
60	0,2041	0,2019	0,1883	0,1671	0,1673	0,1673	0,1673						0,1673	0,1673	0,1673	0,1671	0,1883	0,2019	0,2041
70	0,3720	0,3720	0,3720	0,2188	0,1896	0,1720	0,1688						0,1688	0,1720	0,1896	0,2188	0,3720	0,3720	0,3720
80	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,2311	0,2047	0,1352	0,1275	0,1253	0,1275	0,1352	0,2047	0,2311	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720
90	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,2756	0,1625	0,1482	0,1403	0,1377	0,1403	0,1482	0,1625	0,2756	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720
100	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3027	0,1621	0,1629	0,1541	0,1511	0,1541	0,1629	0,1621	0,3027	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720
110	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3000	0,1623	0,1809	0,1688	0,1653	0,1688	0,1809	0,1623	0,3000	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720
120	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,2886	0,1699	0,1908	0,1819	0,1793	0,1819	0,1908	0,1699	0,2886	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720
130	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,2427	0,1620	0,1879	0,1934	0,1939	0,1934	0,1879	0,1620	0,2427	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720
140	0,2104	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,2480	0,1621	0,2107	0,2140	0,2154	0,2140	0,2107	0,1621	0,2480	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,2104
150	0,1812	0,3720	0,2811	0,3720	0,2468	0,2758	0,1672	0,1615	0,1624	0,1637	0,1624	0,1615	0,1672	0,2758	0,2468	0,3720	0,2811	0,3720	0,1812
160	0,1827	0,3720	0,2229	0,2377	0,2564	0,2114	0,1538	0,1734	0,1680	0,1669	0,1680	0,1734	0,1538	0,2114	0,2564	0,2377	0,2229	0,3720	0,1827
170	0,1891	0,3720	0,1651	0,1650	0,1897	0,1786	0,1496	0,1526	0,1511	0,1505	0,1511	0,1526	0,1496	0,1786	0,1897	0,1650	0,1651	0,3720	0,1891
180	0,3043	0,3166	0,3081	0,3019	0,2763	0,2457	0,1912	0,1889	0,1835	0,1819	0,1835	0,1889	0,1912	0,2457	0,2763	0,3019	0,3081	0,3166	0,3043

Figura 5.28h - Solo 2 - Perfil de umidade simulado - Instante t = 3h da fase de redistribuição

prof/larg (cm)	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
10	0,0853	0,0853	0,0853	0,1448	0,1700	0,1655	0,1655						0,1655	0,1655	0,1700	0,1448	0,0853	0,0853	0,0853
20	0,1046	0,1046	0,1049	0,1771	0,1903	0,1894	0,1894						0,1894	0,1894	0,1903	0,1771	0,1049	0,1046	0,1046
30	0,1432	0,1469	0,1586	0,1696	0,1731	0,1729	0,1653						0,1653	0,1729	0,1731	0,1696	0,1586	0,1469	0,1432
40	0,1624	0,1658	0,1669	0,1678	0,1681	0,1681	0,1675						0,1675	0,1681	0,1681	0,1678	0,1669	0,1658	0,1624
50	0,1799	0,1804	0,1805	0,1806	0,1806	0,1806	0,1806						0,1806	0,1806	0,1806	0,1806	0,1805	0,1804	0,1799
60	0,2029	0,1990	0,1866	0,1684	0,1685	0,1686	0,1686						0,1686	0,1686	0,1685	0,1684	0,1866	0,1990	0,2029
70	0,3720	0,3720	0,3720	0,3335	0,1783	0,1727	0,1692						0,1692	0,1727	0,1783	0,3335	0,3720	0,3720	0,3720
80	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,2359	0,3720	0,1352	0,1275	0,1253	0,1275	0,1352	0,3720	0,2359	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720
90	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,2392	0,1649	0,1482	0,1403	0,1377	0,1403	0,1482	0,1649	0,2392	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720
100	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,1628	0,1629	0,1541	0,1511	0,1541	0,1629	0,1628	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720
110	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,1632	0,1809	0,1688	0,1653	0,1688	0,1809	0,1632	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720
120	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,1702	0,1909	0,1819	0,1793	0,1819	0,1909	0,1702	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720
130	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,1622	0,1878	0,1933	0,1938	0,1933	0,1878	0,1622	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720
140	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,2479	0,1622	0,2106	0,2140	0,2154	0,2140	0,2106	0,1622	0,2479	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720
150	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,2742	0,1674	0,1617	0,1625	0,1639	0,1625	0,1617	0,1674	0,2742	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720
160	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,2136	0,1539	0,1734	0,1680	0,1669	0,1680	0,1734	0,1539	0,2136	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720
170	0,1911	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,1788	0,1497	0,1526	0,1511	0,1506	0,1511	0,1526	0,1497	0,1788	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,1911
180	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,2802	0,2454	0,1912	0,1889	0,1835	0,1819	0,1835	0,1889	0,1912	0,2454	0,2802	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720

Figura 5.28i - Solo 2 - Perfil de umidade simulado - Instante t = 4h da fase de redistribuição

prof/larg (cm)	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180
10	0,0853	0,0853	0,0853	0,1444	0,1699	0,1655	0,1655						0,1655	0,1655	0,1699	0,1444	0,0853	0,0853	0,0853
20	0,1046	0,1046	0,1049	0,1770	0,1913	0,1902	0,1902						0,1902	0,1902	0,1913	0,1770	0,1049	0,1046	0,1046
30	0,1430	0,1467	0,1580	0,1707	0,1752	0,1750	0,1655						0,1655	0,1750	0,1752	0,1707	0,1580	0,1467	0,1430
40	0,1625	0,1659	0,1673	0,1686	0,1690	0,1690	0,1681						0,1681	0,1690	0,1690	0,1686	0,1673	0,1659	0,1625
50	0,1805	0,1811	0,1813	0,1814	0,1814	0,1814	0,1814						0,1814	0,1814	0,1814	0,1814	0,1813	0,1811	0,1805
60	0,2008	0,1969	0,1864	0,1768	0,1698	0,1699	0,1699						0,1699	0,1699	0,1698	0,1768	0,1864	0,1969	0,2008
70	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,1817	0,1633	0,1604						0,1604	0,1633	0,1817	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720
80	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,1732	0,1352	0,1275	0,1253	0,1275	0,1352	0,1732	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720
90	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,1482	0,1403	0,1377	0,1403	0,1482	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720
100	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,1629	0,1541	0,1511	0,1541	0,1629	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720
110	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,1809	0,1688	0,1653	0,1688	0,1809	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720
120	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,1714	0,1910	0,1819	0,1793	0,1819	0,1910	0,1714	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720
130	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,1624	0,1878	0,1933	0,1938	0,1933	0,1878	0,1624	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720
140	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,1623	0,2106	0,2139	0,2153	0,2139	0,2106	0,1623	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720
150	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,1677	0,1619	0,1627	0,1640	0,1627	0,1619	0,1677	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720
160	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,1540	0,1734	0,1680	0,1669	0,1680	0,1734	0,1540	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720
170	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,1803	0,1497	0,1526	0,1511	0,1506	0,1511	0,1526	0,1497	0,1803	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720
180	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,2451	0,1912	0,1889	0,1835	0,1819	0,1835	0,1889	0,1912	0,2451	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720

Na fase de redistribuição, se comparadas as Figuras 5.18 e 5.19 aos valores simulados apresentados nas Figuras 5.27 e 5.28, observa-se que, nas simulações, o Solo 1 rapidamente atinge a umidade de saturação em todo o perfil, o que não ocorre totalmente nos ensaios observados. Logo no instante $t=0$ da redistribuição a parte inferior do domínio, na simulação A para os Solos 1 e 2, apresenta-se totalmente saturada.

A defasagem na capacidade de drenagem do solo nos ensaios simulados em relação aos ensaios de campo nos primeiros instantes após o término da fase de recessão, é também observada nas horas seguintes, em que a drenagem ocorre mais lentamente que nas condições observadas.

No entanto, embora em ambos os solos a drenagem na simulação tenha ocorrido mais lentamente que nos experimentos de campo, a simulação A para o Solo 2 revelou drenagem mais rápida que para o Solo 1. O Solo 2 já apresentava-se com valores de umidade próximos aos do início do experimento no instante $t=5h$, conforme pode ser observado nas Figuras 5.28 e-j, enquanto que, no Solo 2, ainda eram observados valores próximos da saturação na região inferior do domínio, após 48 horas do início da alimentação.

Deste modo, há uma tendência de que a simulação subestime a capacidade de infiltração e drenagem do solo, em todas as fases do processo de infiltração. Este fato deve-se, provavelmente, às incertezas associadas à curva de retenção ajustada para os Solos 1 e 2, já discutidas na seção 5.1.2.

5.3.2. Simulação B

A simulação B para os Solos 1 e 2 foi realizada utilizando as mesmas vazões dos experimentos de campo e da simulação A, ou seja, $Q = 770 \text{ cm}^3/\text{s}$ para o Solo 1 e $Q = 860 \text{ cm}^3/\text{s}$ para o Solo 2, sendo que, em ambos, o tempo de alimentação é $t=72 \text{ min}$. Todo o perfil foi inicializado com umidade de saturação. Tal como na simulação A, a simulação B foi conduzida de modo a cessar quando fosse atingido o máximo nível d'água na trincheira ou o tempo total de alimentação $t=72 \text{ min}$. Assim como na Simulação A, considerou-se o nível $h=69\text{cm}$ como a máxima lâmina d'água possível na trincheira, cujo valor, ao ser atingido ou superado, cessaria a simulação. Deste modo, os arquivos de entrada com os parâmetros e variáveis do modelo permaneceram inalterados em relação aos apresentados nas Figuras 5.22 e 5.24. Os arquivos de entrada com os valores iniciais de h são mostrados nas Figuras 5.29 e 5.30.

Figura 5.29 - Arquivo com os valores iniciais de h para a Simulação B - Solo 1

Figura 5.30 - Arquivo com os valores iniciais de h para a Simulação B - Solo 2

A Tabela 5.12 apresenta os valores de lâmina d'água e volumes infiltrados fornecidos pela Simulação B para os Solos 1 e 2. As Figuras 5.31 e 5.32 apresentam a evolução do nível d'água na trincheira, nas simulações A e B, para os Solos 1 e 2, respectivamente.

Tabela 5.12 - Fases de alimentação e recessão: Simulação B - valores de lâmina d'água e volume infiltrado, Solos 1 e 2

t (min)	Solo 1		Solo 2	
	lag (cm)	V inf (m³)	lag (cm)	vol inf (m³)
0	4,57	0,00	5,10	0,00
2	4,57	0,00	5,10	0,00
4	9,04	0,00	10,07	0,00
6	13,41	0,00	14,92	0,00
8	17,70	0,00	19,67	0,00
10	21,90	0,00	24,32	0,00
12	26,03	0,00	28,88	0,00
14	30,08	0,00	33,34	0,00
16	34,06	0,00	37,72	0,00
18	37,97	0,00	42,02	0,00
20	41,83	0,00	46,25	0,00
22	44,87	0,02	50,41	0,00
24	47,74	0,04	54,50	0,00
26	50,78	0,06	58,52	0,00
28	53,68	0,08	62,48	0,00
30	56,68	0,09	66,38	0,00
32	59,91	0,10	70,23	0,00
34	63,30	0,10	69,86	0,00
36	66,74	0,11	69,49	0,00
38	70,18	0,11	69,12	0,01
40	69,80	0,12	68,75	0,02
42	69,43	0,13	68,37	0,03
44	69,06	0,14	68,00	0,04
46	68,69	0,15	67,63	0,05
48	68,32	0,16	67,25	0,06
50	67,95	0,17	66,88	0,07
52	67,57	0,18	66,50	0,08
54	67,20	0,19	66,13	0,09
56	66,82	0,20	65,75	0,10
58	66,45	0,21	65,38	0,11
60	66,07	0,22	65,00	0,12
62	65,70	0,23	64,62	0,13
64	65,32	0,24	64,24	0,14
66	64,94	0,25	63,86	0,15
68	64,57	0,26	63,48	0,16
70	64,19	0,27	63,10	0,17
72	63,81	0,28	62,72	0,18
74	63,43	0,29	62,34	0,19
76	63,05	0,30	61,96	0,20
78	62,67	0,31	61,58	0,21
80	62,29	0,32	61,20	0,22
82	61,91	0,33	60,81	0,23
84	61,52	0,34	60,43	0,24
86	61,14	0,35	60,05	0,25
88	60,76	0,36	59,66	0,26
90	60,37	0,37	59,28	0,27
92	59,99	0,38	58,89	0,28
94	59,60	0,39	58,50	0,29
96	59,22	0,40	58,12	0,30
98	58,83	0,41	57,73	0,31
100	58,45	0,42	57,34	0,32
102	58,06	0,43	56,95	0,33
104	57,67	0,44	56,56	0,34
106	57,28	0,45	56,17	0,35
108	56,89	0,46	55,78	0,36
110	56,50	0,47	55,39	0,37
112	56,11	0,48	55,00	0,38
114	55,72	0,49	54,61	0,39

Tabela 5.12 - Continuação: Fases de alimetação e recessão: Simulação B - valores de lâmina d'água e volume infiltrado, Solos 1 e 2

t (min)	Solo 1		Solo 2	
	lag (cm)	V inf (m³)	lag (cm)	vol inf (m³)
116	55,33	0,50	54,21	0,40
118	54,94	0,51	53,82	0,41
120	54,55	0,52	53,42	0,42
122	54,15	0,53	53,03	0,43
124	53,76	0,54	52,63	0,44
126	53,37	0,55	52,24	0,45
128	52,97	0,56	51,84	0,46
130	52,58	0,57	51,44	0,47
132	52,18	0,58	51,05	0,48
134	51,78	0,59	50,65	0,49
136	51,39	0,60	50,25	0,50
138	50,99	0,61	49,85	0,51
140	50,59	0,62	49,45	0,52
142	50,19	0,63	49,05	0,53
144	49,79	0,64	48,64	0,54
146	49,39	0,65	48,24	0,55
148	48,99	0,66	47,84	0,56
150	48,59	0,67	47,43	0,57
152	48,18	0,68	47,03	0,58
154	47,78	0,69	46,63	0,59
156	47,38	0,70	46,22	0,60
158	46,97	0,71	45,81	0,61
160	46,57	0,72	45,41	0,62
162	46,16	0,73	45,00	0,63
164	45,75	0,74	44,59	0,64
166	45,35	0,75	44,18	0,65
168	44,94	0,76	43,77	0,66
170	44,53	0,77	43,36	0,67
172	44,12	0,78	42,95	0,68
174	43,71	0,79	42,54	0,69
176	43,30	0,80	42,12	0,70
178	42,89	0,81	41,71	0,71
180	42,48	0,82	41,30	0,72
182	42,06	0,83	40,88	0,73
184	41,65	0,84	40,47	0,74
186	41,24	0,85	40,05	0,75
188	40,82	0,86	39,63	0,76
190	40,41	0,87	39,22	0,77
192	39,99	0,88	38,80	0,78
194	39,57	0,89	38,38	0,79
196	39,15	0,90	37,96	0,80
198	38,74	0,91	37,54	0,81
200	38,32	0,92	37,12	0,82
202	37,90	0,93	36,69	0,83
204	37,48	0,94	36,27	0,84
206	37,05	0,95	35,85	0,85
208	36,63	0,96	35,42	0,86
210	36,21	0,97	35,00	0,87
212	35,79	0,98	34,57	0,88
214	35,36	0,99	34,15	0,89
216	34,94	1,00	33,72	0,90
218	34,51	1,01	33,29	0,91
220	34,08	1,02	32,86	0,92
222	33,66	1,03	32,43	0,93
224	33,23	1,04	32,00	0,94
226	32,80	1,05	31,57	0,95
228	32,37	1,06	31,14	0,96

Tabela 5.12 - Continuação: Fases de alimetação e recessão: Simulação B - valores de lâmina d'água e volume infiltrado, Solos 1 e 2

t (min)	Solo 1		Solo 2	
	lag (cm)	V inf (m³)	lag (cm)	vol inf (m³)
230	31,94	1,07	30,70	0,97
232	31,51	1,08	30,27	0,98
234	31,07	1,09	29,83	0,99
236	30,64	1,10	29,40	1,00
238	30,21	1,11	28,96	1,01
240	29,77	1,12	28,53	1,02
242	29,34	1,13	28,09	1,03
244	28,90	1,14	27,65	1,04
246	28,46	1,15	27,21	1,05
248	28,02	1,16	26,77	1,06
250	27,58	1,17	26,33	1,07
252	27,14	1,18	25,88	1,08
254	26,70	1,19	25,44	1,09
256	26,26	1,20	25,00	1,10
258	25,82	1,21	24,55	1,11
260	25,38	1,22	24,11	1,12
262	24,93	1,23	23,66	1,13
264	24,49	1,24	23,21	1,14
266	24,04	1,25	22,76	1,15
268	23,59	1,26	22,32	1,16
270	23,15	1,27	21,86	1,17
272	22,70	1,28	21,41	1,18
274	22,25	1,29	20,96	1,19
276	21,80	1,30	20,51	1,20
278	21,35	1,31	20,05	1,21
280	20,90	1,32	19,60	1,22
282	20,44	1,33	19,14	1,23
284	19,99	1,34	18,69	1,24
286	19,53	1,35	18,23	1,25
288	19,08	1,36	17,77	1,26
290	18,62	1,37	17,31	1,27
292	18,16	1,38	16,85	1,28
294	17,70	1,39	16,39	1,29
296	17,24	1,40	15,93	1,30
298	16,78	1,41	15,46	1,31
300	16,32	1,42	15,00	1,32
302	15,86	1,43	14,53	1,33
304	15,39	1,44	14,07	1,34
306	14,93	1,45	13,60	1,35
308	14,46	1,46	13,13	1,36
310	14,00	1,47	12,66	1,37
312	13,53	1,48	12,19	1,38
314	13,06	1,49	11,72	1,39
316	12,59	1,50	11,24	1,40
318	12,12	1,51	10,77	1,41
320	11,65	1,52	10,30	1,42
322	11,17	1,53	9,82	1,43
324	10,70	1,54	9,34	1,44
326	10,23	1,55	8,86	1,45
328	9,75	1,56	8,38	1,46
330	9,27	1,57	7,90	1,47
332	8,79	1,58	7,42	1,48
334	8,31	1,59	6,94	1,49
336	7,83	1,60	6,46	1,50
338	7,35	1,61	5,97	1,51
340	6,87	1,62	5,48	1,52
342	6,38	1,63	5,00	1,53
344	5,90	1,64	4,51	1,54
346	5,41	1,65	4,02	1,55
348	4,93	1,66	3,53	1,56
350	4,44	1,67	3,04	1,57
352	3,95	1,68	2,54	1,58
354	3,46	1,69	2,05	1,59
356	2,96	1,70	1,55	1,60
358	2,47	1,71	1,06	1,61
360	1,98	1,72	0,00	1,62
362	1,48	1,73	0,00	1,62
364	0,00	1,74	0,00	1,62

Figura 5.31 - Evolução do nível d'água na trincheira, Simulações A e B - Solo 1

Figura 5.32 - Evolução do nível d'água na trincheira, Simulações A e B - Solo 2

Conforme pode ser observado na Tabela 5.12, o resultado da simulação B revelou que foi atingida a lâmina d'água máxima, no Solo 1, aos 36 minutos, e, no Solo 2, aos 32 minutos. A simulação B para os dois solos cessou devido à lâmina máxima ter sido alcançada, e não devido ao volume total de alimentação ser atingido.

O tempo em que a altura máxima de água no interior da trincheira foi atingida, nos Solos 1 e 2, partindo da condição de saturação total do perfil, foi de, aproximadamente, metade do tempo em que o mesmo ocorreu na simulação A, conforme pode ser observado nas Figuras 5.31 e 5.32. O tempo para finalizar a fase de recessão, para o Solo 1, foi de 366

minutos, e, para o Solo 2, de 360 minutos. O volume total infiltrado no Solo 1 foi de 1,60 m³, e, no Solo 2, de 1,63 m³. Os dois solos se comportaram de maneira muito semelhante na simulação saturada.

Pode-se estimar a precipitação que gera o volume de 1,70 m³ durante o intervalo de 35 minutos, que é o tempo médio em que as trincheiras nos Solos 1 e 2 atingiram nível máximo na simulação saturada. Considerando um lote de área 250 m², com 60% de ocupação, gerando uma área impermeável de 150 m², obtém-se que o volume de 1,70 m³ equivale a uma lâmina d'água de 11,33 mm sobre a área impermeável, ou 0,32 mm/min (19,4 mm/h) nos 35 minutos de alimentação. A partir da equação de chuva de São Carlos (Equação 3.2), e considerando um período de retorno de 2 anos, obtém-se a intensidade de precipitação de 45,3 mm/h, ou 26 mm em 35 minutos. Sendo assim, nas condições de saturação total do perfil, as trincheiras nos Solos 1 e 2 se revelaram capazes de absorver cerca de um terço do volume de chuva a elas aduzido.

As Figuras 5.33 e 5.34 ilustram o desenvolvimento do perfil de umidade fornecido pela simulação B para os Solos 1 e 2, respectivamente.

prof/larg (cm)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
0	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600						0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600
10	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600						0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600
20	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600						0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600
30	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600						0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600
40	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600						0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600
50	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600						0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600
60	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600						0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600
70	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600
80	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600
90	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600
100	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600
110	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600
120	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600
130	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600
140	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600
150	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600
160	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600
170	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600	0,5600

Figura 5.33a - Solo 1 - Simulação B: Perfil de umidade antes da irrigação

prof/larg (cm)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
0	0,4779	0,4773	0,4765	0,4755	0,4746	0,4739	0,4739						0,4739	0,4739	0,4746	0,4755	0,4765	0,4773	0,4779
10	0,5178	0,5174	0,5169	0,5155	0,5139	0,5117	0,5117						0,5117	0,5117	0,5139	0,5155	0,5169	0,5174	0,5178
20	0,5372	0,5370	0,5364	0,5356	0,5342	0,5320	0,5320						0,5320	0,5320	0,5342	0,5356	0,5364	0,5370	0,5372
30	0,5475	0,5474	0,5471	0,5467	0,5459	0,5443	0,5443						0,5443	0,5443	0,5459	0,5467	0,5471	0,5474	0,5475
40	0,5532	0,5532	0,5533	0,5533	0,5532	0,5529	0,5510						0,5510	0,5528	0,5532	0,5533	0,5533	0,5532	0,5532
50	0,5565	0,5566	0,5569	0,5574	0,5581	0,5589	0,5591						0,5591	0,5589	0,5581	0,5574	0,5569	0,5566	0,5565
60	0,5585	0,5587	0,5592	0,5601	0,5617	0,5640	0,5663						0,5663	0,5640	0,5617	0,5601	0,5592	0,5587	0,5585
70	0,5597	0,5599	0,5606	0,5620	0,5643	0,5677	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5677	0,5643	0,5620	0,5606	0,5599	0,5597
80	0,5604	0,5606	0,5613	0,5627	0,5650	0,5677	0,5696	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5696	0,5677	0,5650	0,5627	0,5613	0,5606	0,5604
90	0,5607	0,5609	0,5615	0,5627	0,5645	0,5667	0,5686	0,5694	0,5697	0,5698	0,5697	0,5694	0,5686	0,5667	0,5645	0,5627	0,5615	0,5609	0,5607
100	0,5610	0,5611	0,5616	0,5625	0,5638	0,5654	0,5669	0,5679	0,5684	0,5686	0,5684	0,5679	0,5669	0,5654	0,5638	0,5625	0,5616	0,5611	0,5610
110	0,5613	0,5614	0,5617	0,5623	0,5631	0,5642	0,5652	0,5660	0,5665	0,5667	0,5665	0,5660	0,5652	0,5642	0,5631	0,5623	0,5617	0,5614	0,5613
120	0,5619	0,5619	0,5621	0,5625	0,5630	0,5636	0,5642	0,5647	0,5651	0,5652	0,5651	0,5647	0,5642	0,5636	0,5630	0,5625	0,5621	0,5619	0,5619
130	0,5629	0,5629	0,5630	0,5632	0,5635	0,5638	0,5642	0,5645	0,5647	0,5647	0,5647	0,5645	0,5642	0,5638	0,5635	0,5632	0,5630	0,5629	0,5629
140	0,5645	0,5645	0,5646	0,5647	0,5648	0,5650	0,5651	0,5653	0,5654	0,5654	0,5654	0,5653	0,5651	0,5650	0,5648	0,5647	0,5646	0,5645	0,5645
150	0,5668	0,5668	0,5667	0,5667	0,5668	0,5668	0,5669	0,5669	0,5670	0,5670	0,5670	0,5669	0,5669	0,5668	0,5668	0,5667	0,5667	0,5668	0,5668
160	0,5687	0,5687	0,5687	0,5687	0,5687	0,5687	0,5688	0,5688	0,5688	0,5688	0,5688	0,5688	0,5688	0,5688	0,5687	0,5687	0,5687	0,5687	0,5687
170	0,5693	0,5693	0,5693	0,5693	0,5693	0,5693	0,5693	0,5693	0,5693	0,5693	0,5693	0,5693	0,5693	0,5693	0,5693	0,5693	0,5693	0,5693	0,5693

Figura 5.33b - Solo 1 - Simulação B: Perfil de umidade no instante t=2 min da fase de alimentação

prof/larg (cm)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
0	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700						0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
10	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700						0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
20	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700						0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
30	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700						0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
40	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700						0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
50	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700						0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
60	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700						0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
70	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
80	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
90	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
100	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
110	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
120	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
130	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
140	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
150	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
160	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
170	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700

Figura 5.33c - Solo 1 - Simulação B: Perfil de umidade no instante $t=36$ min da fase de alimentação = instante $t=0$ da fase de recessão (NA máximo)

prof/larg (cm)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
0	0,2579	0,2579	0,2578	0,2578	0,2578	0,2578	0,2578						0,2578	0,2578	0,2578	0,2578	0,2578	0,2579	0,2579
10	0,2827	0,2824	0,2822	0,2819	0,2817	0,2814	0,2814						0,2814	0,2814	0,2817	0,2819	0,2822	0,2824	0,2827
20	0,3122	0,3118	0,3114	0,3110	0,3107	0,3103	0,3103						0,3103	0,3103	0,3107	0,3110	0,3114	0,3118	0,3122
30	0,3507	0,3502	0,3497	0,3493	0,3488	0,3483	0,3479						0,3479	0,3483	0,3488	0,3493	0,3497	0,3502	0,3507
40	0,4032	0,4028	0,4023	0,4018	0,4013	0,4008	0,4003						0,4003	0,4008	0,4013	0,4018	0,4023	0,4028	0,4032
50	0,4634	0,4636	0,4637	0,4636	0,4634	0,4630	0,4626						0,4626	0,4630	0,4634	0,4636	0,4637	0,4636	0,4634
60	0,5107	0,5125	0,5147	0,5168	0,5184	0,5184	0,5186						0,5186	0,5184	0,5184	0,5186	0,5187	0,5185	0,5107
70	0,5489	0,5506	0,5538	0,5577	0,5620	0,5663	0,5697	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5697	0,5663	0,5620	0,5577	0,5538	0,5506	0,5489
80	0,5566	0,5574	0,5598	0,5625	0,5655	0,5681	0,5697	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5697	0,5681	0,5655	0,5625	0,5598	0,5574	0,5566
90	0,5617	0,5622	0,5636	0,5654	0,5673	0,5688	0,5696	0,5699	0,5700	0,5700	0,5700	0,5699	0,5696	0,5688	0,5673	0,5654	0,5636	0,5622	0,5617
100	0,5660	0,5653	0,5661	0,5672	0,5683	0,5691	0,5696	0,5699	0,5699	0,5699	0,5699	0,5699	0,5699	0,5691	0,5683	0,5672	0,5661	0,5653	0,5660
110	0,5672	0,5673	0,5678	0,5684	0,5689	0,5694	0,5697	0,5699	0,5699	0,5699	0,5699	0,5699	0,5697	0,5694	0,5689	0,5684	0,5678	0,5673	0,5672
120	0,5685	0,5686	0,5688	0,5691	0,5694	0,5696	0,5698	0,5699	0,5699	0,5699	0,5699	0,5699	0,5698	0,5696	0,5694	0,5691	0,5688	0,5686	0,5685
130	0,5693	0,5693	0,5694	0,5695	0,5697	0,5698	0,5699	0,5699	0,5699	0,5699	0,5699	0,5699	0,5698	0,5696	0,5694	0,5691	0,5688	0,5686	0,5693
140	0,5697	0,5697	0,5698	0,5698	0,5699	0,5699	0,5699	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5699	0,5699	0,5699	0,5699	0,5698	0,5697	0,5697
150	0,5699	0,5699	0,5699	0,5699	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5699	0,5699	0,5699
160	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
170	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700

Figura 5.33d - Solo 1 - Simulação B: Perfil de umidade no instante $t=366$ min da fase de recessão = instante $t=0$ da fase de redistribuição (NA=0)

prof/larg (cm)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
0	0,2571	0,2571	0,2571	0,2571	0,2571	0,2570	0,2570						0,2570	0,2570	0,2571	0,2571	0,2571	0,2571	0,2571
10	0,3146	0,3146	0,3146	0,3146	0,3146	0,3146	0,3146						0,3146	0,3146	0,3146	0,3146	0,3146	0,3146	0,3146
20	0,3838	0,3838	0,3838	0,3838	0,3837	0,3837	0,3837						0,3837	0,3837	0,3837	0,3838	0,3838	0,3838	0,3838
30	0,4575	0,4574	0,4574	0,4574	0,4574	0,4574	0,4571						0,4571	0,4574	0,4574	0,4574	0,4574	0,4574	0,4575
40	0,5204	0,5204	0,5204	0,5204	0,5204	0,5204	0,5202						0,5202	0,5204	0,5204	0,5204	0,5204	0,5204	0,5204
50	0,5579	0,5579	0,5579	0,5579	0,5579	0,5579	0,5578						0,5578	0,5578	0,5579	0,5579	0,5579	0,5579	0,5579
60	0,5695	0,5695	0,5695	0,5695	0,5695	0,5695	0,5695						0,5695	0,5695	0,5695	0,5695	0,5695	0,5695	0,5695
70	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5623	0,5390	0,5276	0,5390	0,5623	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
80	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5673	0,5597	0,5553	0,5597	0,5673	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
90	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5698	0,5685	0,5659	0,5644	0,5659	0,5685	0,5698	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
100	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5697	0,5691	0,5681	0,5677	0,5681	0,5691	0,5697	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
110	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5699	0,5695	0,5691	0,5689	0,5691	0,5695	0,5699	0,5699	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
120	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5699	0,5697	0,5696	0,5695	0,5696	0,5697	0,5698	0,5699	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
130	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5699	0,5698	0,5698	0,5698	0,5698	0,5698	0,5699	0,5699	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
140	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5699	0,5699	0,5699	0,5699	0,5699	0,5699	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
150	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
160	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
170	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700

Figura 5.33e - Solo 1 - Simulação B: Perfil de umidade no instante $t=20$ min da fase de redistribuição

prof/larg (cm)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
0	0,2571	0,2571	0,2571	0,2571	0,2571	0,2570	0,2570						0,2570	0,2570	0,2571	0,2571	0,2571	0,2571	0,2571
10	0,3147	0,3147	0,3147	0,3147	0,3148	0,3148	0,3148						0,3148	0,3148	0,3148	0,3147	0,3147	0,3147	0,3147
20	0,3839	0,3839	0,3839	0,3839	0,3839	0,3838	0,3838						0,3838	0,3838	0,3839	0,3839	0,3839	0,3839	0,3839
30	0,4578	0,4578	0,4578	0,4578	0,4578	0,4578	0,4575						0,4575	0,4578	0,4578	0,4578	0,4578	0,4578	0,4578
40	0,5208	0,5208	0,5208	0,5208	0,5208	0,5205	0,5205						0,5205	0,5205	0,5205	0,5208	0,5208	0,5208	0,5208
50	0,5579	0,5579	0,5579	0,5579	0,5579	0,5579	0,5579						0,5579	0,5579	0,5579	0,5579	0,5579	0,5579	0,5579
60	0,5695	0,5695	0,5695	0,5695	0,5695	0,5695	0,5695						0,5695	0,5695	0,5695	0,5695	0,5695	0,5695	0,5695
70	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5814	0,5398	0,5288	0,5398	0,5814	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
80	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5873	0,5600	0,5569	0,5600	0,5873	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
90	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5698	0,5688	0,5661	0,5647	0,5661	0,5688	0,5698	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
100	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5698	0,5692	0,5682	0,5678	0,5682	0,5692	0,5698	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
110	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5699	0,5698	0,5695	0,5691	0,5680	0,5691	0,5695	0,5698	0,5699	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
120	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5699	0,5698	0,5697	0,5696	0,5695	0,5696	0,5697	0,5698	0,5699	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
130	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5699	0,5698	0,5699	0,5698	0,5688	0,5688	0,5699	0,5698	0,5699	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
140	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5699	0,5699	0,5699	0,5699	0,5699	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
150	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
160	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700
170	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700	0,5700

[illegible][illegible][illegible]

Figura 5. 33j - Solo 1 - Simulação B: Perfil de umidade no instante $t = 5h$ da fase de redistribuição

[illegible][illegible][illegible]

Figura 5. 33n - Solo 1 - Simulação B: Perfil de umidade no instante $t = 48h$ da fase de redistribuição

[illegible]

Figura 5.34a - Solo 2 - Simulação B: Perfil de umidade antes da irrigação

[illegible]

Figura 5. 34b - Solo 2 - Simulação B: Perfil de umidade no instante $t=2$ min da fase de alimentação

[illegible]

Figura 5. 34c - Solo 2 - Simulação B; Perfil de umidade no instante $t=32$ min da fase de alimentação $\equiv$ instante $t=0$ da fase de recessão (NA máximo)

Profilarg (cm)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
0	0,1716	0,1716	0,1716	0,1716	0,1716	0,1716	0,1716						0,1716	0,1716	0,1716	0,1716	0,1716	0,1716	0,1716
10	0,1638	0,1638	0,1638	0,1638	0,1638	0,1638	0,1638						0,1638	0,1638	0,1638	0,1638	0,1638	0,1638	0,1638
20	0,1658	0,1658	0,1658	0,1658	0,1658	0,1658	0,1658						0,1658	0,1658	0,1658	0,1658	0,1658	0,1658	0,1658
30	0,2138	0,2138	0,2138	0,2138	0,2138	0,2138	0,2138						0,2138	0,2138	0,2138	0,2138	0,2138	0,2138	0,2138
40	0,1620	0,1620	0,1620	0,1620	0,1620	0,1620	0,1620						0,1620	0,1620	0,1620	0,1620	0,1620	0,1620	0,1620
50	0,1627	0,1627	0,1627	0,1627	0,1627	0,1627	0,1627						0,1627	0,1627	0,1627	0,1627	0,1627	0,1627	0,1627
60	0,2469	0,2631	0,2078	0,1797	0,1479	0,1479	0,1480						0,1480	0,1479	0,1479	0,1797	0,2078	0,2631	0,2469
70	0,2884	0,2513	0,2019	0,2228	0,3001	0,3461	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3461	0,3001	0,2228	0,2019	0,2513
80	0,2898	0,2511	0,1808	0,1970	0,2475	0,2760	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,2760	0,2475	0,1970	0,1808	0,2511
90	0,1784	0,2469	0,1939	0,2083	0,2610	0,3069	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3069	0,2610	0,2083	0,1939	0,2469
100	0,2046	0,2094	0,2494	0,3044	0,2513	0,2811	0,2924	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,2924	0,2611	0,2513	0,3044	0,2494	0,2094	0,2046
110	0,2844	0,2705	0,2660	0,2757	0,3001	0,2286	0,2830	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,2830	0,2296	0,3001	0,2757	0,2660	0,2705	0,2844
120	0,2163	0,2361	0,3471	0,2331	0,2642	0,2422	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,2224	0,2642	0,2331	0,3471	0,2361	0,2163
130	0,2002	0,2114	0,3390	0,2561	0,2564	0,2303	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,2303	0,2564	0,2561	0,3390	0,2114	0,2002
140	0,2409	0,2530	0,2489	0,3100	0,2568	0,2406	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,2406	0,2568	0,3100	0,2489	0,2530	0,2409
150	0,3175	0,3192	0,2343	0,3443	0,2644	0,2461	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,2841	0,2644	0,3443	0,2343	0,3192	0,3175
160	0,3270	0,3365	0,3109	0,3392	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3392	0,3109	0,3365	0,3270
170	0,1741	0,1903	0,2240	0,2490	0,2758	0,3450	0,3195	0,2550	0,3416	0,3720	0,3720	0,3416	0,2550	0,3195	0,3450	0,2758	0,2490	0,2240	0,1903

Figura 5. 34d - Solo 2 - Simulação B: Perfil de umidade no instante $t=360$ min da fase de recessão $\equiv$ instante $t = 0$ da fase de redistribuição (NA=0)

prof/larg (cm)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
0	0,1716	0,1716	0,1716	0,1716	0,1716	0,1716	0,1716						0,1716	0,1716	0,1716	0,1716	0,1716	0,1716	0,1716
10	0,1644	0,1644	0,1644	0,1644	0,1644	0,1644	0,1644						0,1644	0,1644	0,1644	0,1644	0,1644	0,1644	0,1644
20	0,1692	0,1692	0,1692	0,1692	0,1692	0,1692	0,1692						0,1692	0,1692	0,1692	0,1692	0,1692	0,1692	0,1692
30	0,2151	0,2151	0,2151	0,2151	0,2151	0,2151	0,2136						0,2136	0,2151	0,2151	0,2151	0,2151	0,2151	0,2151
40	0,1670	0,1670	0,1670	0,1670	0,1670	0,1670	0,1669						0,1669	0,1670	0,1670	0,1670	0,1670	0,1670	0,1670
50	0,1630	0,1630	0,1630	0,1630	0,1630	0,1630	0,1630						0,1630	0,1630	0,1630	0,1630	0,1630	0,1630	0,1630
60	0,2421	0,2647	0,2087	0,1801	0,1488	0,1507	0,1290						0,1290	0,1507	0,1488	0,1801	0,2087	0,2647	0,2421
70	0,3720	0,3345	0,2068	0,2260	0,2703	0,2611	0,1459	0,1290	0,1242	0,1229	0,1242	0,1290	0,1459	0,2611	0,2703	0,2260	0,2068	0,3345	0,3720
80	0,3151	0,2510	0,1813	0,1972	0,2494	0,2823	0,1516	0,1416	0,1361	0,1345	0,1361	0,1416	0,1516	0,2823	0,2494	0,1972	0,1813	0,2510	0,3151
90	0,1788	0,2511	0,1938	0,2066	0,2618	0,2665	0,1532	0,1567	0,1497	0,1476	0,1497	0,1567	0,1532	0,2665	0,2618	0,2066	0,1938	0,2511	0,1788
100	0,2039	0,2100	0,2497	0,2995	0,2631	0,2620	0,2121	0,1739	0,1649	0,1626	0,1649	0,1739	0,2121	0,2620	0,2631	0,2995	0,2497	0,2100	0,2039
110	0,2841	0,2725	0,2556	0,2768	0,3007	0,2371	0,3720	0,1873	0,1815	0,1797	0,1815	0,1873	0,3720	0,2371	0,3007	0,2768	0,2556	0,2725	0,2841
120	0,2177	0,2368	0,3296	0,2339	0,2674	0,2222	0,1917	0,1993	0,2026	0,2027	0,2026	0,1993	0,1917	0,2222	0,2674	0,2339	0,3296	0,2368	0,2177
130	0,2002	0,2114	0,3438	0,2539	0,2573	0,2305	0,1515	0,1494	0,1514	0,1524	0,1514	0,1494	0,1515	0,2305	0,2573	0,2539	0,3438	0,2114	0,2002
140	0,2369	0,2495	0,2658	0,3022	0,2543	0,2399	0,1597	0,1517	0,1508	0,1507	0,1508	0,1517	0,1597	0,2399	0,2543	0,3022	0,2658	0,2495	0,2369
150	0,3060	0,3033	0,2319	0,3217	0,1468	0,1505	0,1658	0,1668	0,1668	0,1668	0,1668	0,1668	0,1658	0,1505	0,1468	0,3217	0,2319	0,3033	0,3060
160	0,3278	0,3309	0,3076	0,3200	0,1770	0,1760	0,1881	0,1929	0,1947	0,1951	0,1947	0,1929	0,1881	0,1760	0,1770	0,3200	0,3076	0,3309	0,3278
170	0,1670	0,1711	0,1773	0,1907	0,2467	0,2510	0,2721	0,2948	0,3097	0,3141	0,3097	0,2948	0,2721	0,2510	0,2467	0,1907	0,1773	0,1711	0,1670

Figura 5. 34e - Solo 2 - Simulação B: Perfil de umidade no instante $t = 20$ min da fase de redistribuição

prof/larg (cm)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
0	0,1715	0,1715	0,1715	0,1715	0,1715	0,1715	0,1715						0,1715	0,1715	0,1715	0,1715	0,1715	0,1715	0,1715
10	0,1649	0,1649	0,1649	0,1649	0,1649	0,1649	0,1649						0,1649	0,1649	0,1649	0,1649	0,1649	0,1649	0,1649
20	0,1695	0,1695	0,1695	0,1695	0,1695	0,1695	0,1695						0,1695	0,1695	0,1695	0,1695	0,1695	0,1695	0,1695
30	0,2166	0,2166	0,2166	0,2166	0,2166	0,2166	0,2136						0,2136	0,2166	0,2166	0,2166	0,2166	0,2166	0,2166
40	0,1721	0,1721	0,1721	0,1721	0,1721	0,1721	0,1714						0,1714	0,1721	0,1721	0,1721	0,1721	0,1721	0,1721
50	0,1634	0,1634	0,1635	0,1635	0,1635	0,1635	0,1635						0,1635	0,1635	0,1635	0,1635	0,1635	0,1634	0,1634
60	0,2307	0,2533	0,2097	0,1806	0,1493	0,1511	0,1295						0,1295	0,1511	0,1493	0,1806	0,2097	0,2533	0,2307
70	0,3720	0,3720	0,2126	0,2302	0,2604	0,2551	0,1459	0,1290	0,1242	0,1229	0,1242	0,1290	0,1459	0,2551	0,2604	0,2302	0,2126	0,3720	0,3720
80	0,3720	0,3720	0,1819	0,1974	0,2497	0,2768	0,1516	0,1416	0,1361	0,1345	0,1361	0,1416	0,1516	0,2768	0,2497	0,1974	0,1819	0,3720	0,3720
90	0,3720	0,2524	0,1938	0,2052	0,2620	0,2916	0,1533	0,1567	0,1497	0,1476	0,1497	0,1567	0,1533	0,2916	0,2620	0,2052	0,1938	0,2524	0,3720
100	0,2032	0,2104	0,2503	0,2959	0,2532	0,2618	0,1627	0,1739	0,1649	0,1625	0,1649	0,1739	0,1627	0,2618	0,2532	0,2959	0,2503	0,2104	0,2032
110	0,2838	0,2740	0,2521	0,2814	0,3002	0,2406	0,1731	0,1873	0,1815	0,1797	0,1815	0,1873	0,1731	0,2406	0,3002	0,2814	0,2521	0,2740	0,2838
120	0,2190	0,2377	0,3143	0,2348	0,2706	0,2222	0,3720	0,1993	0,2026	0,2027	0,2026	0,1993	0,3720	0,2222	0,2706	0,2348	0,3143	0,2377	0,2190
130	0,2002	0,2115	0,3418	0,2524	0,2585	0,2307	0,3720	0,1494	0,1515	0,1524	0,1515	0,1494	0,3720	0,2307	0,2585	0,2524	0,3418	0,2115	0,2002
140	0,2341	0,2477	0,2831	0,2994	0,2539	0,2394	0,1567	0,1517	0,1508	0,1507	0,1508	0,1517	0,1567	0,2394	0,2539	0,2994	0,2831	0,2477	0,2341
150	0,2967	0,2927	0,2304	0,3154	0,1475	0,1510	0,1658	0,1668	0,1668	0,1668	0,1668	0,1668	0,1658	0,1510	0,1475	0,3154	0,2304	0,2927	0,2967
160	0,3248	0,3245	0,3039	0,3115	0,1769	0,1779	0,1878	0,1922	0,1935	0,1936	0,1935	0,1922	0,1878	0,1779	0,1769	0,3115	0,3039	0,3245	0,3248
170	0,1659	0,1697	0,1654	0,1685	0,1853	0,1875	0,1888	0,2129	0,2229	0,2259	0,2229	0,2129	0,1888	0,1875	0,1853	0,1685	0,1654	0,1697	0,1659

Figura 5. 34f - Solo 2 - Simulação B: Perfil de umidade no instante $t = 1$ h da fase de redistribuição

prof/larg (cm)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
0	0,1715	0,1715	0,1715	0,1715	0,1715	0,1715	0,1715						0,1715	0,1715	0,1715	0,1715	0,1715	0,1715	0,1715
10	0,1657	0,1657	0,1657	0,1657	0,1657	0,1657	0,1657						0,1657	0,1657	0,1657	0,1657	0,1657	0,1657	0,1657
20	0,1701	0,1701	0,1701	0,1701	0,1701	0,1701	0,1701						0,1701	0,1701	0,1701	0,1701	0,1701	0,1701	0,1701
30	0,2189	0,2169	0,2189	0,2169	0,2169	0,2169	0,2161						0,2161	0,2169	0,2169	0,2169	0,2169	0,2169	0,2189
40	0,1801	0,1801	0,1801	0,1801	0,1801	0,1801	0,1782						0,1782	0,1801	0,1801	0,1801	0,1801	0,1801	0,1801
50	0,1644	0,1643	0,1644	0,1645	0,1645	0,1645	0,1644						0,1644	0,1645	0,1645	0,1645	0,1644	0,1643	0,1644
60	0,2181	0,2257	0,2114	0,1811	0,1500	0,1518	0,1303						0,1303	0,1518	0,1500	0,1811	0,2114	0,2257	0,2181
70	0,3720	0,3720	0,3720	0,2331	0,2412	0,2490	0,1460	0,1290	0,1242	0,1229	0,1242	0,1290	0,1460	0,2490	0,2412	0,2331	0,3720	0,3720	0,3720
80	0,3720	0,3720	0,1845	0,1821	0,1824	0,2767	0,1515	0,1416	0,1361	0,1345	0,1361	0,1416	0,1515	0,2767	0,1824	0,1821	0,1845	0,3720	0,3720
90	0,3720	0,3720	0,1938	0,2042	0,2665	0,2862	0,1535	0,1567	0,1497	0,1476	0,1497	0,1567	0,1535	0,2862	0,2665	0,2042	0,1938	0,3720	0,3720
100	0,3720	0,3720	0,2515	0,2943	0,2528	0,2615	0,1648	0,1739	0,1649	0,1625	0,1649	0,1739	0,1648	0,2615	0,2528	0,2943	0,2515	0,3720	0,3720
110	0,3720	0,3720	0,2513	0,2851	0,2994	0,2432	0,1598	0,1873	0,1815	0,1797	0,1815	0,1873	0,1598	0,2432	0,2994	0,2851	0,2513	0,3720	0,3720
120	0,3720	0,2399	0,2962	0,2365	0,2751	0,2223	0,1616	0,1993	0,2025	0,2026	0,2025	0,1993	0,1616	0,2223	0,2751	0,2365	0,2962	0,2399	0,3720
130	0,2002	0,2118	0,3368	0,2505	0,2604	0,2311	0,2373	0,1495	0,1516	0,1525	0,1516	0,1495	0,2373	0,2311	0,2604	0,2505	0,3368	0,2118	0,2002
140	0,2315	0,2461	0,3017	0,2962	0,2545	0,2388	0,3720	0,1517	0,1503	0,1507	0,1503	0,1517	0,3720	0,2388	0,2545	0,2962	0,3017	0,2461	0,2315
150	0,2876	0,2820	0,2303	0,3102	0,1485	0,1516	0,3720	0,1668	0,1668	0,1667	0,1668	0,1668	0,3720	0,1516	0,1485	0,3102	0,2303	0,2820	0,2876
160	0,3191	0,3169	0,2992	0,3050	0,1769	0,1779	0,3720	0,1922	0,1934	0,1936	0,1934	0,1922	0,3720	0,1779	0,1769	0,3050	0,2992	0,3169	0,3191
170	0,1651	0,1649	0,1634	0,1639	0,1633	0,1635	0,1644	0,1658	0,1672	0,1676	0,1672	0,1658	0,1644	0,1635	0,1633	0,1639	0,1634	0,1649	0,1651

Figura 5. 34g - Solo 2 - Simulação B: Perfil de umidade no instante $t = 2$ h da fase de redistribuição

prof/larg (cm)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
0	0,1715	0,1715	0,1715	0,1715	0,1715	0,1715	0,1715						0,1715	0,1715	0,1715	0,1715	0,1715	0,1715	0,1715

prof/larg (cm)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
0	0,1715	0,1715	0,1715	0,1715	0,1715	0,1715	0,1715						0,1715	0,1715	0,1715	0,1715	0,1715	0,1715	0,1715
10	0,1673	0,1673	0,1673	0,1673	0,1673	0,1673	0,1673						0,1673	0,1673	0,1673	0,1673	0,1673	0,1673	0,1673
20	0,1713	0,1713	0,1713	0,1713	0,1713	0,1713	0,1713						0,1713	0,1713	0,1713	0,1713	0,1713	0,1713	0,1713
30	0,2244	0,2244	0,2244	0,2244	0,2244	0,2244	0,2195						0,2195	0,2244	0,2244	0,2244	0,2244	0,2244	0,2244
40	0,1685	0,1685	0,1685	0,1685	0,1685	0,1685	0,1928						0,1928	0,1685	0,1685	0,1685	0,1685	0,1685	0,1685
50	0,1682	0,1682	0,1683	0,1684	0,1684	0,1684	0,1676						0,1676	0,1684	0,1684	0,1684	0,1683	0,1682	0,1682
60	0,1691	0,1703	0,1738	0,1826	0,1512	0,1530	0,1319						0,1319	0,1530	0,1512	0,1826	0,1738	0,1703	0,1691
70	0,3720	0,3720	0,3720	0,2351	0,2285	0,2419	0,1490	0,1290	0,1242	0,1229	0,1242	0,1290	0,1460	0,2419	0,2285	0,2351	0,3720	0,3720	0,3720
80	0,3720	0,3720	0,3720	0,1811	0,1692	0,2714	0,1515	0,1416	0,1361	0,1345	0,1361	0,1416	0,1515	0,2714	0,1692	0,1811	0,3720	0,3720	0,3720
90	0,3720	0,3720	0,3720	0,2157	0,2300	0,2854	0,1539	0,1566	0,1497	0,1476	0,1497	0,1566	0,1539	0,2854	0,2300	0,2157	0,3720	0,3720	0,3720
100	0,3720	0,3720	0,3720	0,2594	0,2020	0,2617	0,1679	0,1739	0,1649	0,1625	0,1649	0,1739	0,1679	0,2617	0,2020	0,2594	0,3720	0,3720	0,3720
110	0,3720	0,3720	0,3720	0,2760	0,2283	0,2451	0,1610	0,1873	0,1814	0,1796	0,1814	0,1873	0,1610	0,2451	0,2283	0,2760	0,3720	0,3720	0,3720
120	0,3720	0,3720	0,3720	0,2575	0,2073	0,2231	0,1615	0,1992	0,2025	0,2026	0,2025	0,1992	0,1615	0,2231	0,2073	0,2575	0,3720	0,3720	0,3720
130	0,3720	0,3720	0,3720	0,2134	0,1781	0,2320	0,1722	0,1496	0,1517	0,1526	0,1517	0,1496	0,1722	0,2320	0,1781	0,2134	0,3720	0,3720	0,3720
140	0,3720	0,3720	0,3720	0,1724	0,1693	0,2373	0,1625	0,1517	0,1508	0,1507	0,1508	0,1517	0,1625	0,2373	0,1693	0,1724	0,3720	0,3720	0,3720
150	0,3720	0,3720	0,3720	0,2336	0,2280	0,1527	0,1792	0,1667	0,1667	0,1667	0,1667	0,1792	0,1527	0,2280	0,2336	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720
160	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,1779	0,2174	0,1921	0,1934	0,1935	0,1934	0,1921	0,2174	0,1779	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720
170	0,3720	0,3720	0,1631	0,1640	0,1622	0,1622	0,1673	0,1622	0,1622	0,1622	0,1622	0,1622	0,1622	0,1622	0,1622	0,1640	0,1631	0,3720	0,3720

Figura 5. 34i - Solo 2 - Simulação B: Perfil de umidade no instante $t = 4h$ da fase de redistribuição

prof/larg (cm)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
0	0,1715	0,1715	0,1715	0,1715	0,1715	0,1715	0,1715						0,1715	0,1715	0,1715	0,1715	0,1715	0,1715	0,1715
10	0,1681	0,1681	0,1681	0,1681	0,1681	0,1681	0,1681						0,1681	0,1681	0,1681	0,1681	0,1681	0,1681	0,1681
20	0,1720	0,1720	0,1720	0,1720	0,1720	0,1720	0,1720						0,1720	0,1720	0,1720	0,1720	0,1720	0,1720	0,1720
30	0,2278	0,2278	0,2278	0,2278	0,2278	0,2278	0,2238						0,2238	0,2278	0,2278	0,2278	0,2278	0,2278	0,2278
40	0,2100	0,2100	0,2100	0,2100	0,2100	0,2100	0,2017						0,2017	0,2100	0,2100	0,2100	0,2100	0,2100	0,2100
50	0,1722	0,1721	0,1723	0,1723	0,1723	0,1723	0,1704						0,1704	0,1723	0,1723	0,1723	0,1723	0,1721	0,1722
60	0,1607	0,1614	0,1577	0,1698	0,1520	0,1538	0,1329						0,1329	0,1538	0,1520	0,1698	0,1577	0,1614	0,1607
70	0,1846	0,2025	0,2482	0,3720	0,2256	0,2398	0,1461	0,1290	0,1242	0,1229	0,1242	0,1290	0,1461	0,2398	0,2256	0,3720	0,2482	0,2025	0,1846
80	0,1669	0,1951	0,2317	0,3720	0,1915	0,2690	0,1515	0,1416	0,1361	0,1345	0,1361	0,1416	0,1515	0,2690	0,1915	0,3720	0,2317	0,1951	0,1669
90	0,2168	0,2249	0,2466	0,2118	0,2323	0,2845	0,1541	0,1566	0,1497	0,1476	0,1497	0,1566	0,1541	0,2845	0,2323	0,2118	0,2466	0,2249	0,2168
100	0,2013	0,2048	0,1996	0,1733	0,2090	0,2622	0,1691	0,1739	0,1649	0,1625	0,1649	0,1739	0,1691	0,2622	0,2090	0,1733	0,1996	0,2048	0,2013
110	0,1730	0,1732	0,1732	0,1732	0,2333	0,2454	0,1615	0,1873	0,1814	0,1796	0,1814	0,1873	0,1615	0,2454	0,2333	0,1732	0,1732	0,1732	0,1730
120	0,1932	0,1933	0,1938	0,1959	0,2159	0,2237	0,1616	0,1992	0,2024	0,2025	0,2024	0,1992	0,1616	0,2237	0,2159	0,1959	0,1938	0,1933	0,1932
130	0,2307	0,2311	0,2318	0,2279	0,1855	0,2324	0,1722	0,1496	0,1518	0,1527	0,1518	0,1496	0,1722	0,2324	0,1855	0,2279	0,2318	0,2311	0,2307
140	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,1738	0,2368	0,1625	0,1517	0,1508	0,1507	0,1508	0,1517	0,1625	0,2368	0,1738	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720
150	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,1568	0,1532	0,1791	0,1667	0,1667	0,1667	0,1667	0,1791	0,1532	0,1568	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720	0,3720
160	0,3720	0,3720	0,3720	0,1784	0,1596	0,1778	0,2182	0,1921	0,1933	0,1935	0,1933	0,1921	0,2182	0,1778	0,1596	0,1784	0,3720	0,3720	0,3720
170	0,3720	0,3720	0,3720	0,1693	0,1994	0,1622	0,1624	0,1622	0,1622	0,1622	0,1622	0,1622	0,1624	0,1622	0,1994	0,1693	0,3720	0,3720	0,3720

Figura 5. 34j - Solo 2 - Simulação B: Perfil de umidade no instante $t = 5h$ da fase de redistribuição

prof/larg (cm)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
0	0,1714	0,1714	0,1714	0,1714	0,1714	0,1714	0,1714						0,1714	0,1714	0,1714	0,1714	0,1714	0,1714	0,1714
10	0,1689	0,1689	0,1689	0,1689	0,1689	0,1689	0,1689						0,1689	0,1689	0,1689	0,1689	0,1689	0,1689	0,1689
20	0,1727	0,1727	0,1727	0,1727	0,1727	0,1727	0,1727						0,1727	0,1727	0,1727	0,1727	0,1727	0,1727	0,1727
30	0,2317	0,2317	0,2317	0,2317	0,2317	0,2317	0,2243						0,2243	0,2317	0,2317	0,2317	0,2317	0,2317	0,2317
40	0,2247	0,2247	0,2247	0,2246	0,2246	0,2246	0,2112						0,2112	0,2246	0,2246	0,2246	0,2247	0,2247	0,2247
50	0,1795	0,1794	0,1795	0,1795	0,1795	0,1795	0,1748						0,1748	0,1795	0,1795	0,1795	0,1795	0,1794	0,1795
60	0,1616	0,1624	0,1588	0,1600	0,1530	0,1548	0,1340						0,1340	0,1548	0,1530	0,1600	0,1588	0,1624	0,1616
70	0,1653	0,2036	0,2493	0,2025	0,2237	0,2384	0,1462	0,1290	0,1242	0,1229	0,1242	0,1290	0,1462	0,2384	0,2237	0,2025	0,2493	0,2036	0,1653
80	0,1668	0,1951	0,2321	0,3720	0,1935	0,2668	0,1515	0,1416	0,1361	0,1345	0,1361	0,1416	0,1515	0,2668	0,1935	0,3720	0,2321	0,1951	0,1668
90	0,2196	0,2248	0,2466	0,3720	0,2341	0,2837	0,1543	0,1566	0,1497	0,1476	0,1497	0,1566	0,1543	0,2837	0,2341	0,3720	0,2466	0,2248	0,2196
100	0,2014	0,2047	0,1999	0,3720	0,2091	0,2628	0,1701	0,1738	0,1649	0,1625	0,1649	0,1738	0,1701	0,2628	0,2091	0,3720	0,1999	0,2047	0,2014
110	0,1731	0,1732	0,1733	0,3720	0,2362	0,2456	0,1620	0,1872	0,1814	0,1796	0,1814	0,1872	0,1620	0,2456	0,2362	0,3720	0,1733	0,1732	0,1731
120	0,1931	0,1932	0,1937	0,1961	0,2214	0,2243	0,1616	0,1991	0,2024	0,2025	0,2024	0,1991	0,1616	0,2243	0,2214	0,1961	0,1937	0,1932	0,1931
130	0,1407	0,1409	0,1413	0,1406	0,1912	0,2327	0,1722	0,1497	0,1518	0,1528	0,1518	0,1497	0,1722	0,2327	0,1912	0,1406	0,1413	0,1409	0,1407
140	0,1438	0,1439	0,1443	0,1448	0,1769	0,2363	0,1625	0,1517	0,1508	0,1507	0,1508	0,1517	0,1625	0,2363	0,1769	0,1448	0,1443	0,1439	0,1438
150	0,1593	0,1595	0,1603	0,1618	0,1615	0,1537	0,1791	0,1667	0,1667	0,1667	0,1667	0,1791	0,1537	0,1615	0,1618	0,1603	0,1595	0,1593	0,1593
160	0,1854	0,1858	0,1874	0,1913	0,1602	0,1778	0,2191	0,1921	0,1933	0,1935	0,1933	0,1921	0,2191	0,1778	0,1602	0,1913	0,1874	0,1858	0,1854
170	0,1985	0,1995	0,2034	0,1671	0,1642	0,1622	0,1622	0,1622	0,1622	0,1622	0,1622	0,1622	0,1622	0,1622	0,1642	0,1671	0,2034	0,1995	0,1985

Figura 5. 34k - Solo 2 - Simulação B: Perfil de umidade no instante $t = 6h$ da fase de redistribuição

A simulação B para os solos 1 e 2 revelou que, ao final da fase de alimentação, todo o perfil de umidade estava saturado, tanto no Solo 1 quanto no Solo 2, conforme pode ser observado nas figuras 5.33c e 5.34c. Nas Figuras 5.27c e 5.28c, em que se observa os perfis de umidade no instante final da fase de alimentação, fornecidos pela Simulação A, para os Solos 1 e 2, observa-se que o perfil não se encontrava totalmente saturado, como na simulação B, apenas a parte inferior do domínio apresentou valores de saturação.

Ao final da fase de recessão, que, na simulação B ocorreu aos 366 minutos para o Solo 1 e 360 minutos para o Solo 2, a parte inferior do domínio, logo abaixo do fundo da trincheira, em ambos os solos, ainda se encontrava saturada, enquanto que os demais pontos da malha já encontravam-se parcialmente drenados. Neste instante do processo de infiltração, os dois solos apresentaram comportamento semelhante nas simulações A e B, conforme pode ser observado nas figuras 5.27d e 5.33d (Solo 1) e

Nos instantes seguintes da redistribuição, os Solos 1 e 2 apresentaram comportamento distinto com relação à rapidez do processo de drenagem. Nas figuras 5.33e-k e 5.34e-k observa-se que, nas primeiras horas da redistribuição, o Solo 1 apresentou valores de umidade bem inferiores aos do início da alimentação, enquanto que, no Solo 2, o perfil ainda se encontrava muito próximo da saturação. Este resultado era esperado, devido à maior retenção de água do Solo 1. O Solo 1 permaneceu praticamente saturado ainda nos instantes 12, 24 e 48 horas após o início da alimentação, conforme pode ser observado nas Figuras 5.33 l-n.

Como considerações finais, especialmente em relação aos resultados da simulação, pode-se comentar alguns aspectos peculiares ao estudo realizado, e que, provavelmente, contribuíram para os resultados obtidos, tais como:

- A multimodalidade na distribuição dos diâmetros dos poros dos Solos 1 e 2, como fonte de incerteza associada ao modelo de retenção de Van Genuchten;
- Os caminhos preferenciais comumente encontrados em ensaios de infiltração, e não previstos nos modelos ajustados;
- O efeito da histerese, considerado nulo na modelagem. Embora as curvas de retenção dos Solos 1 e 2 tenham sido obtidas por processo de drenagem, e os ensaios de campo terem sido realizados também na drenagem, as variações na forma da curva no processo reverso, não previstas no modelo e facilmente constatadas em laboratório, aliadas às condições iniciais em que se realizaram os ensaios, podem influenciar o ajuste das curvas;
- A precisão do equipamento utilizado para a medição da umidade, no caso, sonda de nêutrons. As incertezas associadas à calibração do equipamento estão relacionadas: à representatividade do ponto de amostragem; ao ajuste linear das contagens registradas ao teor de umidade do solo; à própria natureza estocástica das iterações radioativas, que permanecem, embora minimizadas pelo critério da contagem padrão.

6. MODELO COMPUTACIONAL PARA SIMULAÇÃO DA INFILTRAÇÃO BIDIMENSIONAL EM TORNO DE TRINCHEIRAS DE INFILTRAÇÃO ESTRUTURA E MANUAL DE INSTRUÇÕES

6.1 Introdução

Para a simulação do processo de infiltração em torno de trincheiras, foi adaptado o software BIDISUL, desenvolvido na Universidade Técnica de Lisboa, pelo Prof. Dr. Manuel Tabuada¹. Este software foi escrito em linguagem Fortran, originalmente na versão 77, e nos foi enviado pelo autor em forma de código fonte por escrito.

Ao transcrever o código para o Fortran 90, embora o programa compilasse sem erros, apresentou problemas de execução. A fim de averiguar as possíveis causas de falha, algumas alterações foram feitas no código fonte original. Estas alterações, descritas a seguir, restringiram-se, em sua maior parte, a organizar o código, originalmente estruturado em coluna única, em seções adentadas e sub-rotinas, de modo a proporcionar melhor compreensão da estrutura do programa. Apenas uma alteração foi feita com relação ao modelo, a qual consistiu em adotar o ajuste de condutividade hidráulica não saturada proposto por van Genuchten, no lugar do ajuste polinomial assumido no modelo original. As alterações realizadas no modelo BidiSul foram:

- 1) Adentar o programa para melhor visualizar as estruturas e comandos;
- 2) Organizá-lo em sub-rotinas para facilitar o acompanhamento da execução;
- 3) Criar uma sub-rotina para a leitura de dados, com a função de organizar em um único arquivo de entrada as variáveis que, no código original, eram inseridas manualmente;
- 4) Criar arquivos de saída para armazenar as variáveis calculadas em cada sub-rotina, a cada intervalo de tempo, a fim de acompanhar os resultados parciais obtidos em cada etapa da execução. A relação desses arquivos, bem como sua descrição detalhada, é apresentada mais adiante.

¹ Manuel Tabuada - Departamento de Engenharia Rural, Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa. E-mail: mantabuada@isa.utl.pt

5) Inserir comentários no programa, acerca da função de cada sub-rotina, bem como quais são as variáveis de entrada e saída de cada uma, de modo a facilitar a compreensão da estrutura do código por parte de novos usuários;

6) Alterar a função $k(\theta) = A \cdot \theta^B$ para $K(\theta) = K_0 \omega^f \left[1 - \left(1 - \omega^{\frac{1}{n}} \right)^n \right]^2$, modelo de condutividade hidráulica proposto por van Genuchten, mais compatível com o modelo adotado para a curva de retenção. No mais, todas as equações do modelo Bidisul original foram mantidas.

6.2 Estrutura do programa

O programa é estruturado de maneira a seguir as seguintes funções:

Calcular, por meio da equação de Richards' bidimensional, a umidade volumétrica e o volume infiltrado a cada intervalo de tempo, durante o processo de irrigação em um sulco de seção trapezoidal, ao redor de sua seção transversal. A adaptação da seção de trapezoidal para retangular é meramente geométrica, e está relacionada à variável CANG, que armazena o valor do coeficiente angular da inclinação do talude, dada pela $\text{tg}(\alpha)$, em que α é o ângulo de inclinação.

A equação de Richards' bidimensional foi discretizada (Equação 4.17) e linearizada (Equação 4.18) conforme descrito no Capítulo 4 e em Tabuada *et. al.*, 1995. A solução do sistema de equações lineares é feita pelo processo de interações Gauss Seidel, em que:

$$[M(ij)] * [N(i)] = [S(i)]$$

Ou, conforme a nomenclatura adotada no modelo,

$$HM(ij) * H1(i) = 0$$

Neste modelo, a matriz $HM(ij)$ armazena os valores da matriz de incidência $M(ij)$ mais os valores das variáveis dependentes do vetor solução $S(i)$, na última coluna. Esta matriz, $HM(ij)$, possui dimensões $NPN1 \times NPN2$, em que $NPN2 = NPN1 + 1$. O vetor $H1(i)$ armazena os valores das variáveis independentes $h(ij)$, a cada iteração.

O processo de infiltração é dividido nas seguintes fases:

Instante $t=0$, início da irrigação, caracterizado pelas condições iniciais do solo.

Fase 1, ou fase de alimentação, em que a água é abastecida ao sulco, e a lâmina d'água é crescente.

Fase 2, ou fase de recessão, iniciando no momento em que cessa a alimentação, e a lâmina d'água passa a diminuir (esvaziar o sulco), até zerar.

Fase 3, ou redistribuição, em que já não há água no interior do sulco, e esta se movimenta no interior do domínio, até voltar novamente às condições iniciais.

A diferença entre as três fases, do ponto de vista do modelo, consiste na variação das condições de contorno nos limites do domínio, as quais foram apresentadas na Tabela 4.1.

A estrutura do programa é detalhada a seguir. O código fonte compõe o ANEXO 3.

1) Leitura de dados

Realizada pela Sub-Rotina ReadData.

- Um arquivo de extensão .DAT, cujo nome possui cinco caracteres, e é fornecido ao programa pelo usuário, armazena os valores de potencial mátrico da primeira coluna do domínio (valores de pressão de sucção, com sinais negativos).
- O arquivo DADOS.DAT possui as informações de:
 - geometria do sulco e dados sobre o ensaio que será simulado. Estas informações são armazenadas pelas variáveis NTC, NTL, NCS, NCF, NLS, CANG, NVEZES, INCR, ACTIV, NZDREN, LCOMP, Q, TTREG e TEMPO, as quais serão explicadas mais detalhadamente adiante.
 - parâmetros das equações do modelo: equação de Van Genuchten (θ_s , θ_r , α , β) e equação de condutividade hidráulica não saturada (K_o , γ)
 - dados da discretização do domínio e do tempo (Δx , Δz e Δt).

2) Montagem do perfil de potencial mátrico $h(ij)$

Realizada no Programa Principal.

A cada ponto da malha, é atribuído o valor de potencial $h(ij)$ igual ao valor $h(i,1)$;

3) Cálculo dos valores de umidade volumétrica em cada ponto da malha, no instante inicial.

Realizada pela Sub-Rotina SoilMoistContF0

Através da equação de Van Genuchten, são calculados os valores de umidade inicial $\theta I(ij)$, a partir dos valores de potencial mátrico inicial $h I(ij)$, fornecidos pelo usuário.

4) Cálculo dos coeficientes da matriz de incidência $HM(ij)$

Sub-Rotina IncidFase0

Nesta rotina são calculados os coeficientes $AIJ(ij)$, $BIJ(ij)$, $DIJ(ij)$, $EIJ(ij)$, $FIJ(ij)$ e $GIJ(ij)$, descritos pelas Equações 4.19 a 4.24, para o instante inicial. Estes são os coeficientes de linearização da equação da equação do modelo.

5) Cálculo da altura da lâmina d'água

Sub-Rotina WaterLevel

A partir dos valores de vazão, tempo e geometria do sulco, é calculada a altura da lâmina d'água abastecida até o instante t . Este valor é armazenado na variável LAG.

6) Cálculo do número de linhas com e sem água no interior da trincheira

Programa Principal

Calcula-se a altura da lâmina d'água em linhas, e armazena-se o valor na variável NLSCA. A variável NLSSA armazena o número de linhas da trincheira sem água.

7) Cálculo do número de elementos da matriz de incidência, NPN1 e NPN2

Programa Principal

8) Montagem da matriz de incidência $HM(ij)$, com inclusão dos termos dependentes na última coluna

Sub-Rotina AssembleMatF1

Esta rotina monta a matriz de incidência $HM(ij)$ durante a Fase 1.

9) Montagem do vetor $H1(i)$ com os termos independentes $h(ij)$

Sub-Rotina AssembleVectF1

Esta rotina atribui valores às variáveis independentes $h(ij)$, durante a Fase 1. No primeiro instante, $t=0$, estes valores são os próprios valores de potencial fornecidos pelo usuário. Nos instantes seguintes, são os valores calculados no processo Gauss Seidel.

10) Processo iterativo de Gauss Seidel para solução do sistema de equações lineares

Sub-Rotina gSeidel

Esta rotina calcula os valores das variáveis independentes $h(ij)$.

11) Determinação dos valores de umidade volumétrica $\theta(ij)$

Sub-Rotina SoilMoistContF1

Esta rotina calcula, a partir da equação de Van Genuchten, os valores de umidade volumétrica em cada ponto da malha, durante a Fase 1. Para tanto, ela se utiliza dos valores recém calculados de potencial $h(ij)$, a cada intervalo de tempo.

12) Passagem para o próximo passo temporal, $T=T+\Delta T$

Programa Principal

13) Cálculo do volume infiltrado até o instante T

Sub-Rotina WaterVolumeF1

Esta rotina calcula o teor de umidade de cada malha do domínio, e, a seguir, multiplica pelo volume da malha, para obter o volume de água no domínio. Este valor é armazenado na variável VOL. Em seguida, ele multiplica este valor por 2, para obter o volume infiltrado em todo o entorno da seção transversal do sulco, uma vez que o mesmo

foi dividido em 2 e adotada a condição de simetria para solução computacional. O volume infiltrado total, em ambos os lados da trincheira, é armazenado na variável VOL1.

14) Cálculo do incremento de linhas no domínio

Sub-Rotina IncrLinesF1

Esta é uma etapa do programa original, mantida no programa atual. Ela é responsável por aumentar gradativamente o número de linhas no domínio, à medida que a frente de molhamento se aproxima das camadas mais inferiores do solo. A variável ACTIV armazena o valor da diferença entre os h's de dois instantes consecutivos que irá ativar o aumento do número de linhas do perfil. As variáveis INCR e NVEZES armazenam, respectivamente, os valores do incremento de linhas a cada ativação, e do número de vezes que o perfil será aumentado.

Esta rotina se justifica por reduzir o tempo de processamento do programa, uma vez que elimina cálculos desnecessários de linhas da malha que ainda não sofreram variações significativas de umidade. Esta redução de tempo possui significado relevante no contexto em que o programa original foi desenvolvido, devido às limitações de capacidade de armazenamento e rapidez de processamento dos micros existentes. No entanto, em se tratando de malhas pequenas, e/ou considerando a rapidez dos processadores de que se dispõe atualmente, ela deixa de possuir tal relevância. Apesar disso, não foi eliminada do programa, a fim de não descaracterizar o modelo original, uma vez que, para que esta rotina não seja executada, basta adotar, na entrada de dados do programa, um valor alto para ACTIV, superior às diferenças observadas entre h's consecutivos. Neste caso, a rotina não é ativada, e a malha é calculada toda de uma vez, considerando todo o domínio.

15) Passagem para o próximo cálculo

Programa Principal

Nesta etapa, através da verificação da variável LCICL, o programa encaminha a seqüência de cálculos para permanecer na Fase 1 ou iniciar a Fase 2, que começa na linha 377. Esta variável, iniciada com valor 1, deverá ter seu valor alterado para 2 dentro da rotina WaterLevel, quando o nível d'água, expresso pela variável LAG, assumir valor superior à altura da lâmina d'água durante a fase de alimentação, fornecida pelo usuário, no arquivo de entrada de dados, e armazenada na variável HTEMPALI.

16) Cálculo dos coeficientes da matriz de incidência

Sub-Rotina IncidFase1

Tal como no passo 4, são calculados os coeficientes da matriz de incidência: $A_{IJ}(ij)$, $B_{IJ}(ij)$, $E_{IJ}(ij)$, $F_{IJ}(ij)$, $D_{IJ}(ij)$ e $G_{IJ}(ij)$. Estes coeficientes, são função da

condutividade hidráulica não saturada, expressa pela variável $KAPA(ij)$. Esta, por sua vez, é função da umidade no instante considerado, e, se no passo 4, os coeficientes foram calculados com base na umidade inicial θI , fornecida pelo usuário, agora eles são calculados com base na umidade θ calculada na rotina `SoilMoistContF1`.

17) Anulação dos elementos da matriz de incidência $HM(ij)$

Programa Principal

O programa zera os valores dos elementos da matriz de incidência, para dar sequência à próxima etapa. Caso o programa permaneça na Fase 1, o que é verificado pela variável `HTEMPALI`, um `GOTO` o encaminha para a linha 222, em que é chamada a rotina `WaterLevel`. A partir daí, são repetidos os passos 5 a 15, até que `LAG` seja maior que `HTEMPALI`, e o programa inicie a Fase 2.

18) Cálculo dos coeficientes da matriz de incidência

Sub-Rotina `IncidFase2`

São calculados os coeficientes da matriz $HM(ij)$, considerando as condições de contorno da fase 2.

19) Anulação dos elementos da matriz de incidência $HM(ij)$

Programa Principal

Idem ao passo 17.

20) São repetidos os passos 8 a 14 para a Fase 2

Sub-Rotinas: `AssembleMatF2`, `AssembleVectF2`, `gSeidel`, `SoilMoistContF2`, `WaterVolumeF2`, e `IncrLinesF2`.

21) Verificação da permanência na Fase 2 ou mudança para a Fase 3

Programa Principal

Através da verificação da variável `LAG`. Caso ela assuma valor menor que 0.1 cm, a sequência de cálculos é encaminhada para a Fase 3, com início na linha 1006.

Se permanecer na fase 2, serão repetidos os passos 18 a 20.

Se for encaminhado para a Fase 3, o Programa Principal zera a matriz de incidência e dá sequência ao passo 22.

22) Cálculo dos coeficientes da matriz de incidência

Sub-Rotina `IncidFase3`

23) São repetidos os passos 8 a 14 para a Fase 3.

Sub-Rotinas: `AssembleMatF3`, `AssembleVectF3`, `gSeidel`, `SoilMoistContF3`, `WaterVolumeF3`, e `IncrLinesF3`.

24) Finalização do programa

Programa Principal

O programa é encerrado com base na verificação da variável T com relação à variável TTREG, o que ocorre na linha 389. A variável TTREG armazena o valor do intervalo de tempo total de irrigação. Caso T supere este valor, o programa é encerrado.

6.3 Arquivos de saída

O programa apresenta resultados distribuídos em arquivos de extensão .DAT e .LIS, que possuem, no código fonte, Status OLD, o que significa que devem ser criados pelo usuário e estar salvos no mesmo diretório do programa executável. São eles:

- [Nome com cinco caracteres].DAT - armazena os valores iniciais de potencial mátrico $HI(ij)$
- [Nome com cinco caracteres].LIS - irá armazenar os resultados do programa. Este é o único arquivo de saída do código fonte original. Os demais foram inseridos como alterações, de modo a acompanhar os resultados gerados pelo programa em cada passo da execução.
 - HI.dat - irá armazenar os valores de $h(ij)$ no instante inicial.
 - Matricpot.dat - irá armazenar os valores de $h(ij)$ a cada intervalo de tempo.
 - CIJ.DAT - irá armazenar os valores da variável $C(ij)$, derivada da função de VanGenuchten, em relação à umidade, a cada intervalo de tempo.
 - Hydrconduc.DAT - irá armazenar os valores de condutividade hidráulica, expressos pela variável $KAPA(ij)$ a cada intervalo de tempo.
 - Soilmoist.DAT - irá armazenar os valores de umidade $\theta I(ij)$ e $\theta(ij)$, a cada intervalo de tempo.
 - Coeficients.DAT - irá armazenar os valores dos coeficientes da matriz de incidência: $AIJ(ij)$, $BIJ(ij)$, $EIJ(ij)$, $FIJ(ij)$, $DIJ(ij)$ e $GIJ(ij)$, a cada intervalo de tempo.
 - Halt.DAT - irá armazenar os valores de lâmina d'água, expressos pela variável LAG, a cada intervalo de tempo.
 - HM.DAT - irá armazenar a matriz de incidência em cada instante.
 - H1.DAT - irá armazenar o vetor com as incógnitas em cada instante.

Além destes arquivos de saída, há outros, com Status NEW, que não necessitam ser criados pelo usuário, pois o são pelo próprio programa, e devem ser apagados a cada execução. Estes arquivos são os MATRIZ(NUMERO).DAT - gerados pelas rotinas WaterVolume.

6.4 Informações necessárias para a simulação da infiltração em trincheiras:

Para simular o processo de infiltração no entorno da seção transversal de trincheiras de infiltração, em suas três fases, são necessários conhecimentos prévios sobre a física do solo que se vai estudar, especialmente suas propriedades de infiltração e condições de umidade:

- A curva de retenção do solo, $\phi m = f(\theta)$;
- A condutividade hidráulica do solo em função do grau de saturação $k(\theta)$;
- As condições iniciais de umidade do solo na região em torno da seção transversal da trincheira.

Curva de retenção do solo

O modelo trabalha com a Equação de *Van Genuchten (1980)*, apresentada no Capítulo 3 e descrita pela equação 3.23:

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + (\alpha_v \cdot \phi_m)^n\right]^m} \quad (3.23)$$

Condutividade hidráulica não saturada

Trata-se da curva de condutividade hidráulica em função do teor de umidade do solo. O modelo original de *Tabuada et al. (1994)* trabalha com a relação de condutividade hidráulica em função da umidade dada pela Equação 6.1:

$$K(\theta) = A \cdot \theta^B \quad (6.1)$$

O modelo adaptado utiliza-se da relação proposta por *Van Genuchten (1980)* a partir do modelo de *Mualem (1976, apud Libardi, 2000)*, apresentado no Capítulo 5 e descrito pela Equação 5.1:

$$K(\theta) = K_0 \omega^l \left[1 - \left(1 - \omega^{\frac{1}{m}} \right)^m \right]^2 \quad (5.1)$$

em que:

$$\omega = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}$$

$l = 0,5$ para solos de textura média a arenosa.

Condições iniciais de umidade

São obtidas em campo, com sonda de nêutrons. Podem ser estimativas iniciais, baseadas em simulações anteriores, para prever cenários que têm como ponto de partida

uma determinada chuva anterior, para fins de estudo do comportamento da trincheira em situações de chuvas sucessivas.

6.5 Alimentação do modelo

Variáveis de entrada

Para a correta inserção de dados no modelo, é necessário conhecer o significado físico de suas variáveis de entrada. Baseado nas Figuras 4.28 e 4.29, que apresentam as malhas de pontos no domínio da seção transversal da trincheira em duas geometrias diferentes, adota-se a seguinte nomenclatura:

NTC = número total de colunas da malha

NTL = número total de linhas

NCS = número de colunas à superfície, ou seja, fora da trincheira.

NCF = número de colunas no fundo da trincheira

NL = profundidade da trincheira, em linhas

CANG = tangente do ângulo de inclinação do talude. É muito importante ressaltar o seguinte: o domínio é discretizado em elementos retangulares de dimensões Δx e Δz . O modelo é concebido de maneira tal que, ao longo da inclinação do talude, esses elementos se tornam triângulos retângulos de base Δx e altura Δz . Deste modo, o talude da trincheira deve possuir inclinação tal que, necessariamente, gere esses triângulos. Neste trabalho, por exemplo, foi utilizada uma malha de dimensões $\Delta x=1,25$ cm e $\Delta z=10$ cm, de modo que o ângulo de inclinação foi de 83° , ou seja, a inclinação do talude deve ser igual à inclinação da diagonal dos elementos retangulares da malha, e não simplesmente escolhida sem critério, sob risco de ocasionar inconsistência nos cálculos, ou mesmo erros de execução do programa.

NVEZES, INCR e ACTIV, conforme explicado anteriormente, utilizadas pelas sub-rotinas IncrLines.

TETA-S, TETA-R, ALFA e BETA

São os parâmetros de ajuste da curva de retenção pela equação de *Van Genuchten* (1980) (Equação 1): umidade de saturação θ_s , umidade residual θ_r , α e n , respectivamente.

CKS

Parâmetro de ajuste da curva de condutividade hidráulica não saturada, pela Equação (6.2): K_0 .

DELTA-X, DELTA-Z e DELTA-T

Valores em cm dos espaçamentos da malha na horizontal (Δx) e na vertical (Δz). e valor, em segundos do intervalo de tempo Δt considerado para a discretização.

NZDREN

Variável original NZRAD do modelo de irrigação, que indica a profundidade da camada de raízes da cultura irrigada. No modelo de infiltração, foi substituída pela variável NZDREN, ou profundidade da camada de solo sob ação direta da drenagem da trincheira. Esta profundidade será utilizada como referência para o cálculo do volume drenado e armazenado na região de domínio da trincheira.

LCOMP = comprimento da trincheira, em cm.

Q = vazão de alimentação à trincheira, em cm^3/s

HTEMPALI = altura da lâmina d'água durante o tempo de alimentação, em cm. Esta variável considera a possibilidade da trincheira manter um nível d'água constante durante a fase de alimentação, após o enchimento da trincheira.

TTREG = tempo total de irrigação ou alimentação, em segundos.

TEMPO = intervalo de tempo para traçado das equipotenciais, em segundos. É o intervalo de tempo entre os perfis que se deseja obter como saída do modelo.

6.6 Geração dos arquivos de entrada

O arquivo principal de entrada deve ter o formato [**5.DAT*], e estar localizado no mesmo diretório do arquivo executável.

Este arquivo de entrada consta de um vetor com uma coluna e tantas linhas quantas forem as linhas da malha. Ele é formado pelos valores de sucção matricial iniciais, anteriores à irrigação. As casas decimais devem ser separadas por ponto [.] e os valores devem ser expressos com o sinal negativo.

O modelo assume que os valores de umidade inicial em todas as colunas da malha são iguais aos da primeira, de modo que o vetor de entrada deve ser formado por estes valores. Para efeitos práticos, pode-se adotar o valor médio das umidades de cada linha da malha. Feito isso, converte-se os valores de umidade para sucção matricial, por meio do modelo de Van Genuchten. Exemplo de arquivo de entrada: SOLO1.DAT

Figura 6.1 – Arquivo de entrada com os valores iniciais de sucção matricial.

O arquivo com as variáveis de entrada, chama-se Dados.DAT, e segue as especificações de formato descritas na Sub-rotina ReadData.

Figura 6.2 - Arquivo de dados com as variáveis de entrada do modelo.

6.7 Geração do arquivo de saída

waterlevel - WordPad

Arquivo Editor Exibir Inserir Formatar Ajuda

T= 10.0 min	lamina dagua= 9.58 cm	vol infiltrado= .2657 m cubicos
T= 12.0 min	lamina dagua= 11.35 cm	vol infiltrado= .3210 m cubicos
T= 14.0 min	lamina dagua= 12.97 cm	vol infiltrado= .3791 m cubicos
T= 16.0 min	lamina dagua= 14.04 cm	vol infiltrado= .4485 m cubicos
T= 18.0 min	lamina dagua= 14.99 cm	vol infiltrado= .5206 m cubicos
T= 20.0 min	lamina dagua= 15.91 cm	vol infiltrado= .5932 m cubicos
T= 22.0 min	lamina dagua= 16.87 cm	vol infiltrado= .6649 m cubicos
T= 24.0 min	lamina dagua= 17.84 cm	vol infiltrado= .7360 m cubicos
T= 26.0 min	lamina dagua= 18.83 cm	vol infiltrado= .8068 m cubicos
T= 28.0 min	lamina dagua= 19.84 cm	vol infiltrado= .8770 m cubicos
T= 30.0 min	lamina dagua= 20.88 cm	vol infiltrado= .9466 m cubicos
T= 32.0 min	lamina dagua= 21.32 cm	vol infiltrado= 1.0292 m cubicos
T= 34.0 min	lamina dagua= 21.25 cm	vol infiltrado= 1.1232 m cubicos
T= 36.0 min	lamina dagua= 21.29 cm	vol infiltrado= 1.2147 m cubicos
T= 38.0 min	lamina dagua= 21.53 cm	vol infiltrado= 1.3018 m cubicos
T= 40.0 min	lamina dagua= 21.96 cm	vol infiltrado= 1.3847 m cubicos
T= 42.0 min	lamina dagua= 22.53 cm	vol infiltrado= 1.4644 m cubicos
T= 44.0 min	lamina dagua= 23.22 cm	vol infiltrado= 1.5414 m cubicos
T= 46.0 min	lamina dagua= 24.03 cm	vol infiltrado= 1.6157 m cubicos
T= 48.0 min	lamina dagua= 24.96 cm	vol infiltrado= 1.6873 m cubicos
T= 50.0 min	lamina dagua= 26.02 cm	vol infiltrado= 1.7556 m cubicos
T= 52.0 min	lamina dagua= 27.24 cm	vol infiltrado= 1.8205 m cubicos
T= 54.0 min	lamina dagua= 28.61 cm	vol infiltrado= 1.8816 m cubicos
T= 56.0 min	lamina dagua= 30.14 cm	vol infiltrado= 1.9390 m cubicos
T= 58.0 min	lamina dagua= 31.32 cm	vol infiltrado= 2.0041 m cubicos

Para obter Ajuda, pressione F1

CAP. NUM

Figura 6.4 – Exemplo de arquivo de saída – WATERLEVEL.DAT

7. DIMENSIONAMENTO DE TRINCHEIRAS DE INFILTRAÇÃO

Conforme foi apresentado no Capítulo 3, *Jonasson (1984, apud Mikkelsen e Jacobsen, 1993; Mikkelsen et al., 1996)* propôs, para o dimensionamento de trincheiras de infiltração, o *rain envelope method*, baseado no balanço de massa, segundo o qual o volume de armazenamento da trincheira (V_t) deve ser igual ao volume de água precipitado sobre a área de contribuição (V_{prec}), durante o período de tempo considerado, subtraído do volume de água infiltrado durante o mesmo período (V_{inf}).

$$V_t = V_{prec} - V_{inf} \quad (7.1)$$

Originalmente, o método propõe que a vazão de infiltração seja obtida a partir da formulação de Darcy para escoamento em solo saturado. Esta hipótese subestima a capacidade de infiltração da trincheira, uma vez que considera que a taxa de infiltração do solo é constante e igual à taxa de infiltração na condição de saturação.

A metodologia de dimensionamento de trincheiras de infiltração proposta neste trabalho baseia-se também no balanço de massa no interior da trincheira, em que, o volume a ser armazenado é igual ao volume de entrada, proveniente da precipitação, subtraído do volume da saída, através da infiltração. Para a estimativa do volume infiltrado, propõe-se que seja considerada a variação da taxa de infiltração no tempo.

A determinação das dimensões da trincheira depende, portanto, de que sejam conhecidos, além da área de contribuição geradora do escoamento superficial, dois aspectos relacionados:

- a) as características de chuva locais, e
- b) as propriedades de infiltração do solo e sua variação no tempo.

Para a estimativa da capacidade de infiltração do solo, são aplicadas duas metodologias.

A primeira, mais simplificada, baseia-se na equação de Philip para infiltração horizontal, e, assim, como o *rain envelope method*, proposto por *Jonasson (1984, apud*

Mikkelsen et al. 1996), considera a condição de colmatção do fundo da trincheira, em que a infiltração ocorre somente na área lateral da estrutura.

A segunda metodologia utiliza o modelo de Richard's para prever, não apenas os volumes infiltrados a cada instante, mas também os valores de umidade em cada ponto da malha ao redor da seção transversal da trincheira, ou seja, como ocorre a redistribuição da água no solo.

O segundo método é mais elaborado, e requer o conhecimento da curva de retenção e a relação da condutividade hidráulica em função da umidade do solo. Estas são propriedades bastante específicas, que só podem ser obtidas a partir de experimentos em laboratório e campo, o que torna difícil sua aplicação direta. Além disso, não são propriedades de fácil correlação entre solos distintos.

No entanto, o método apresenta a vantagem de ser mais preciso, e permitir que sejam traçados cenários baseados em condições iniciais específicas de umidade do solo, as quais podem ser alteradas em função de diferentes estações do ano, chuvas sucessivas, etc. Isto pode ser muito útil quando se pretende prever o comportamento de um sistema descentralizado de estruturas de infiltração de águas pluviais a ser implantado em grande escala, como em loteamentos inteiros.

A seguir, são apresentadas as duas metodologias.

7.1. Volume de projeto (V_p)

O volume de projeto é o volume precipitado sobre a área de contribuição do escoamento superficial para a trincheira de infiltração. Ele é função, portanto, da intensidade e tempo de precipitação e da área de drenagem.

$$V_p = 3,6 \cdot 10^{-6} i \cdot 60t \cdot A_d \quad (7.2)$$

em que:

V_p = volume de projeto, em m^3

i = intensidade de precipitação, em mm/h

t = tempo de precipitação, em s

A_d = área de drenagem conectada à trincheira de infiltração, em m^2

A intensidade de precipitação é obtida a partir da curva de intensidade-duração-freqüência local (curva idf), da forma:

$$i = \frac{a \cdot T^b}{(t + c)^d} \quad (7.3)$$

em que:

i = intensidade de precipitação, em mm/h,

T = período de retorno, em anos,

t = duração da precipitação, em minutos, e

a , b , c e d são parâmetros ajustados empiricamente.

O método considera que a forma de alimentação da trincheira baseia-se em conduzir à estrutura de infiltração as águas precipitadas sobre o telhado. Deste modo, a área de drenagem A_d , ou área efetiva de contribuição do escoamento superficial para a trincheira, é estimada com base nas dimensões e na taxa de ocupação do lote.

7.2. Volume infiltrado (V_{inf})

Nesta etapa do dimensionamento reside a diversidade entre as duas metodologias apresentadas, que serão discutidas a seguir:

7.2.1. Método A – Baseado no modelo horizontal de infiltração de Philip

Apesar do processo de infiltração em trincheiras ser multidimensional, uma análise pelo modelo de infiltração horizontal de Philip, apresentado no Capítulo 3 e descrito pelas equações 3.31 e 3.32, em que a taxa de infiltração decai com o tempo, fornece um meio de dimensionar o volume da estrutura considerando a vazão de infiltração correspondente ao tempo de precipitação.

$$i = \frac{C}{2\sqrt{t}} \quad (3.31)$$

$$I = C\sqrt{t} \quad (3.32)$$

$$V_{inf}(t) = I(t) \cdot A_{inf} \quad (7.4)$$

em que:

V_{inf} = volume infiltrado até o instante t , em m^3 ;

I = infiltração acumulada até o instante t , em m^3/m^2 , e

A_{inf} = área efetiva de infiltração, em m^2 .

O ajuste ao modelo é obtido experimentalmente. Para os solos 1 e 2, a calibração ao foi realizada conforme metodologia descrita no Capítulo 4, cujo ajuste está apresentado no Capítulo 5, Tabela 5.8 e Figuras 5.12 e 5.13.

O uso da taxa de infiltração conforme obtida por ajustes de dados experimentais ao modelo de Philip produz uma estimativa subestimada do volume infiltrado, tendo em vista que, durante a operação da trincheiras de infiltração, não necessariamente ocorre a colmatagem total do fundo. A área de infiltração é estimada considerando-se as hipóteses assumidas por *Jonasson (1984, apud Mikkelsen e Jacobsen, 1993; Mikkelsen et al., 1996)*, segundo as quais:

- a) a área superficial da base é totalmente colmatada após algum tempo de operação da trincheira;
- b) a superfície lateral de infiltração nas extremidades da trincheira é desprezível, e,
- c) a infiltração ocorre, portanto, somente na superfície lateral ao longo do comprimento da trincheira, e o nível d'água médio é igual a $\frac{1}{2}H$, em que H é a altura útil da trincheira.

Obtém-se que a área efetiva de infiltração (A_{inf}) é dada por:

$$A_{inf} = 2 \cdot L \cdot \frac{H}{2} = LH \quad (7.5)$$

7.2.2. Método B – Baseado no modelo bidimensional de Richards'

O volume infiltrado após um determinado tempo de operação da trincheira é calculado com o auxílio do modelo de infiltração apresentado. O arquivo de saída WATERLEVEL.DAT fornece os valores de volume infiltrado acumulado em cada instante, durante e após a irrigação.

7.3. Volume efetivo de armazenamento ($V_{a,ef}$)

$$V_{a,ef} = \phi \cdot V_t \quad (7.6)$$

em que

ϕ = porosidade da brita utilizada para o enchimento da trincheira.

Assim, o volume efetivo de armazenamento da trincheira de infiltração deve ser igual

a:

$$V_{a,ef} = (3,6 \cdot 10^{-6} i \cdot 60t \cdot A_d) - (I \cdot L \cdot H) \quad (7.7)$$

em que:

i = intensidade de precipitação, em mm/h;

t = tempo, em s;

A_d = área de drenagem da trincheira, em m²;

I = infiltração acumulada até o instante t , em m³/m²;

A_{inf} = área efetiva de infiltração = $L \cdot H$ (m²).

Ou seja, o volume de armazenamento da trincheira de infiltração é o volume precipitado sobre a área de contribuição, atenuado pela capacidade de infiltração da trincheira.

Considerando a porosidade da brita, de acordo com a Equação 7.7, o volume da trincheira deve ser igual a:

$$V_t = \frac{[(i \cdot t \cdot A_d) - (I \cdot L \cdot H)]}{\phi} \quad (7.8)$$

Desta forma, o dimensionamento é um processo iterativo, em que se considera a área disponível para implantação da trincheira e o volume precipitado.

7.4. Exemplo de dimensionamento para os Solos 1 e 2

Supondo os seguintes dados de projeto: lote padrão de 15x20 m², com taxa de ocupação de 60%, e, portanto, área impermeável geradora de escoamento superficial de 180m².

Para a cidade de São Carlos, segundo *Barbassa (1991)*, a curva idf assume o seguinte ajuste:

$$i = \frac{1519 \cdot T^{0,236}}{(t+16)^{0,935}} \quad (7.9)$$

Considerando-se uma chuva de 20 minutos (1200 s), com período de retorno de 1 ano, tem-se $i=53$ mm/h ($i=1,472E-5$ m/s), que, sobre uma área de 180 m², gera um volume precipitado $V_{prec} = 3,20$ m³.

A brita 3 comercial fornece porosidade de aproximadamente 45%.

De acordo com o ajuste à ao modelo de Philip, apresentado na Tabela 5.8, a infiltração acumulada em 20 minutos no Solo 1 é $I = 0,1978$ m³/m², e, no Solo 2, $I = 0,2418$ m³/m².

As dimensões da trincheira são: B (largura), H (profundidade) e L (comprimento). O processo de dimensionamento consiste de adotar valores iniciais para H e L, para o cálculo

do lado direito da Equação 9, e, por esta equação, obter o valor de B, verificar a viabilidade construtiva e refazer os cálculos, se necessário, adotando novos valores para H e L.

Atribuindo, inicialmente, valores de H e L iguais a 1,00 m e 5,00 m, respectivamente, a Equação 7.8 conduz a $V_{11} = 4,87 \text{ m}^3$ para o Solo 1, o que implica em $B_1 = 0,98\text{m}$, e $V_{12} = 4,37\text{m}^3$ para o Solo 2, fornecendo $B_2 = 0,88 \text{ m}$.

Ou seja, no Solo 1, uma trincheira de $0,98 \times 1,00 \times 5,00 \text{ m}^3$, e, no Solo 2, uma trincheira de $0,88 \times 1,00 \times 5,00 \text{ m}^3$ ($B \times H \times L$), preenchidas com brita 3, de porosidade 45%, são capazes de atender, partindo da condição seca, uma chuva de 1 ano de período de retorno. Por não serem dimensões práticas em engenharia, as larguras obtidas podem ser arredondadas para números inteiros próximos.

7.5. Estimativa de custos de implantação

A análise de custos de implantação é o passo seguinte, e deve ser feita, preferencialmente, considerando a implantação do sistema como um todo, o que diminui os custos em relação à implantação em um único lote. Os custos envolvidos diretamente são: escavação de terra, brita de preenchimento, dispositivos hidráulicos (tubos, conexões, calhas), manta geotêxtil e mão-de-obra. A Tabela 7.1 apresenta uma estimativa dos custos diretos, para a implantação de uma trincheira de infiltração isolada, de dimensões $0,90 \times 1,00 \times 5,00 \text{ m}^3$.

Tabela 7.1 – Estimativa de custos diretos de implantação de uma trincheira de infiltração

Item	Unidade	Quantidade	Custo unitário R\$	Custo total R\$
Brita 3	m ³	4,5	35,00	157,50
Escavação de solo	m ³	4,5	16,70	75,15
Carga de terra	m ³	4,5	10,62	47,79
Transporte de terra	m ³	4,5	7,13	32,09
Manta geotêxtil	m ²	11,8	2,30	27,14
MDO servente/ajudante	dia	1	25,00	25,00
Tubos e conexões				30,00
			Total:	394,67

A estimativa apresentada na Tabela 7.1 refere-se aos custos diretos de implantação de uma unidade de trincheira de infiltração em um lote urbano. A implantação de um sistema de infiltração de águas pluviais em um loteamento requer estudos mais elaborados sobre os custos envolvidos indiretamente, há tais como: estudos iniciais da bacia, programas de incentivo, elaboração de manuais de projeto, monitoramento do sistema, fiscalização e gerenciamento do funcionamento das trincheiras.

8. ESTIMATIVA DA REDUÇÃO DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL EM UMA MICRO BACIA PELO USO DE TRINCHEIRAS DE INFILTRAÇÃO

O efeito do uso de trincheiras de infiltração de águas pluviais no hidrograma de cheia da bacia só pode ser precisamente avaliado considerando-se as propriedades hidráulicas do solo, a função de transformação chuva-vazão da área de drenagem e as condições exatas de operação e manutenção das trincheiras.

No entanto, para fins de prognóstico, pode-se fazer uma avaliação simplificada, utilizando-se o método racional e as condições ideais de operação das instalações de infiltração.

Considere-se o esquema representativo de uma micro bacia hidrográfica, compreendida por quarteirões residenciais, ilustrada na Figura 8.1. Trata-se de uma micro bacia hidrográfica urbana, composta por 12 quarteirões residenciais, em que o sentido do escoamento é indicado pelas setas, convergindo para um único ponto localizado no limite inferior direito da planta.

Figura 8.1 - Esquema representativo do escoamento superficial em uma microbacia urbana.

A área total da bacia é de 180.000 m², dos quais 125.000 m² (aproximadamente 70%) são compostos por lotes, e o restante, por ruas pavimentadas.

A estimativa da redução do escoamento superficial proporcionada pelo uso de trincheiras na micro bacia ilustrada é apresentada em duas etapas:

A – estimativa da vazão gerada em cada lote, para um determinado período de retorno e chuva de projeto;

B – estimativa da vazão infiltrada por um sistema descentralizado de trincheiras de infiltração nos lotes.

A) Estimativa da vazão de escoamento superficial

O cálculo estimado da vazão de escoamento no exutório da bacia, para uma dada chuva de projeto, é feito pelo método racional:

$$Q = 0,278CiA \quad (8.1)$$

em que:

Q = vazão de escoamento, m^3/s

C = coeficiente de escoamento superficial (Tabela 8.1)

i = intensidade de precipitação, mm/h

A = Área da bacia, km^2

A Tabela 8.1 apresenta os valores do coeficiente de escoamento superficial “C”, do método racional, adotados pela Prefeitura Municipal de São Paulo (Wilken, 1978, *Apud* Bidone e Tucci, 1995).

Tabela 8.1 - Valores do coeficiente de escoamento superficial C adotados pela Prefeitura Municipal de São Paulo
Fonte: Wilken, 1978 *apud* Bidone e Tucci, 1995.

Zonas	C
Edificação muito densa: Partes centrais, densamente construídas, de uma cidade com ruas e calçadas pavimentadas.	0,70 - 0,95
Edificação não muito densa: Partes adjacentes ao centro, de menor densidade de habitações, mas com ruas e calçadas pavimentadas.	0,60 - 0,70
Edificações com poucas superfícies livres: Partes residenciais, com ruas macadamizadas ou pavimentadas.	0,50 - 0,60
Edificações com muitas superfícies livres: Partes residenciais, com ruas macadamizadas ou pavimentadas.	0,25 - 0,50
Subúrbios com alguma edificação: Partes de arredores e subúrbios com pequena densidade de construção.	0,10 - 0,25
Matas, parques e campos de esporte: Partes rurais, áreas verdes, superfícies arborizadas, parques ajardinados, campos de esporte sem pavimentação.	0,05 - 0,20

Além do coeficiente de escoamento superficial, é necessário estimar a intensidade de precipitação, o que pode ser feito por meio da curva idf, em que o período de retorno considerado em projetos de micro drenagem varia de 2 a 10 anos. A Equação 3.2, representa a curva idf de São Carlos - SP.

$$i = \frac{1519 \cdot T^{0,236}}{(t + 16)^{0,935}} \quad (3.2)$$

em que:

i = intensidade de precipitação, em mm/h,

T = período de retorno, em anos,

t = duração da precipitação, em minutos, e

a , b , c e d são parâmetros ajustados empiricamente

De acordo com a proposta do método racional, a duração da precipitação máxima de projeto é igual ao tempo de concentração da bacia. Admite-se que a bacia seja pequena para que essa condição aconteça, pois a duração é inversamente proporcional à intensidade, conforme salientam *Bidone e Tucci, 1995*, que sugerem, para o cálculo do tempo de concentração da bacia o seguinte equacionamento:

A velocidade das superfícies é obtida com base na Equação 8.2:

$$v = k \cdot S^{0,5} \quad (8.2)$$

em que:

v = velocidade, em m/s;

k = coeficiente estimado de acordo com a Tabela 8.2;

S = declividade da superfície, em %.

O tempo de concentração é calculado por:

$$t_c = \sum_{i=1}^n \frac{L_i}{v_i} \quad (8.3)$$

em que:

L_i = comprimento do trecho

v_i = velocidade no trecho

Tabela 8.2 - Valores do coeficiente k (SCS, 1975)

Uso da terra e regime de escoamento	k
Floresta com muita folhagem no solo	0,076
Área com pouco cultivo; terraceamento	0,152
Pasto ou grama baixa	0,213

Uso da terra e regime de escoamento	k
Áreas cultivadas	0,274
Solo quase nu sem cultivo	0,305
Caminhos de escoamento em grama, pasto	0,457
Superfície pavimentada; pequenas vossorocas de nascentes	0,610

O cálculo do tempo de concentração feito por este método, para bacias muito pequenas, como um único lote urbano, gera valores muito pequenos, e, conseqüentemente, intensidades muito altas. Por este motivo, adotou-se um tempo de concentração de 10 minutos para determinar a curva idf.

$$i = \frac{1519 \cdot T^{0,236}}{(10 + 16)^{0,935}} = 72,2 \cdot T^{0,236}$$

Para T=2 anos, a intensidade de precipitação é:

$$i = 72,2 \cdot 2^{0,236} = 85,0 \text{ mm/h}$$

Para T=5 anos, a intensidade de precipitação é:

$$i = 72,2 \cdot 5^{0,236} = 105,6 \text{ mm/h}$$

De acordo com o método racional, e considerando que:

$$\text{Área de contribuição} = 700 \text{ m}^2 \text{ (área média dos lotes)} = 7 \times 10^{-4} \text{ km}^2$$

$$C = 0,70 \text{ (adotado, Tabela 8.1)}$$

Tem-se:

Para T=2 anos

$$Q = 0,278 \cdot (0,70) \cdot (85,0) \cdot (7 \cdot 10^{-4}) = 1,16 \times 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s} = 11,6 \text{ l/s}$$

Para T=5 anos

$$Q = 0,278 \cdot (0,70) \cdot (105,6) \cdot (7 \cdot 10^{-4}) = 1,43 \times 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{s} = 14,3 \text{ l/s}$$

B) Estimativa da redução no escoamento superficial com o uso de trincheiras:

A estimativa de redução do escoamento superficial, considerando que cada um dos lotes possua uma trincheira de infiltração, é feita através do balanço hídrico no lote, da seguinte forma:

$$V_e = V_a - V_i$$

em que:

$V_e = \text{volume escoado}, m^3$

$V_a = \text{volume afluente}, m^3$

$V_i = \text{volume infiltrado}, m^3$

Volume afluente:

O volume afluente é calculado com base na vazão de escoamento, estimada no item A, pelo método racional, e no tempo de precipitação.

Para T=2 anos

$$V_a = Q \cdot t = 0,0116 m^3 / s \cdot 600 s = 6,96 m^3$$

Para T=5 anos

$$V_a = Q \cdot t = 0,0143 m^3 / s \cdot 600 s = 8,58 m^3$$

Volume infiltrado:

Estimativa com base no ajuste do modelo de Philip (Equações 3.31 e 3.32) para os Solos 1 e 2:

$$\text{Solo 1: } I = Ct^{1/2} = 0,00571 \times 600^{1/2} = 0,14 \text{ m}^3/\text{m}^2$$

$$\text{Solo 2: } I = Ct^{1/2} = 0,00698 \times 600^{1/2} = 0,17 \text{ m}^3/\text{m}^2$$

Conforme as equações 7.4 e 7.5:

$$V_i = I \times A_{\text{inf}} = I \times 2LH \text{ (supondo a condição de fundo totalmente colmatado)}$$

Para uma trincheira de dimensões B=0,7m, L=10,0m e H=1,0m, tem-se, para os solos 1 e 2, a seguinte estimativa de volume infiltrado:

$$\text{Solo 1: } V_i = I \times A_{\text{inf}} = I \times 2LH = 0,14 \times 2 \times 10 \times 1 = 2,8 m^3$$

$$\text{Solo 2: } V_i = I \times A_{\text{inf}} = I \times 2LH = 0,17 \times 2 \times 10 \times 1 = 3,4 m^3$$

Ao volume infiltrado, soma-se o volume de armazenamento da trincheira, para obter o volume retido total:

$$\text{Solo 1: } 2,8 m^3 + (0,7 \times 10,0 \times 1,0) \times 45\% = 5,95 m^3$$

$$\text{Solo 2: } 3,4 m^3 + (0,7 \times 10,0 \times 1,0) \times 45\% = 6,55 m^3$$

O que corresponde, para um período de retorno de 2 anos, a uma redução de 85,0 % do escoamento superficial no lote, no caso do Solo1, e 94,0 % no caso do Solo 2. Para o período de retorno de 5 anos, os resultados conduzem a uma redução de 69,0% no volume de escoamento superficial gerado pelo lote no Solo 1, e 76,3% no Solo 2.

O escoamento superficial gerado no lote corresponde a, aproximadamente, 70% do total gerado em toda a bacia, se for assumida a hipótese simplificadora de homogeneidade de distribuição das parcelas de áreas impermeabilizadas no loteamento todo. Sendo assim,

o efeito do uso das trincheiras nos lotes, na redução do escoamento superficial em toda a bacia, é de:

Solo 1: 59,5% para $T=2$ anos; 48,3% para $T=5$ anos.

Solo 2: 65,8% para $T=2$ anos; 53,4% para $T=5$ anos.

Esta é a estimativa de redução do escoamento superficial na bacia, devida somente ao uso de trincheiras nos lotes. Técnicas complementares, tais como valas de infiltração em pátios e estacionamentos e calçadas e pavimentos permeáveis nas vias de menor tráfego, podem otimizar a eficiência do sistema de drenagem do loteamento, como um todo.

9. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho foi conduzido de modo a atender aos objetivos propostos no Capítulo 2. A partir dos resultados obtidos nos experimentos de campo e laboratório e na simulação numérica, pode-se formular algumas conclusões, bem como apresentar propostas para trabalhos futuros.

9.1. Escolha de dois solos de propriedades hidráulicas distintas e realização de ensaios de campo e laboratório para sua caracterização

Os Solos 1 e 2 foram escolhidos com o intuito de estudar o comportamento hidráulico das trincheiras em situações propícia e contrária à infiltração. Além disso, por questões de viabilidade prática de execução dos experimentos de campo, procurou-se escolher áreas experimentais localizadas nas proximidades da Escola de Engenharia de São Carlos - EESC. No interior do Campus em São Carlos a textura do solo tende a arenosa, e sofre pouca variação nos diversos setores do Campus, de modo que apenas uma área experimental foi instalada neste local. A outra área escolhida pertence também à EESC, mas em uma unidade distante 30 quilômetros da sede, na cidade de Itirapina, às margens da Represa do Broa, onde funciona o Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada - CRHEA, da USP São Carlos. Neste local, foi encontrado o solo que mais se aproximou de possuir propriedades distintas do solo do interior do campus. O solo do CRHEA foi denominado Solo 1, e o do interior do Campus na cidade, Solo 2.

Apesar do Solo 1 possuir maior teor de argila e silte que o Solo 2, ele não chega a ser classificado como uma argila; na verdade, os dois solos são arenosos, sendo o Solo 1 menos arenoso, e o Solo 2, mais arenoso. Estes solos permitiram a análise diferenciada das condições de operação das trincheiras. No entanto, ainda permanece uma lacuna a ser preenchida, que é o estudo experimental de trincheiras em condições mais adversas à infiltração, ou seja, em um solo com baixa condutividade hidráulica, da ordem de 10^{-5} cm/s. No entanto, ainda há necessidade de analisar as características de anisotropia local e

de heterogeneidade textural de ambos solos, em especial quando a condutividade hidráulica é menor. Para isso, recomenda-se futuros estudos experimentais de trincheiras em condições mais adversas à infiltração, com solos com baixa condutividade hidráulica, da ordem de 10^{-5} cm/s.

A condutividade hidráulica dos dois solos estudados neste trabalho é da ordem de grandeza de 10^{-3} cm/s.

É desejável que, em trabalhos futuros, sejam buscadas as condições ideais de caracterização dos solos para aplicação de equacionamento disponível na literatura que trata de solos homogêneos. Uma forma eficiente de avaliação desta propriedade é a determinação da curva de retenção do solo, pois, através dela, pode-se obter uma estimativa da distribuição dos diâmetros dos poros. Solos "ideais", além de se ajustarem melhor aos modelos de retenção disponíveis na literatura, permitem também melhor calibração dos equipamentos de campo, entre eles a sonda de nêutrons.

9.2. Realização de experimentos de infiltração em trincheiras para quantificar a variação do volume infiltrado e o desenvolvimento do campo de umidade

A metodologia utilizada para a condução dos ensaios com trincheiras de infiltração revelou-se adequada à observação dos dados de interesse. O sistema de transdutores de pressão forneceu valores precisos de lâmina d'água e sua variação no tempo, permitindo o ajuste ao modelo horizontal de infiltração de Philip. A sonda de nêutrons permitiu o acompanhamento instantâneo do perfil de umidade no entorno da seção transversal da trincheira, sem a necessidade de deformação da amostra pelo método gravimétrico convencional.

Os resultados observados permitiram o conhecimento do padrão de comportamento das trincheiras de infiltração para os dois solos estudados, revelando pequena diferença na capacidade de drenagem de ambos. Pode-se concluir que são resultados favoráveis no sentido de confirmar a viabilidade do uso de trincheiras como ferramentas para a redução do escoamento superficial, uma vez que os volumes infiltrados e perfis de umidade observados foram condizentes com a expectativa de boa percolação e redistribuição da água no solo necessária à sua utilização como recurso de armazenamento e disposição das águas pluviais em alternativa ao sistema convencional de drenagem urbana.

Os ensaios com trincheiras experimentais realizados neste trabalho foram conduzidos de modo a avaliar as propriedades hidráulicas das mesmas, em condições pré-estabelecidas, com volumes aplicados controlados. Para a avaliação da eficiência das

trincheiras na redução do escoamento superficial, com base em dados experimentais, recomenda-se, em trabalhos futuros, que se proceda a instalação de trincheiras em condições reais de operação, em lotes urbanos, conectadas ao telhado por meio de calhas, preenchidas com brita e revestidas com manta geotêxtil. Deste modo, poder-se-ia, ao longo de um determinado período hidrológico de observação, avaliar, não somente os volumes infiltrados e perfis de umidade, mas também o desgaste da trincheira, a possível perda de eficiência por colmatção, os volumes excedentes encaminhados para a rede de drenagem convencional, e o comportamento em resposta a eventos de chuva sucessivos.

Outro aspecto a ser estudado com relação às trincheiras de infiltração, e que pode ser incorporado em trabalhos futuros e estudos mais detalhados, é a sua utilização como meio de recarga do aquífero. Esta seria uma vantagem adicional do uso de trincheiras, considerando a importância deste fator, especialmente em bacias que utilizam as águas subterrâneas como principal fonte de abastecimento.

9.3. Modelagem do fenômeno bidimensional de infiltração em torno de trincheiras e comparação entre os resultados experimentais e numéricos

A adaptação do modelo de *Tabuada et al (1995)* para o estudo de trincheiras, formulado originalmente para sulcos de irrigação, foi feita conforme descrito no item 6.1. Os resultados obtidos para as simulações A subestimaram a capacidade de infiltração do solo, especialmente na fase de redistribuição.

Estes resultados podem se dever à forma escalonada da curva de retenção. Os parâmetros da curva de van Genuchten utilizados foram os apresentados na Tabela 5.2 e Figuras 5.3 e 5.4, que são ajustados para todos os pontos observados, e não possuem a mesma precisão do ajuste escalonado, de natureza bimodal de poros em um solo heterogêneo, que não foi introduzida na simulação numérica. A curva de van Genuchten é, juntamente com a equação de Richards', a base do modelo computacional, e divergências no seu ajuste em relação aos dados observados podem conduzir a estimativas também divergentes dos volumes infiltrados e perfis de umidade ao longo do processo de infiltração simulado, em relação ao observado.

Para a simulação B, iniciada em condição de saturação total do perfil, os resultados revelaram que, mesmo partindo de condições saturadas de umidade do solo, as trincheiras são capazes de infiltrar o volume de água equivalente a 40% de uma precipitação de 25 min e período de retorno de 2 anos, para a cidade de São Carlos, em um lote padrão de 250

m² com 60% de área impermeável. Este é um bom resultado, considerando a condição inicial desfavorável e a propensão do modelo a gerar dados subestimados de infiltração.

Em termos de simulação numérica, as propostas para trabalhos futuros podem ser direcionadas em dois sentidos: incorporar o efeito escalonado das curvas de retenção no modelo computacional, e ampliar a aplicação do software, não somente para prever volumes infiltrados, mas para dimensionar sistemas de infiltração, baseando-se nas considerações do capítulo 7.

Em termos de simulação numérica, as propostas para trabalhos futuros podem ser direcionadas em três sentidos: (1) incorporar o efeito escalonado de solos heterogêneos das curvas de retenção no modelo computacional, (2) ampliar a aplicação do software aqui disponibilizado e (3) avaliação do grau de incertezas das estimativas. Estas premissas são necessárias tanto para prever volumes infiltrados, como também para dimensionar sistemas de infiltração, baseando-se nas considerações do capítulo 7.

9.5. Proposta de uma metodologia de dimensionamento de trincheiras de infiltração

As metodologias apresentadas no capítulo 7 para o dimensionamento de trincheiras de infiltração baseiam-se em dois modelos de infiltração distintos. O primeiro, de Philip, oferece a possibilidade de uma estimativa simples dos volumes infiltrados, e não requer detalhes muito específicos a respeito da dinâmica da água no solo para ser aplicado. O segundo, de Richards', é mais preciso que o primeiro, mas requer conhecimento profundo das propriedades hidráulicas do solo.

Ambos podem ser aplicados em conjunto, como ferramentas no auxílio à decisão nas fases de prognóstico e de projeto de sistemas de infiltração, uma vez que a metodologia de dimensionamento em si é simples, baseada apenas no balanço hídrico na trincheira.

Maiores estudos na área de dimensionamento devem ser conduzidos no sentido de avaliar a viabilidade prática da implantação de sistemas de trincheiras em loteamentos, incluindo principalmente os custos. Com relação a este item em particular, os estudos necessários estão relacionados aos custos indiretos, citados na seção 7.5, e na "popularização" dos métodos e materiais construtivos.

9.6. Estimativa simplificada da redução no hidrograma da bacia proporcionada pelo uso de trincheiras de infiltração

A avaliação feita no capítulo 8, sobre a redução no hidrograma de cheia de uma micro bacia urbana pelo uso de trincheiras, apesar de simplificada pela utilização do método racional na determinação das vazões, e pela equação de Philip no cálculo dos volumes infiltrados, pode fornecer uma estimativa aproximada da redução no escoamento superficial.

O estudo revelou, considerando os dois tipos de solo estudados no trabalho, reduções da ordem de 85 a 95% no escoamento superficial gerado no lote, para o período de retorno de 2 anos, e de 70 a 80% para o período de retorno de 5 anos. A estimativa de redução no escoamento gerado pela bacia como um todo, devido ao uso de trincheiras nos lotes, foi da ordem de 60 a 65% para 2 anos, e 48 a 53% para 5 anos.

Esta margem de eficiência pode ser otimizada por meio da aplicação conjunta com outras técnicas de redução do hidrograma de cheia, e por estudos mais elaborados sobre a relação custo x benefício de sistemas de infiltração de águas de chuva.

Este trabalho se propôs a estudar o tema "trincheiras de infiltração" em alguns de seus principais aspectos, tais como o seu comportamento hidráulico, e métodos de dimensionamento e avaliação da eficiência quando aplicadas em bacias urbanas. Um variado leque de possibilidades se abre com relação aos estudos futuros sobre este tema, e alguns deles foram apresentados nesta seção. Recomenda-se que estas avaliações sejam aprimoradas em condições locais em bacias da região de São Carlos e que sejam incorporadas como tecnologias na escala de lote que favoreçam o gerenciamento integrado em bacias urbanas visando o Plano Diretor respectivo.

Recomenda-se que projetos em andamento, p.ex. "Experimento Piloto de Gerenciamento Integrado de Bacias Urbanas para o Plano Diretor de São Carlos", CT-HIDRO FINEP 01.02.0086.00, com interveniência do DAEE/SP continuem e aprimorem esta tecnologia de trincheiras de infiltração em pesquisas futuras.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKAGAWA, Y.; MATSUMOTO, Y.; ZAIZEN, M. (1997). The inspection of actual runoff control facilities five years after construction. *Water Science and Technology*, vol. 36, n.º 8-9, p. 373-377.
- ALFAKIH, E.; BARRAUD, S.; MARTINELLI, I. (1999). A study of stormwater infiltration system feasibility and design. *Water Science and Technology*, vol. 39, n.º 2, p. 225-231.
- ANDOH, R.Y.G.; DECLERCK, C. (1997). A cost effective approach to stormwater management? Source control and distributed storage. *Water Science and Technology*, vol. 36, n.º 8-9, p. 307-311.
- ARAÚJO, P.R.; GOLDENFUM, J.A.; TUCCI, C.E.M. Avaliação experimental de pavimentos permeáveis no controle da geração de escoamento superficial. In: *XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Belo Horizonte, 1999. *Anais*.
- BARBASSA, A. P. (1991). Simulação do efeito de urbanização sobre a drenagem pluvial na cidade de São Carlos – SP. EESC – UUSP, 1991, 327p., Tese (doutorado em hidráulica e saneamento) – Departamento de Hidráulica e Saneamento.
- BARNER, W.L. (1999). Comparison of stormwater management in a karst terrane in Springfield, Missouri – case histories. *Engineering Geology*, vol. 52, p. 105-112.
- BARRAUD, S.; AZZOUT, Y.; CRES, F.N. E CHOCAT, B. (1999). Selection aid of alternative techniques in urban storm drainage – proposition of an expert system. *Water Science and Technology*, Vol. 39, n.º 34, p. 241-248.
- BARRAUD, S.; GAUTIER, A.; BARDIN, J.P.; RIOU, V. (1999). The impact of intentional stormwater infiltration on soil and groundwater. *Water Science and Technology*, vol. 39, n.º 2, p. 185-192.
- BIDONE, F.; TUCCI, C.E.M. (1995). Microdrenagem. em *Drenagem Urbana*, ABRH, ed. da UFRGS, Capítulo 3.
- BRAGA, B.; TUCCI, C.E.M. E TOZZI, M., org. (1998). *Drenagem Urbana – Gerenciamento Simulação e Controle*, ABRH, editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 203 p.

- COOMBES, P.J.; ARGUE, J.R.; KUCZERA, G. (1999). Figtree Place: a case study in water sensitive urbana development (WSUD). *Urban Water*, vol. 1, p. 335-343.
- COOMBES, P.J.; KUCZERA, G.; KALMA, J.D.; ARGUE, J.R. (2002). An evaluation of the benefits of source control measures at the regional scale. *Urban Water*, vol. 4, p. 307-320.
- CORDEIRO NETO, O.M. (2004). Gerenciamento do saneamento em comunidades organizadas, Técnicas de minimização da drenagem de águas pluviais. Notas de aula. Universidade de Brasília.
- CRUZ, M.A.S.; TUCCI, C.E.M.; SILVEIRA, A.L.L. (1998). Controle do escoamento com detenção em lotes urbanos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, vol. 3, n.º 4, out.
- ELLIS, J.B.; DEUTSCH, T.C.; MOUCHEL, J.M.; SCHOLLES, L.; REVITT, M.D. (2004). Multicriteria decision approaches to support sustainable drainage options for the treatment of highway and urban runoff. *Science of the Total Environment*. /no prelo/.
- ELLIS, J.B.; JACOBSEN, T.H. (1996). Urban drainage impacts on receiving waters. *Journal of Hydraulic Research*, vol. 34, n.º 6, p. 771-783.
- ELLIS, J. B.; MARSALEK, J. (1996). Overview of urban drainage: environmental impacts and concerns, means of mitigation and implementations policies. *Journal of Hydraulic Research*, vol. 34, n.º 6, p. 723 – 731.
- FERGUSON, B.K. (1995). Store-water infiltration for peak-flow control. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, nov./dec., p. 463-466.
- FUJITA, S. (1997). Measures to promote stormwater infiltration. *Water Science and Technology*, vol. 36, n.º 8-9, p. 289-293.
- GEDOLF, G.; JACOBSEN, P.; FUJITA, S. (1994). Urban stormwater infiltration perspectives. *Water Science and Technology*, vol. 29, n.º 1-2, p. 245-254.
- VAN GENUTCHEN, M.T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America*, vol. 44, p. 892-898.
- GROTEHUMANN, D.; KHELIL, A.; SIEKER, F.; UHL, M. (1994). Alternative urban drainage concept and design. *Water Science and Technology*, vol. 29, n.º 1-2, p. 277-282.
- HAVERKAMP, R.; VAUCLIN, M., VACHAUD, G. (1984). Error analysis in estimating soil water content from neutron probe measurements: 1. local standpoint. *Soil Science*, vol. 137, n.º 2, p. 78-90.
- HUHN, V.; STECKER, A.; (1997). Alternative stormwater management concept for urban and suburban areas. *Water Science and Technology*, vol. 36, n.º 8-9, p. 295-300.
- LAWRENCE, A. I.; MARSALEK, J., ELLIS, J. B.; URBONAS, B. (1996). Stormwater detention and BMPs. *Journal of Hydraulic Research*, vol. 34, n.º 6, p. 799 – 813.

- LIBARDI, P. L.** (2000) Dinâmica da água no solo 2.ed. Departamento de Ciências Exatas da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ), Universidade de São Paulo (USP), Piracicaba-SP.
- LIBARDI, P.L.; REICHARDT, D.R.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W.** (1980). Simple field methods for estimating soil hydraulic conductivity. *Soil Science Society of American*, vol. 44, p. 3-7.
- MAKROPOULOS, C.; BUTLER, D.; MAKSIMOVIC, C.** (1999). Gis supported evaluation of source control applicability in urban areas. *Water Science and Technology*, vol. 39, n.º 9, p. 243-252.
- MEHLER, R.; OSTROWSKI, M.W.** (1999). Comparison of the efficiency of best stormwater management practices in urban drainage systems. *Water Science and Technology*, vol. 39, n.º 9, p. 269-276.
- MENDIONDO, E. M.** (2001). Contribuições da análise de incertezas para a recuperação ambiental de bacias através da abordagem interdisciplinar de Geobiohidrologia, Tese (Doutorado), IPH-UFRGS, Porto Alegre, 287p+anexos.
- MIKKELSEN, P.S.; JACOBSEN, P.** (1993). Stormwater infiltration design based on rainfall statistics and soil hydraulics. *Proc. ASCE International Symposium on Engineering Hydrology*, San Francisco, California, July 25-30, pp. 653-658.
- MIKKELSEN, P. S.; JACOBSEN, P.; FUJITA, S.** (1996). Infiltration practice for control of urban stormwater. *Journal of Hydraulic Research*, vol. 34, n.º 6, p. 827-840.
- MIKKELSEN, P.S.; HÄFLIGER, M.; OCHS, M.; JACOBSEN, P.; TJELL, J.C.; BOLLER, M.** (1997). Pollution of Soil and Groundwater from infiltration of highly contaminated stormwater – a case study. *Water Science and Technology*, vol. 36, n.º 8-9, p. 325-330.
- MUALEM, Y.** (1976). A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Wat. Res. Res.*, v.12, n.6, p.773-870.
- OTTO, S.L.R. E ALCAIDE, M.** (2001). Utilização do método TDR-Tensiômetro na obtenção da curva de retenção da água no solo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, vol. 5, n.º 2, p.265-269.
- PORTO, R. M.** (1989). Atenuação de Vazões de Pico em Bacias de Detenção. *Revista Brasileira de Engenharia*, vol. 7, n.º 2, p.05-18.
- PORTO, R. L. L.** (1995). Escoamento superficial direto. em *Drenagem Urbana*, ABRH, ed. da UFRGS, Capítulo 4.
- PRATT, C. J.** (1999). Use of permeable, reservoir pavement constructions for stormwater treatment and storage for re-use. *Water Science and Technology*, vol. 39, n.º 5, p. 145-151.

- SHORT, D.; DAWES, W.R.; WHITE, I.** (1995). The practicability of using Richards' equation for general purpose soil-water dynamics models. *Environment International*, vol. 21, n.º 5, p. 723-730, set.
- SIEKER, F.** (1998). On-site stormwater management as an alternative to conventional sewer systems: a new concept spreading in germany. *Water Science and Technology*, vol. 38, n.º 10, p. 65-71.
- SIEKER, F. E KLEIN, M.** (1998). Best management practices for stormwater-runoff with alternative methods in a large urban catchment in berlin, germany. *Water Science and Technology*, vol. 38, n.º 10, p. 91-97.
- SOTO, M.A.F.** (1999). Estudo da condutividade hidráulica em solos não saturados. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- SOTO, M.A.F.** (2004). Comparação entre métodos de imposição e de controle de sucção em ensaios com solos não saturados. Tese (Doutorado) – Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo
- SOUZA, V.C.B.** (2002). Estudo experimental de trincheiras de infiltração no controle do escoamento superficial (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- TABUADA, M. A., REGO, Z. J. C., VACHAUD, G. E PEREIRA, L. S.** (1995). Two-dimensional infiltration under furrow irrigation: modelling, its validation and applications. *Agricultural Water Management*, vol. 27, n.º 8-9, p. 105-123.
- TUCCI, C.E.M.** (1995). Inundações urbanas. em *Drenagem Urbana*, ABRH, ed. da UFRGS, Capítulo 1.
- TUCCI, C.E.M. E GENZ, F.** (1995). Controle do impacto da urbanização. em *Drenagem Urbana*, ABRH, ed. da UFRGS, Capítulo 7.
- VELDKAMP, R.G.; HERMANN, T.; COLANDINI, V.; TERWEL, L.; GEDOLF, G.D.** (1997). A decision network for urban water management. *Water Science and Technology*, vol. 36, n.º 8-9, pp. 111-115.
- WADA, Y.; MIURA, H.; TADA, R.; KODAKA, Y.** (1997). Evaluation of an improvement in runoff control by means of a construction of an infiltration sewer pipe under a porous asphalt pavement. *Water Science and Technology*, vol. 36, n.º 8-9, p. 397-402.
- WARNAARS, E.; LARSEN, A.V.; JACOBSEN, P. E MIKKELSEN, P. S.** (1999). Hydrologic behaviour of stormwater infiltration in a central urban area during 2 ¾ years of operation. *Water Science and Technology Technology*, vol. 39, n.º 2, p. 217-224.

ANEXO I**RELATÓRIO DE ANÁLISE DE SEGURANÇA RADIOLÓGICA DO
LABORATÓRIO DE HIDRÁULICA AMBIENTAL**

LABORATÓRIO DE HIDRÁULICA AMBIENTAL

**CRHEA - CENTRO DE RECURSOS HÍDRICOS E ECOLOGIA APLICADA
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - USP**

1. INTRODUÇÃO

O presente relatório tem por objetivo o credenciamento, junto à CNEN, do Laboratório de Hidráulica Ambiental do CRHEA - Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada, da Escola de Engenharia de São Carlos - USP, de modo a viabilizar, em suas atividades de pesquisa, o uso de fontes radioativas seladas.

Neste laboratório são desenvolvidas pesquisas diversas nas áreas de dinâmica dos fluidos, hidráulica e recursos hídricos, entre as quais destacam-se as abaixo mencionadas, nas quais o uso da radiação tem se revelado de grande utilidade na obtenção de dados precisos e rápidos, sem provocar intervenção nos fenômenos observados ou nas amostras analisadas. Alguns dos experimentos realizados são:

Determinação do perfil de umidade e densidade do solo: A medida da umidade do solo é comumente feita em laboratório, via método gravimétrico, com o uso de uma estufa e uma balança, na qual se pesa a amostra de solo com a umidade natural e após secagem; calcula-se, então, através da diferença entre as duas, a massa de água existente. No entanto, uma vez feita esta determinação, torna-se inviável estimar novamente a umidade da mesma porção de solo, uma vez que este foi removido e deformado. Quando se deseja acompanhar a variação da umidade em um processo de infiltração, é necessária uma ferramenta para observação do processo transiente em um determinado ponto ou perfil de solo. Ultimamente a física dos solos vem contando com o uso de técnicas radioativas na quantificação de diversas variáveis envolvidas no processo de movimento da água em meios porosos. Estas técnicas consistem, basicamente em medir a atenuação de um feixe radioativo incidente sobre a amostra. Por apresentarem características adequadas ao estudo da dinâmica da água no solo, os radioisótopos Césio-137 e Amerício-241 vêm sendo utilizados com frequência em tais medidas. Para tanto, lança-se mão de um equipamento conhecido como "sonda de nêutrons", que possui as vantagens de operar a grandes profundidades, fornecer respostas imediatas sem a necessidade de análises de laboratório, sem destruir as características estruturais do solo, possibilitando repetidas medições no mesmo ponto. As especificações técnicas deste equipamento serão detalhadas mais adiante.

Determinação da Concentração de Ar ou Outras Substâncias em Fluidos: Em estudos hidráulicos, ou na dinâmica dos fluidos em geral, é comum a necessidade de determinar a concentração de uma substância no fluido em movimento. Mais uma vez, a medição em

laboratório, pelos métodos tradicionais de coleta e análise de amostras, compromete a confiabilidade das medidas, tanto durante amostragem, por provocar interferência no escoamento, como também na análise, por ser uma medida pontual, não representativa das condições reais de concentração no fluido. Novamente, encontrou-se nas técnicas radioativas a solução para o problema de determinar a concentração em condições de medição externas ao escoamento, e, portanto, não interferindo no mesmo. Analogamente ao processo de determinação do perfil de umidade do solo, a metodologia consiste na medida da atenuação de um feixe de radiação gama, ao atravessar o escoamento em estudo. No caso do laboratório do CRHEA, utiliza-se um sistema composto por uma fonte de Césio -137 e um detetor, cujos detalhes de projeto serão especificados adiante.

2. CLASSIFICAÇÃO DA INSTALAÇÃO RADIOATIVA (CONFORME NORMA CNEN-NE 6.02)

O Laboratório de Hidráulica Ambiental enquadra-se, de acordo com sua área de atividade e fontes radioativas utilizadas, no item 4.1.3. da norma CNEN-NE 6.02:

Grupo III - Instalações que utilizam fontes seladas para fins outros que não os citados em 4.1.1 e 4.1.2.

De acordo com esta classificação, faz-se necessária a obtenção, junto à CNEN, de duas autorizações:

- para aquisição de material radioativo;
- para operação.

3. PROJETO FÍSICO DO LABORATÓRIO E ÁREAS RESTRITAS

176

4. EQUIPAMENTOS E FONTES DE RADIAÇÃO

4.1. Sistema de Emissão/Detecção de Radiação Gama (Fonte de Césio-137)

O Laboratório de Hidráulica Ambiental conta com um sistema de medição da concentração em fluidos por absorção de radiação gama, projetado e construído pela equipe do próprio laboratório, em 1980.

Trata-se, basicamente, de uma fonte de **Cs-137**, com **300 mCi de atividade inicial em 01/1980**. O material radioativo está inserido em uma cápsula de aço, mantida dentro de uma proteção de chumbo, a qual é dotada de um dispositivo de abertura que permite a saída do feixe colimado. Alinhado ao colimador de saída, o sistema possui um detetor de cristal de cintilação de iodeto de Sódio de 2,5 cm de diâmetro por 2,5 cm de espessura, ativado com 1% de iodeto de Tálcio. Este cristal fica acoplado a um tubo fotomultiplicador, gerando impulsos que são analisados e contados em um sistema monocal. A blindagem de chumbo em torno da cápsula é de 12,5 cm, em qualquer direção. A figura 4.1. ilustra o sistema descrito.

Figura 4.1 - Esquema geral de funcionamento do sistema emissor/detector de radiação gama.

Figuras 4.2. e 4.3.. - Fotografias do sistema instalado no canal de experimentação hidráulica.

Ressaltamos que todas as pessoas diretamente envolvidas com o uso do equipamento acima (técnico do laboratório e alunos de pós graduação) são submetidos a dosimetria constante, sendo que os valores registrados mensalmente nos dosímetros encontram-se sempre abaixo do nível registro de 0,2 mSv.

4.2. Sonda de Nêutrons

O Laboratório de Hidráulica Ambiental do CRHEA possui uma sonda de nêutrons para a determinação da umidade do solo em condições de campo. Este equipamento consiste de uma fonte radioativa, um detetor, um circuito eletrônico para amplificação de sinais conectado a um mostrador digital e um tubo de acesso instalado no solo. Para a medição, o equipamento é posicionado sobre o tubo instalado verticalmente no solo, no interior do qual insere-se a sonda até a profundidade desejada, por meio de um cabo que faz a interligação entre a fonte radioativa e os componentes eletrônicos. O princípio de funcionamento do equipamento é baseado na propriedade de moderação de nêutrons rápidos pela água presente no solo. A fonte radioativa, constituída por uma cápsula de Amerício-241:Berílio, emite nêutrons rápidos, que ao colidir com os núcleos de átomos de hidrogênio presentes no solo, tornam-se lentos, ou termalizados. Por não possuir carga elétrica, os nêutrons não podem ser detectados diretamente; mas podem ser absorvidos pelo núcleo dos átomos de um gás (Boro Trifluorídrico ou Hélio-3), o qual torna-se um emissor de fótons, que por sua vez podem ser facilmente detectados por um dispositivo eletrônico adequado. Os pulsos elétricos gerados são conduzidos à superfície, ampliados e

apresentados no mostrador em forma de contagem. A umidade do solo é obtida com o emprego de uma curva de calibração que expressa a relação entre contagens e umidade volumétrica, sendo definida para cada tipo de solo. Abaixo, fotografias do equipamento.

Figuras 4.4. e 4.5. - Sonda de nêutrons no interior da caixa de proteção.

A atividade inicial da fonte radioativa da sonda acima era de **10 mCi de Cs-137 em 12/06/83, com energia de 662 KeV, e 50 mCi de Am-241:Be em 01/09/84, com energia de 60 KeV.**

Os responsáveis pela operação do equipamento possuem curso de radioproteção no uso de fontes radioativas.

5. PLANO DE OPERAÇÕES

5.1. Controles Administrativos

O responsável pela radioproteção do laboratório, Prof. Dr. Fazal Hussain Chaudhry, vem executando as seguintes tarefas:

- implementar e orientar os procedimentos de radioproteção;
- garantir exposições tão baixas quanto razoavelmente exeqüíveis;
- elaborar e manter atualizadas as instruções operacionais e de emergência;
- treinar o pessoal envolvido com as atividades do laboratório.

5.2. Condução das Operações

A tabela abaixo traz a relação de todos os atuais usuários do Laboratório de Hidráulica Ambiental, com suas respectivas funções:

NOME	FUNÇÃO	FORMAÇÃO
Harry Edmar Schulz	Professor Titular	Doutorado
Fazal Hussain Chaudhry	Professor Titular	Doutorado
Osni Aparecido Rizato	Técnico	2.º Grau
Selma Vargas da Silva	Aluna pós-graduação	Doutoranda
Alberto Carlos M. Lima	Aluno pós-graduação	Doutorando
Melissa C. P. Graciosa	Aluna pós-graduação	Mestranda

As seguintes instruções gerais, relativas à segurança no trabalho com as fontes, são transmitidas por escrito, a todos os usuários:

- Usar dosímetro durante todo o tempo em que estiver executando trabalhos com as fontes radioativas;
- Planejar toda a sequência de passos do trabalho a ser realizado, de modo a minimizar o tempo de exposição;
- Sempre que possível, fazer uma simulação do experimento a ser realizado, antes de trabalhar efetivamente com a fonte, providenciando antecipadamente todo o material a ser utilizado no experimento;
- Manter a Sonda de Nêutrons guardada na caixa protetora, dentro do armário específico para esse fim, trancado, durante todo o tempo em que não estiverem sendo realizadas medições;
- Não permitir a aproximação de indivíduos estranhos ao experimento quando estiverem sendo utilizadas as fontes radioativas.

5.3. Programa de Treinamento e Procedimentos de Radioproteção Adotados

A principal medida de radioproteção adotada, consiste da restrição ao acesso às áreas onde se utiliza os equipamentos radioativos. O laboratório permanece trancado, sendo que o acesso é permitido somente aos alunos de pós-graduação que nele desenvolvem atividades

de pesquisa, aos professores responsáveis e ao técnico. Todas as portas do laboratório possuem sinalização de radioatividade.

A sonda de nêutrons é um equipamento de utilização em experimentações de campo nas imediações do laboratório; quando não está em uso, permanece guardada no interior do laboratório, em um armário de alvenaria trancado e sinalizado.

Todo novo usuário do laboratório será informado da existência e utilidade das fontes existentes, bem como dos procedimentos de utilização e proteção radiológica a elas pertinentes. A instituição oferece, periodicamente, cursos de radioproteção, e os usuários dos equipamentos radioativos são convidados a frequentá-los. Atualmente, todos os usuários possuem certificados recentes de participação nestes cursos.

O laboratório é mantido trancado durante todo o tempo em que não está em atividade, e possui sistema de alarme. No entanto, a CNEN será imediatamente comunicada sobre qualquer ocorrência comprometedora, tais como roubo ou avaria das fontes.

O pessoal interno é treinado para o controle de pequenos incêndios que porventura venham a ocorrer, embora não se utilize substâncias inflamáveis nas atividades normais do laboratório. Em caso de ocorrência de incêndio de maiores proporções, o corpo de bombeiros será acionado e comunicado sobre a existência e a localização das fontes radioativas.

Figuras 5.1 e 5.2 - Vista geral e da entrada do setor do CRHEA onde está instalado o Laboratório de Hidráulica Ambiental.

Figuras 5.3. e 5.4. - Principal porta de acesso do Laboratório de Hidráulica; Área de estudo do solo e utilização da sonda de nêutrons, a 100 m do laboratório.

6. GERÊNCIA DE REJEITOS

Devido à própria natureza das fontes radioativas existentes - fontes seladas - não há geração de rejeitos radioativos. Estes só existirão quando da desativação das instalações do laboratório, e consistirão dos próprios equipamentos existentes. Nesta ocasião, serão seguidos todos os procedimentos de retirada de operação constantes do item 13 da norma CNEN NE 6.02. e outros quantos forem pertinentes ao encaminhamento adequado das fontes a serem desativadas.

ANEXO II
REGISTRO PESSOAL, JUNTO À CNEN, PARA OPERAÇÃO DE MATERIAL
RADIOATIVO E REGISTRO DO LABORATÓRIO DE HIDRÁULICA
AMBIENTAL

Serviço Público Federal

Ofício nº 1716/2002 - CORAD/CNEN
Sisdoc- 11057/02, 3785/02, 1034/02

Rio de Janeiro, 08 de julho de 2002

Assunto: Registro para aplicação em pesquisa

Prezada(a) Senhor(a),

Vimos pela presente informar que foi concedido a V.Sa., um registro para uso de pequenas quantidades de radioisótopos na área de aplicação em pesquisa, registro: AP-0971, por terem sido cumpridos os requisitos contidos na Norma CNEN-NN-6.01 publicada no D.O.U de 16 de outubro de 1997.

Este registro é válido por 05 (cinco) anos, a partir da presente data, devendo a revalidação ser requerida com 01 (um) mês de antecedência, mediante formulário próprio, disponível em nosso site www.cnen.gov.br.

Outrossim, esclarecemos que o registro para uso não implica necessariamente na autorização para aquisição de radioisótopos, conforme previsto na Norma CNEN-NE-6.02, sendo apenas um dos pré-requisitos exigidos.

Outros pré-requisitos detalhados nas Normas específicas também devem ser atendidos de forma a permitir que a CNEN autorize a aquisição diretamente à entidade jurídica à qual V.S.a. encontra-se vinculado.

Atenciosamente

Ricardo Roberto de Azevedo Brito
Gerente

Coordenação de Instalações Radiativas

Ilmo(a). Sr.(a).
MELISSA CRISTINA PEREIRA GRACIOSA
Av. Trabalhador São-carlense, 400 - Centro
São Carlos - SP
13566-590

Comissão Nacional de Energia Nuclear
Rua Gal. Severiano, 60 Botafogo RJ
CEP - 22.294-900

Serviço Público Federal

Ofício nº. 2015/2002-CORAD/CNEN
(Sisdoc 9812/02)

Rio de Janeiro, 31 de julho de 2002

Assunto : Registro

Informamos que essa entidade está registrada nesta Coordenação de Instalações Radiativas (CORAD), com os seguintes dados:

Área: Pesquisa
Processo nº 001.288/2002 Matrícula : 14072
Especialidade: Laboratório de Pesquisa de Pequeno Porte
Profissional Responsável : Fazal Hussain Chaudhry
Radioisótopos e Quantidades: ^{137}Cs -310mCi; ^{241}Am -Be-50mCi

AO TRAT. 11-08-02
PARA PROVIDÊNCIAS,
SE NECESSÁRIAS.
8/11/08/02
Eugênio Foresti
Diretor

Cabe a responsabilidade legal pela adoção e o cumprimento das medidas de proteção radiológica que garantam a proteção do trabalhador ocupacionalmente exposto, a população e o meio ambiente, à direção da Instalação Sr. Eugênio Foresti.

O não cumprimento dos requisitos estabelecidos tanto no Plano de Radioproteção como nas Normas da CNEN poderá acarretar o cancelamento do Registro.

Quando a entidade já tiver submetido o Plano de Radioproteção, porém pleitear a aquisição de uma fonte de radiação cujo uso não esteja previsto no Plano original, deve ser submetida complementação sob forma de revisão dos aspectos específicos de segurança radiológica para a nova prática.

Quando houver qualquer modificação nas condições expostas neste documento, deverá ser solicitada a Alteração de Registro, mediante requerimento próprio (SCRA), disponível em www.cnem.gov.br.

Quando as atividades com material radioativo forem encerradas esse laboratório deverá solicitar o Cancelamento de Registro mediante requerimento próprio (SCRA), disponível em www.cnem.gov.br.

Atenciosamente,

Ricardo Roberto de Azevedo Brito
Gerente
Coordenação de Instalações Radiativas

Ilmº Sr. Eugênio Foresti
ESCOLA DE ENGENHARIA SÃO CARLOS - CENTRO DE PESQUISA DE RECURSOS HÍDRICOS E
LOGIA APLICADA - CRHEA - 14072[001.288/02]
1a Trabalhador São Carlense, 400 - Centro
-590 - São Carlos - SP

USP/E
ECOL
Avenid
13566-

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR
Rua General Sampaio, 80
50020-900 - Rio de Janeiro - RJ
22254-000

ANEXO III
CÓDIGO FONTE DO MODELO DE INFILTRAÇÃO

PROGRAMA PRINCIPAL

```

PROGRAM BIDISUL
! This program calculates the soil moisture profile around the section of a short
! irrigation furrow, during and after the irrigation process. It gives information
! on the position of the wetting front in the soil with time, thus allowing the
! quantification of the water stored in the root zone. It was developed by Tabuada,
! M.A. et al, in 1995, and published on the paper "Two-dimensional infiltration under
! furrow irrigation: modelling, its validation and applications", at Agricultural Water
! Management 27, 105-123.
! The program uses the two-dimensional Richards' equation.
! The function  $h=f(\theta)$ , where  $h$  is the matric potential and  $\theta$  is the soil
! moisture content, is given by Van Genuchten equation.
! The function  $k=f(\theta)$ , where  $k$  is the hydraulic conductivity and  $\theta$  is the soil
! moisture content, is given by the exponential equation  $k=k_0 \cdot \exp(\gamma(\theta-\theta_s))$ ,
! where  $k_0$  is the saturated hydraulic conductivity,  $\theta_s$  is the saturated moisture,
! and  $\gamma$  is a parameter empirically adjusted.
! The infiltration process is divided in three distinct phases:
! The Fase 1 means the advance and supply phases, occurring when water is supplied into
! the furrow.
! The Fase 2 means the recession phase, occurring when water infiltrates, after cut-off.
! The Fase 3 means the redistribution phase, occurring when water moves in the soil after
! infiltration ended.
! It's considered that: water and soil are incompressible, the soil is homogeneous and
! isotropic, the hysteresis is not considered.
! The time interval between two consecutive isopotential lines have to be the same that
! the interval since the irrigations beginning, when  $t=0$ , until the end of Fase 1.
! The input of this software is two files: the first one contains the initial values of
! the matric potential  $h$  for the first column of the domain; the second one contains
! the values of the variables that are read in the subroutine ReadData, and it is called
! dados.dat. Both have status "old", so they must exist before running the program, at
! the same directory of the .exe file.
! The output of this software is the file containing the values of the soil moisture
! content in each node of the domain, at each instant of the process, as well the file
! halt.dat containing the infiltrated volumes at each time intervals. Both have status
! "old", so they must exist before running the program, at the same directory of the
! .exe file.

```

```
REAL KAPA(200,200),LAG,LPR
```

```
C      INTEGER FLAG
      INTEGER FLAGTEST
```

```
COMMON /bisimul/ il, im
```

```

DIMENSION HI(200,200), TETAI(200,200), C(200,200), H(200,200),
*AIJ(200,200), BIJ(200,200), DIJ(200,200), EIJ(200,200),
*FIJ(200,200), GIJ(200,200), HM(2000,2000), H1(2000),
*TETA(200,200), X(200),Y(200)

```

```
CHARACTER FIC1*5,FICH1*9,FIC2*5,FICH2*9,NUMERO(400)*3,NOMEFI*13
```

```

DATA NUMERO/'1','2','3','4','5','6','7','8','9','10','11','12',
*          '13','14','15','16','17','18','19','20','21','22',
*          '23','24','25','26','27','28','29','30','31','32',
*          '33','34','35','36','37','38','39','40','41','42',
*          '43','44','45','46','47','48','49','50','51','52',
*          '53','54','55','56','57','58','59','60','61','62',
*          '63','64','65','66','67','68','69','70','71','72',
*          '73','74','75','76','77','78','79','80','81','82',
*          '83','84','85','86','87','88','89','90','91','92',
*          '93','94','95','96','97','98','99','100','101','102',
*          '103','104','105','106','107','108','109','110','111',
*          '112','113','114','115','116','117','118','119','120',
*          '121','122','123','124','125','126','127','128','129',
*          '130','131','132','133','134','135','136','137','138',
*          '139','140','141','142','143','144','145','146','147',
*          '148','149','150','151','152','153','154','155','156',
*          '157','158','159','160','161','162','163','164','165',
*          '166','167','168','169','170','171','172','173','174',
*          '175','176','177','178','179','180','181','182','183',
*          '184','185','186','187','188','189','190','191','192',
*          '193','194','195','196','197','198','199','200','201',
*          '202','203','204','205','206','207','208','209','210',
*          '211','212','213','214','215','216','217','218','219',
*          '220','221','222','223','224','225','226','227','228',
*          '229','230','231','232','233','234','235','236','237',
*          '238','239','240','241','242','243','244','245','246',
*          '247','248','249','250','251','252','253','254','255',
*          '256','257','258','259','260','261','262','263','264',
*          '265','266','267','268','269','270','271','272','273',

```

```

*          '274','275','276','277','278','279','280','281','282',
*          '283','284','285','286','287','288','289','290','291',
*          '292','293','294','295','296','297','298','299','300',
*          '301','302','303','304','305','306','307','308','309',
*          '310','311','312','313','314','315','316','317','318',
*          '319','320','321','322','323','324','325','326','327',
*          '328','329','330','331','332','333','334','335','336',
*          '337','338','339','340','341','342','343','344','345',
*          '346','347','348','349','350','351','352','353','354',
*          '355','356','357','358','359','360','361','362','363',
*          '364','365','366','367','368','369','370','371','372',
*          '373','374','375','376','377','378','379','380','381',
*          '382','383','384','385','386','387','388','389','390',
*          '391','392','393','394','395','396','397','398','399',
*          '400/'

il = 6 ! File number 6
im = 7 ! File number 7

WRITE(*,1000)
1000  FORMAT(/'NOME DO ARQUIVO COM OS h's INICIAIS  >',$)
READ(*,1010) FIC1
1010  FORMAT(A5)
FICH1=FIC1/''.DAT'
OPEN(5,FILE=FICH1,STATUS='OLD')
WRITE(*,1015)
1015  FORMAT(/'NOME DO ARQUIVO DE SAIDA  >',$)
READ(*,1010) FIC2
FICH2=FIC2/''.LIS'
OPEN(6,FILE=FICH2,STATUS='OLD',RECL=350)
OPEN(UNIT=7,FILE='HALT.DAT',STATUS='OLD')
OPEN(UNIT=9999,FILE='almeida.DAT',STATUS='OLD')
OPEN(UNIT=8888,FILE='coeficients.DAT',STATUS='old') ! Melissa on 8.3.2005
OPEN(UNIT=7777,FILE='hydrconduc.DAT',STATUS='old') ! Melissa on 8.3.2005
OPEN(UNIT=6666,FILE='cij.DAT',STATUS='old') ! Melissa on 8.3.2005
OPEN(UNIT=5555,FILE='HI.DAT',STATUS='old') ! Melissa on 8.3.2005
OPEN(UNIT=4444,FILE='HM.DAT',STATUS='old') ! Melissa on 8.3.2005
OPEN(UNIT=3333,FILE='H1.DAT',STATUS='old') ! Melissa on 8.3.2005
OPEN(UNIT=2222,FILE='soilmoist.DAT',STATUS='old') !Melissa on 30.3.2005
OPEN(UNIT=1111,FILE='matricpot.DAT',STATUS='old') !Melissa on 5.4.2005

Call ReadData(NTC, NTL, NCS, NCFS, NLS, CANG, NVEZES, INCR,
*          ACTIV, TETAS, TETAR, ALFA, BETA, CKS, GAMA,
*          DELTAX, DELTAZ, DELTAT, NZDREN,LCOMP, Q, HTEMPALI,
*          TTREG, TEMPO)
NumberOfInt = 0

DO 100 I=1,NLS-1
  READ(5,*) HI(I,1)
  DO 100 J=1,NCS+I-1
100    HI(I,J)=HI(I,1)
  DO 200 I=NLS,NTL+(NVEZES*INCR+2)
    READ(5,*) HI(I,1)
    DO 200 J=1,NTC
200    HI(I,J)=HI(I,1)

  WRITE(1111,210)
210  FORMAT(1X,/' matriz cm os valores de HI(I,J) em T=0 ',/)
  DO 220 I=1,NLS-1
220    WRITE(1111,1200) (HI(I,J),J=1,NCS+I-1)
  DO 230 I=NLS,NTL+(NVEZES*INCR+2)
230    WRITE(1111,1200) (HI(I,J),J=1,NTC)

1200  FORMAT(3X,40F10.3//)

DELTAT1=DELTAT/3600      ! transformando a unidade de segundos para horas.
NZR=NZDREN/DELTAT
S=1/CANG
ML=0

call SoilMoistContF0(KAPA, C, TETAS, GAMA, NCS, HI,
*          BETA11, BETA, NTL, ALFA, TETAR,
*          NTC, CKS, NLS, TETAI, INCR, NVEZES)

MCONT=0
IFIMREC=1
TACRE=TEMPO
ICONTEMPO=1

call incidFase0(DELTAT1, NCFS, BETA11, BETA, ALFA, TETAR,
*          TETAS, GAMA, C, CKS, CANG, DELTAZ, DELTAX,
*          NLS, KAPA, HI, NTC, NTL, NCS, NVEZES, INCR,

```



```

*          AIJ, BIJ, DIJ, EIJ, FIJ, GIJ)

C          #####
C          #   FASE DE ALIMENTACAO   #
C          #####
C
C          COEFICIENTES DA MATRIZ
C          =====
C          SUBPROGRAMA PARA OBTEN O NÚMERO DE INCÓGNITAS
C
C          NLSSA=No.DE LINHAS NO SULCO SEM AGUA MENOS A PRIMEIRA
C          NLSCA=No. DE LINHAS NO SULCO COM AGUA MENOS A ÚLTIMA DO
C          FUNDO DA TRINCHEIRA
C          NLS=No.DE LINHAS ATE O FUNDO DA TRINCHEIRA INCLUINDO A PRIMEIRA
C          =====

VOL1=.0
T=DELTAT
LCICL=1
222      IF(VOL1.LE..0) VOL1=0.0

      Call WaterLevel(T,Q,LCOMP,LAG,S,NCFS,DELTAX,VOL1,TH,LCICL,
*          HTEMPALI)

      IF(LAG.LT.DELTAZ) THEN
          NLSCA=0
          IF(NLSCA.EQ.0) NLSCA1=NLSCA
      ELSE
          NLSCA=LAG/DELTAX
      ENDIF

      NLSSA=NLS-(NLSCA+2)

      WRITE(*,1063) LAG,NLSCA,NLSSA, NumberOfInt
1063      FORMAT(1X,'LAG=',F8.4,'NLSCA=',I2,'NLSSA=',I2,/,
*          'NUMERO DE ITERACAO',I25)

      ! IF (NLSSA.GE.1) THEN !Melissa on 9.Apr.2005
      LL=0
      DO 800 I=1,NLSSA
800      LL=LL+I
      ! ELSE !Melissa on 9.Apr.2005
      ! LL=0 !Melissa on 9.Abr.2005
      ! ENDIF !Melissa on 9.Apr.2005

      ! IF (NLSCA.GE.1) THEN !Melissa on 9.Apr.2005
      LL1=0
      DO 801 I=1,NLSCA
801      LL1=LL1+I-1
      ! ELSE !Melissa on 9.Apr.2005
      ! LL1=0 !Melissa on 9.Apr.2005
      ! ENDIF !Melissa on 9.Apr.2005

      LL2=NTC-NCFS
      LL3=NTC*(NTL-NLS)
      NPN1=NCS+NLSSA*NCS+LL+NLSCA*(NCS+NLSSA)+LL1+LL2+LL3
      NPN2=NPN1+1
      NPN3=NPN1-LL3
      NPN4=NPN1-NTC

      call assembleMatF1 (AIJ, BIJ, EIJ, FIJ, DIJ, GIJ, NTL, NCFS,
*          NTC, NLSCA, LAG, NLS, NPN2, DELTAX,
*          NPN1, CANG, DELTAZ, NCS, NLSSA,
*          HI, HM, T)

      call assembleVectF1 (NTL, NCFS, NTC, NLS, NCS, NLSSA,
*          NPN1, ICONTEMPO, H, HI, H1, T)

      ICONTEMPO=2

      call gSeidel(H1, HM, NPN1, NPN2, NPN3, NPN4, NTC, KIT,
*          NumberOfInt)
      ! call gSeidelModif(H1, HM, NPN1, NPN2, FLAGCONVERG)
      ! if (FLAGCONVERG.EQ.1) GOTO 7666

112      WRITE(6,950) KIT

950      FORMAT(3X,'O PROCESSO CONVERGE COM KITER','=',I4)

      call SoilMoistContF1(TETA, KAPA, C, H, TETAS, GAMA, NCS,
*          NLSSA, BETA11, BETA, NTL, ALFA, TETAR,

```

```

*          NCFS, NTC, CKS, NLS, H1, INCR, NVEZES,
*          T)

T=T+DELTAT
IF(T.EQ.30) DELTAT = 1

DELTAT1=DELTAT/3600

call WaterVolumeF1(NLSSA, TACRE, HTEMPALI, LAG, NTL, LCOMP,
*          DELTAZ, DELTAX, T, NCFS, TETAS, NLS, NCS,
*          NTC, X, Y, NOMEFI, NUMERO, TETA1, H, HI,
*          ML, TEMPO, TETA, VOL1, NTC1, DIF, VOL)

call IncrLinesF1 (HM, NCS, NLS, NCFS, NLSCA, NLSSA, GAMA,
*          CKS, BETA11, BETA, ALFA, TETAR, TETAS, C,
*          NTC, INCR, ACTIV, H, HI, TETA, KAPA, DIF,
*          NTL, NPN1, NPN2, NPN3, NPN4)

IF(LCICL.EQ.2) GOTO 377

call incidFase1(DELTAT1, NCFS, BETA11, BETA, ALFA, TETAR, H,
*          TETAS, GAMA, C, CKS, CANG, DELTAZ, NLSSA,
*          DELTAX, NLS, KAPA, HI, NTC, NTL, NCS, AIJ,
*          BIJ, DIJ, EIJ, FIJ, GIJ, NVEZES, INCR, T)

DO 74455 I=1,NPN3
    DO 74455 J=1,I+NTC
74455    HM(I,J)=0

DO 74466 I=NPN3+1,NPN4
    DO 74466 J=I-NTC,I+NTC
74466    HM(I,J)=0

DO 74477 I=NPN4+1,NPN1
    DO 74477 J=1-NTC,NPN1
74477    HM(I,J)=0

DO 74488 I=1,NPN1
74488    HM(I,NPN2)=0

LCONT=LCONT+1
IF(LAG.LE.HTEMPALI.OR.LCICL.EQ.1) GOTO 222

1066 call assembleMatF2 (AIJ, BIJ, EIJ, FIJ, DIJ, GIJ, NTL, NCFS,
*          NTC, NLSCA, LAG, NLS, NPN2, DELTAX, T,
*          CANG, DELTAZ, NCS, NLSSA, HI, LPR, HM,
*          NPN1)

call assembleVectF2 (NTL, NCFS, NTC, NLS, NCS, NLSSA,
*          NLSCA, H, H1, NPN1, T)

call gSeidel(H1, HM, NPN1, NPN2, NPN3, NPN4, NTC, KIT,
*          NumberOfInt)
!call gSeidelModif(H1, HM, NPN1, NPN2, FLAGCONVERG)
!if (FLAGCONVERG.EQ.1) GOTO 7666

8112    WRITE(6,1950) KIT

1950    FORMAT(3X,'O PROCESSO CONVERGE COM KITER','=',I4)

call SoilMoistContF2(TETA, KAPA, C, H, TETAS, GAMA, NCS,
*          NLSSA, BETA11, BETA, NTL, ALFA, TETAR,
*          NCFS, NTC, CKS, NLS, H1, INCR, NVEZES,
*          T, DELTAZ, LAG, NLSCA, NPN1, NPN2,
*          NPN3, NPN4, HM)

call WaterVolumeF2(TETA, DELTAT, TETAS, NTL, NLSSA,
*          NCS, NLS, DELTAZ, DELTAX, NCFS,
*          CANG, TACRE, LCOMP, X, Y, NOMEFI,
*          NUMERO, TETA1, H, HI, LAG, ML, NTC,
*          TEMPO, VOL1, DIF, T, DELTAT1, NTC2,
*          T2, VOLR, VOL)

call IncrLinesF2 (HM, NCS, NLS, NCFS, NLSCA, NLSSA, GAMA,
*          CKS, BETA11, BETA, ALFA, TETAR, TETAS, C,
*          NTC, INCR, ACTIV, H, HI, TETA, KAPA, DIF,
*          NTL, NPN1, NPN2, NPN3, NPN4)

IF(LAG.LE.0.1) GOTO 1006

! AQUI COMEÇA A FASE 2
377 call incidFase2(DELTAT1, NCFS, BETA11, BETA, ALFA, TETAR, H,

```

```

*      TETAS, GAMA, C, CKS, CANG, DELTAZ, NLSSA, T,
*      NLSCA, DELTAX, NLS, KAPA, HI, NTC, NTL, NCS,
*      AIJ, BIJ, DIJ, EIJ, FIJ, GIJ, INCR, NVEZES)

DO 4455 I=1,NPN3
  DO 4455 J=1,I+NTC
4455   HM(I,J)=0
DO 4466 I=NPN3+1,NPN4
  DO 4466 J=I-NTC,I+NTC
4466   HM(I,J)=0
DO 4477 I=NPN4+1,NPN1
  DO 4477 J=I-NTC,NPN1
4477   HM(I,J)=0
DO 4488 I=1,NPN1
4488   HM(I,NPN2)=0
GOTO 1066
6668 call assembleMatF3 (AIJ, BIJ, EIJ, FIJ, DIJ, GIJ, NTL, NCFS,
*      NTC, NLS, NPN2, DELTAX, CANG, DELTAZ,
*      NCS, HI, HM, T, NPN1)

call assembleVectF3 (NTL, NTC, NLS, NCS, H, H1, T, NPN1)

  call gSeidel(H1, HM, NPN1, NPN2, NPN3, NPN4, NTC, KIT,
*      NumberOfInt)
!call gSeidelModif(H1, HM, NPN1, NPN2, FLAGCONVERG)
!if (FLAGCONVERG.EQ.1) GOTO 7666

call SoilMoistContF3(TETA, KAPA, C, H, TETAS, GAMA, NCS,
*      BETA11, BETA, NTL, ALFA, TETAR,
*      NTC, CKS, NLS, H1, INCR, NVEZES, T)

T=T+DELTAT

2051   call WaterVolumeF3(TETA, NCS, NLS, LAG, TTREG, NZR, VOLZR,
*      LCOMP, DELTAZ, IFIMREC, DELTAX, NTL, T,
*      NUMERO, NOMEFI, FLAGTEST, TETA1, H, HI,
*      ML, TEMPO, NTC, DELTAT, DELTAT1, VOL1)

call IncrLinesF3 (HM, NCS, NLS, GAMA, DIF, NTL, NPN1, NPN2,
*      CKS, BETA11, BETA, ALFA, TETAR, TETAS, C,
*      NTC, INCR, ACTIV, H, HI, TETA, KAPA, NPN3,
*      NPN4)

IF(T.GE.TTREG) GOTO 7666

IF(NTL.GT.60) THEN
  FLAGTEST = 1
  GOTO 2051
ENDIF

IFIMREC=2

IF(N21.EQ.2) GOTO 1003

1006   DELTAT=.5
      DELTAT1=DELTAT/3600.
C =====
C      AUMENTO DO NUMERO DE NOS DO FUNDO DA TRINCHEIRA
C      NO COMECO DA FASE DE REDISTRIBUICAO
C =====
DO 9455 I=1,NPN3
  DO 9455 J=1,I+NTC
9455   HM(I,J)=0

DO 9466 I=NPN3+1,NPN4
  DO 9466 J=I-NTC,I+NTC
9466   HM(I,J)=0

DO 9477 I=NPN4+1,NPN1
  DO 9477 J=I-NTC,NPN1
9477   HM(I,J)=0

DO 9488 I=1,NPN1
9488   HM(I,NPN2)=0

N21=2
I=NLS
DO 9999 J=NTC-NCFS+1,NTC
  H(I,J)=0
  TETA(I,J)=TETAS

```



```

          C(I,J)=0
9999      KAPA(I,J)=CKS

          LL=0
          DO 88088 I=1,NLS-2
88088      LL=LL+I

          LL3=NTC*(NTL-(NLS-1))
          NPN1=NCS*(NLS-1)+LL+LL3
          NPN2=NPN1+1
          NPN3=NPN1-LL3
          NPN4=NPN1-NTC

          ! AQUI COMEÇA A FASE 3
1003 call incidFase3(DELTAT1, NCFS, BETA11, BETA, ALFA, TETAR, H,
          *          TETAS, GAMA, C, CKS, CANG, DELTAZ, DELTAX,
          *          NLS, KAPA, HI, NTC, NTL, NCS, AIJ, BIJ, DIJ,
          *          EIJ, FIJ, GIJ, T, INCR, NVEZES)

          DO 84455 I=1,NPN3
            DO 84455 J=1,I+NTC
84455      HM(I,J)=0

          DO 84466 I=NPN3+1,NPN4
            DO 84466 J=I-NTC,I+NTC
84466      HM(I,J)=0

          DO 84477 I=NPN4+1,NPN1
            DO 84477 J=I-NTC,NPN1
84477      HM(I,J)=0

          DO 84488 I=1,NPN1
84488      HM(I,NPN2)=0

          GOTO 6668
7666      CLOSE(7)

          END

```

SUB-ROTINA READDATA

```

C *****
C      Subrotina criada por almeida, em 05/janeiro/2005 para leitura dos dados de
C      entrada do modelo.
C *****

SubRoutine ReadData(NTC, NTL, NCS, NCFS, NLS, CANG,NVEZES,INCR,
*          ACTIV, TETAS, TETAR, ALFA, BETA, CKS, GAMA,
*          DELTAX, DELTAZ, DELTAT, NZDREN, LCOMP, Q,
*          HTEMPALI, TTREG, TEMPO)

          open (unit=100,file='dados.dat',STATUS='OLD')

2000      format(i12)
2001      format(1i10)
2002      format(f10.4)

          read(100,2000)
          read(100,2000) NTC
          read(100,2000)
          read(100,2000) NTL
          read(100,2000)
          read(100,2000) NCS
          read(100,2000)
          read(100,2000) NCFS
          read(100,2000)
          read(100,2000) NLS
          read(100,2000)
          read(100,2002) CANG
          read(100,2000)

!      Aqui ele introduz variáveis que servem para aumentar o número de linhas do domínio
!      com base em uma variação de potencial na última linha, definida pelo usuário, através da
!      variável ACTIV, em mH2O (ou cmH2O, ainda tem que conferir).
!      As variáveis NVEZES e INCR definem, respectivamente, quantas vezes o perfil será aumentado
!      e quantas linhas de cada vez. Isso para ele só ter que calcular as linhas da malha que a
!      frente de molhamento já tiver atingido.
!      São atribuídos a todos os nós da malha os valores de umidade da
!      primeira coluna
          read(100,2000) NVEZES
          read(100,2000)

```

```

        read(100,2000) INCR
        read(100,2000)
        read(100,2002) ACTIV
        read(100,2000)
        read(100,2002) TETAS
        read(100,2000)
        read(100,2002) TETAR
        read(100,2000)
        read(100,2002) ALFA
        read(100,2000)
        read(100,2002) BETA
        read(100,2000)
        read(100,2002) CKS
        read(100,2000)
        read(100,2002) GAMA
        read(100,2000)
        read(100,2002) DELTAX
        read(100,2000)
        read(100,2002) DELTAZ
        read(100,2000)
        read(100,2002) DELTAT
        read(100,2000)
        read(100,2000) NZDREN
        read(100,2000)
        read(100,2000) LCOMP
        read(100,2000)
        read(100,2002) Q
        read(100,2000)
        read(100,2002) HTEMPALI
        read(100,2000)
        read(100,2002) TTREG
        read(100,2000)
        read(100,2002) TEMPO
        close(100)
        return

END

C SubRoutine WriteData(NTC, NTL, NCS, NCFS, NLS, CANG,NVEZES,INCR,
C *          ACTIV, TETAS, TETAR, ALFA, BETA, CKS, GAMA,
C *          DELTAX, DELTAZ, DELTAT, LCOMP, Q, HTEMPALI,
C *          TTREG,TEMPO)
C
C
C          return
C end

```

SUB-ROTINA SOILMOISTCONF0

```

! Calculates the soil moisture content of the domain, at the instant,
! T=0, using the initial values of the matric potencial, for each node,
! that was read on the file solo1_ini.dat. The expression used to do that
! is the Van Genuchten's equation.
!
! Input variables:
!
! Output variables: BETA11 (m by Van Genuchten, to incidFase0, incidFase1)
!                  C(i,j)
!                  KAPA(i,j)

Subroutine SoilMoistConf0(KAPA, C, TETAS, GAMA, NCS, HI,
*          BETA11, BETA, NTL, ALFA, TETAR,
*          NTC, CKS, NLS, TETAI, INCR, NVEZES)

Real KAPA(200,200)

Dimension TETAI(200,200), C(200,200), HI(200,200)

WRITE(6,1060)
1060      FORMAT(1X,' TEOR DE UMIDADE DO PERFIL INICIAL ',/)

DO 500 I=1,NLS-1
    DO 500 J=1,NCS+I-1
        ABH=ABS(HI(I,J))
        BETA11=1-(1/BETA)
        TETAI(I,J)=(TETAS-TETAR)/((1+(ALFA*ABH)**BETA)**BETA11)
        +TETAR
        C(I,J)=ALFA*(TETAS-TETAR)*BETA*BETA11*(1+(ALFA*ABH)**BETA)
        *(BETA11-1)*(ALFA*ABH)**(BETA-1)/(((1+(ALFA*ABH)**BETA)**
$

```

```

$          BETA11)**2)
500      KAPA(I,J)=CKS*EXP(GAMA*(TETAI(I,J)-(TETAS)))

DO 550 I=NLS,NTL+(NVEZES*INCR+2)
      DO 550 J=1,NTC
          ABH=ABS(HI(I,J))
          TETAI(I,J)=(TETAS-TETAR)/((1+(ALFA*ABH)**BETA)**BETA11)
          +TETAR
          C(I,J)=ALFA*(TETAS-TETAR)*BETA*BETA11*(1+(ALFA*ABH)**BETA)
          ** (BETA11-1)*(ALFA*ABH)**(BETA-1)/(((1+(ALFA*ABH)**BETA)**
          BETA11)**2)

          WRITE(*,*)          TETAI(I,J)

550      KAPA(I,J)=CKS*EXP(GAMA*(TETAI(I,J)-(TETAS)))

DO 560 I=1,NLS-1
560      WRITE(6,1070) (TETAI(I,J),J=1,NCS+I-1)
DO 570 I=NLS,NTL+(NVEZES*INCR+2)
570      WRITE(6,1070) (TETAI(I,J),J=1,NTC)
1070      FORMAT(3X,40F7.4)

WRITE(7777,580)
580      FORMAT(1X,/' matriz com os valores de condutividade hidraulica
          *no instante inicial T=0 KAPA(i,j) cm/h ',/)
DO 590 I=1,NLS-1
590      WRITE(7777,9665) (KAPA(I,J),J=1,NCS+I-1)
DO 600 I=NLS,NTL+(NVEZES*INCR+2)
600      WRITE(7777,9665) (KAPA(I,J),J=1,NTC)

WRITE(6666,610)
610      FORMAT(1X,/' matriz cm os valores de C(i,j)
          *no instante inicial T=0 ',/)
DO 620 I=1,NLS-1
620      WRITE(6666,9665) (C(I,J),J=1,NCS+I-1)
DO 630 I=NLS,NTL+(NVEZES*INCR+2)
630      WRITE(6666,9665) (C(I,J),J=1,NTC)

9665      FORMAT(3X,40E10.3//)

WRITE(2222,2580)
2580      FORMAT(1X,/' Perfil de umidade no instante t=0 '/)
DO 2560 I=1,NLS-1
2560      WRITE(2222,3070) (TETAI(I,J),J=1,NCS+I-1)
DO 2570 I=NLS,NTL+(NVEZES*INCR+2)
2570      WRITE(2222,3070) (TETAI(I,J),J=1,NTC)
3070      FORMAT(3X,40F10.7)

return
end

```

SUB-ROTINA INCIDF0

```

!      Determining the coefficients of the Incidence Matrix,
!      Aij, Bij, Dij, Eij, Fij and Gij, for the Fase 0, according to the
!      equation 4 of Tabuada et. al (1995), that is the discretization of
!      two-dimensional Richards' Equation.
!
!      The Fase 0 means the initial instant T=0, before the irrigation
!      begining.
!
!      Input variables: NLS, NCS, NTL, NTC, NCFS, DELTAX, DELTAZ, CANG, CKS, GAMA,
!                      TETAS, TETAR, ALFA, BETA (from input file dados.dat)
!                      HI(i,j) (initial values of matric potential, from Bidisul)
!                      KAPA(i,j) (from SoilMoistContF0)
!                      BETA11 (m by Van Genuchten, from SoilMoistContF0)
!                      C(i,j) (derivation of Van Genuchten equation, from SoilMoistContF0)
!                      DELTAT1 (DELTAT in hours, from Bidisul)
!
!      Output variables: AIJ, BIJ, EIJ, FIJ, DIJ, GIJ (coefficients of incidence matrix,
!                      to assembleMatF1)
!
      Subroutine incidFase0(DELTAT1, NCFS, BETA11, BETA, ALFA, TETAR,
      *                      TETAS, GAMA, C, CKS, CANG, DELTAX, DELTAZ,
      *                      NLS, KAPA, HI, NTC, NTL, NCS, NVEZES, INCR,
      *                      AIJ, BIJ, DIJ, EIJ, FIJ, GIJ)

      REAL KAPA(200,200)
      Dimension AIJ(200,200), BIJ(200,200), DIJ(200,200), EIJ(200,200),
      *          FIJ(200,200),GIJ(200,200), C(200,200), HI(200,200)

```



```

C -----
C      DETERMINAÇÃO DOS VALORES DE
C      Aij, Bij, Dij, Eij E Fij
C      PARA AS CONDIÇÕES DE CONTORNO
C      NO TEMPO T=0
C -----
C
C CÁLCULO DOS Aij
      DO 575 I=1,NLS-1
        DO 575 J=2,NCS+I-1
          575   AIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+KAPA(I,J-1))* .5/DELTAZ**2
        DO 580 I=NLS,NTL
          DO 580 J=2,NTC
            580   AIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+KAPA(I,J-1))* .5/DELTAZ**2
          DO 585 I=1,NTL
            585   AIJ(I,1)=(KAPA(I,1)+KAPA(I,2))* .5/DELTAZ**2
C
C CÁLCULO DOS Bij
C
      DO 590 I=2,NLS
        DO 590 J=1,NCS+I-2
          590   BIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+KAPA(I-1,J))* .5/DELTAZ**2
        DO 591 I=2,NLS
          ABH=ABS((1-(CANG*DELTAZ)/DELTAZ)*HI(I,NCS+I-1)+
          $ (CANG*DELTAZ/DELTAZ)*HI(I,NCS+I-2)-DELTAZ)
          CKAP=CKS*EXP(GAMA*(((TETAS-TETAR)/(1+(ALFA*ABH)
          * **BETA)**BETA11)+TETAR)-(TETAS)))
          WRITE(*,*)CKAP
          591   BIJ(I,NCS+I-1)=(KAPA(I,NCS+I-1)+CKAP)* .5/DELTAZ**2
          I=NLS
        DO 592 J=NTC-NCFS+1,NTC
          ABH=ABS(HI(NLS+1,J)-2*DELTAZ)
          CKAP=CKS*EXP(GAMA*(((TETAS-TETAR)/(1+(ALFA*ABH)
          * **BETA)**BETA11)+TETAR)-(TETAS)))
          592   BIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+CKAP)* .5/DELTAZ**2
          DO 595 I=NLS+1,NTL
            DO 595 J=1,NTC
              595   BIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+KAPA(I-1,J))* .5/DELTAZ**2
            DO 600 J=1,NCS
              ABH=ABS(HI(2,J)-2*DELTAZ)
              CKAP=CKS*EXP(GAMA*(((TETAS-TETAR)/(1+(ALFA*ABH)
              * **BETA)**BETA11)+TETAR)-(TETAS)))
              600   BIJ(1,J)=(KAPA(1,J)+CKAP)* .5/DELTAZ**2
C
C CÁLCULO DOS Eij
C
      DO 605 I=1,NLS-1
        DO 605 J=1,NCS+I-1
          605   EIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+KAPA(I+1,J))* .5/DELTAZ**2
        DO 610 I=NLS,NTL-1
          DO 610 J=1,NTC
            610   EIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+KAPA(I+1,J))* .5/DELTAZ**2
          DO 615 J=1,NTC
            ABH=ABS(HI(NTL+1,J))
            CKAP=CKS*EXP(GAMA*(((TETAS-TETAR)/(1+(ALFA*ABH)
            * **BETA)**BETA11)+TETAR)-(TETAS)))
            615   EIJ(NTL,J)=(KAPA(NTL,J)+CKAP)* .5/DELTAZ**2
C
C CÁLCULO DOS Fij
C
      DO 620 I=1,NLS-1
        DO 620 J=1,NCS+I-2
          620   FIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+KAPA(I,J+1))* .5/DELTAZ**2
        DO 625 I=NLS,NTL
          DO 625 J=1,NTC-1
            625   FIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+KAPA(I,J+1))* .5/DELTAZ**2
          FIJ(1,NCS)=(KAPA(1,NCS)+KAPA(1,NCS-1))* .5/DELTAZ**2
          DO 630 I=2,NLS-1
            ABH=ABS(DELTAZ/(DELTAZ*CANG)*HI(I+1,NCS+I-1)+(1-
            $ DELTAZ/(CANG*DELTAZ))*HI(I,NCS+I-1)-DELTAZ/CANG)
            CKAP=CKS*EXP(GAMA*(((TETAS-TETAR)/(1+(ALFA*ABH)
            * **BETA)**BETA11)+TETAR)-(TETAS)))
            630   FIJ(I,NCS+I-1)=(KAPA(I,NCS+I-1)+CKAP)* .5/DELTAZ**2
          DO 635 I=NLS,NTL

```

```

635      FII(I,NTC)=(KAPA(I,NTC)+KAPA(I,NTC-1))*0.5/DELTA**2
C

```

```

C CÁLCULO DOS Dij e Gij
C

```

```

DO 640 I=1,NLS-1
      DO 640 J=1,NCS+I-1
        DIJ(I,J)=-C(I,J)/DELTAT1-AIJ(I,J)-BIJ(I,J)-
$      EIJ(I,J)-FII(I,J)
640      GIJ(I,J)=-C(I,J)/DELTAT1*HI(I,J)-DELTAZ*BIJ(I,J)+
$      DELTAZ*EIJ(I,J)
DO 645 I=NLS,NTL
      DO 645 J=1,NTC
        DIJ(I,J)=-C(I,J)/DELTAT1-AIJ(I,J)-BIJ(I,J)-
$      EIJ(I,J)-FII(I,J)
645      GIJ(I,J)=-C(I,J)/DELTAT1*HI(I,J)-DELTAZ*BIJ(I,J)+
$      DELTAZ*EIJ(I,J)

```

```

WRITE(8888,1650)
1650      FORMAT(1X,' INSTANTE INICIAL T=0 ',/)

      WRITE(8888,1660)
1660      FORMAT(1X,' matriz dos coeficientes AIj(i,j) ',/)
DO 655 I=1,NLS-1
655      WRITE(8888,1665) (aij(I,J),J=1,NCS+I-1)
DO 660 I=NLS,NTL+(NVEZES*INCR+2)
660      WRITE(8888,1665) (aij(I,J),J=1,NTC)

      WRITE(8888,665)
665      FORMAT(1X,' matriz dos coeficientes BIj(i,j) ',/)
DO 670 I=1,NLS-1
670      WRITE(8888,1665) (bij(I,J),J=1,NCS+I-1)
DO 675 I=NLS,NTL+(NVEZES*INCR+2)
675      WRITE(8888,1665) (bij(I,J),J=1,NTC)

      WRITE(8888,680)
680      FORMAT(1X,' matriz dos coeficientes EIj(i,j) ',/)
DO 685 I=1,NLS-1
685      WRITE(8888,1665) (Eij(I,J),J=1,NCS+I-1)
DO 690 I=NLS,NTL+(NVEZES*INCR+2)
690      WRITE(8888,1665) (Eij(I,J),J=1,NTC)

      WRITE(8888,695)
695      FORMAT(1X,' matriz dos coeficientes FIj(i,j) ',/)
DO 700 I=1,NLS-1
700      WRITE(8888,1665) (Fij(I,J),J=1,NCS+I-1)
DO 705 I=NLS,NTL+(NVEZES*INCR+2)
705      WRITE(8888,1665) (Fij(I,J),J=1,NTC)

      WRITE(8888,710)
710      FORMAT(1X,' matriz dos coeficientes GIj(i,j) ',/)
DO 715 I=1,NLS-1
715      WRITE(8888,1665) (Gij(I,J),J=1,NCS+I-1)
DO 720 I=NLS,NTL+(NVEZES*INCR+2)
720      WRITE(8888,1665) (Gij(I,J),J=1,NTC)

      WRITE(8888,725)
725      FORMAT(1X,' matriz dos coeficientes DIj(i,j) ',/)
DO 730 I=1,NLS-1
730      WRITE(8888,1665) (Dij(I,J),J=1,NCS+I-1)
DO 735 I=NLS,NTL+(NVEZES*INCR+2)
735      WRITE(8888,1665) (Dij(I,J),J=1,NTC)

1665      FORMAT(3X,40E10.3//)

      return
      end

```

SUB-ROTINA WATERLEVEL

```

***

```

```

C
C      SUBROTINA PARA CALCULO DA EVOLUCAO DA ALTURA DE AGUA DURANTE A
C      FASE DE ALIMENTACAO EM FUNCAO DO TEMPO EM SULCOS CURTOS

```

```

C      L = COMP. DA TRINCHEIRA (m);      Q = VAZAO (m3/s);      B1 = LARGURA MAX. DA
TRINCHEIRA(m)
C      H1 = ALTURA MAX. DA TRINCHEIRA(m); DT = INCREMENTO DE TEMPO (s)
C
!*****
***

SUBROUTINE WaterLevel(T,Q,LCOMP,LAG,S,NCFS,DELTAX,VOL1,TH,LCICL,
*HTEMPALI)

REAL LAG
6      FORMAT(1X,'Q=',F12.4,2X,'L=',I5,2X,'B1=',F8.2)

! VOLSP=Q*T      !Melissa on 9.Apr.2005
! IF(VOLSP.GE.VOL1) THEN !Melissa on 9.Apr.2005
      AREA=(Q*T-VOL1)/LCOMP
      HD=2*(NCFS-1)*DELTAX
      HR=(HD**2+4*S*AREA)**.5
      LAG=(-HD+HR)/(2*S)
! ELSE      !Melissa on 9.Apr.2005
!   LAG=0      !Melissa on 9.Apr.2005
! ENDIF      !Melissa on 9.Apr.2005

IF(LAG.GE.HTEMPALI) LCICL=2
TH=T/60
WRITE(7,30) LAG,TH
30      FORMAT(1X,'ALTURA DAGUA = ',F7.4,2X,'(cm)',3X,'TEMPO =
      *',F12.3,1X,'(min)')

RETURN
END

```

SUB-ROTINA ASSEMBLEMATF1

```

! Construction of the incidence matrix for Fase 1, using the coefficients
! that was calculated on incidFase1.
!
! The output of this subroutine is the incidence matrix HM(i,j).

Subroutine assembleMatF1 (AIJ, BIJ, EIJ, FIJ, DIJ, GIJ, NTL, NCFS,
*      NTC, NLSCA, LAG, NLS, NPN2, DELTAX,
*      NPN1, CANG, DELTAZ, NCS, NLSSA,
*      HI, HM, T)

REAL LAG

Dimension AIJ(200,200), BIJ(200,200), DIJ(200,200), EIJ(200,200),
*      FIJ(200,200), GIJ(200,200), HI(200,200), HM(2000,2000)

L=0

DO 700 I=1,NLSSA+1

      DO 700 J=1,NCS+I-1

        L=L+1
        IF(I.NE.1) THEN
          IF(J.EQ.NCS+I-1) THEN

            HM(L,L-1)=AIJ(I,J)+BIJ(I,J)*DELTAX*CANG/DELTAX

            HM(L,L)=DIJ(I,J)+(1-CANG*DELTAX/DELTAX)
            *BIJ(I,J)+(1-DELTAX/(CANG*DELTAX))*FIJ(I,J)

            HM(L,L+NCS+I-1)=EIJ(I,J)+FIJ(I,J)*DELTAX/
            (DELTAX*CANG)

            HM(L,NPN2)=GIJ(I,J)+(DELTAX/CANG)*FIJ(I,J)
            +DELTAX*BIJ(I,J)

          ELSE
            IF(J.NE.1)THEN
              HM(L,L-(NCS+I-2))=BIJ(I,J)
              HM(L,L-1)=AIJ(I,J)
              HM(L,L)=DIJ(I,J)
              HM(L,L+1)=FIJ(I,J)
              HM(L,L+NCS+I-1)=EIJ(I,J)
              HM(L,NPN2)=GIJ(I,J)
            ELSE

```



```

                                HM(L,L-(NCS+I-2))=BIJ(I,J)
HM(L,L)=DIJ(I,J)
HM(L,L+1)=AIJ(I,J)+FIJ(I,J)
HM(L,L+NCS+I-1)=EIJ(I,J)
HM(L,NPN2)=GIJ(I,J)
                                ENDIF
ELSE
    IF(J.EQ.NCS) THEN
        HM(L,L-1)=AIJ(I,J)+FIJ(I,J)
        HM(L,L)=DIJ(I,J)

        HM(L,L+NCS)=BIJ(I,J)+EIJ(I,J)
        HM(L,NPN2)=GIJ(I,J)+2*DELTAZ*BIJ(I,J)
    ELSE
        IF(J.NE.1) THEN
            HM(L,L-1)=AIJ(I,J)
            HM(L,L)=DIJ(I,J)
            HM(L,L+1)=FIJ(I,J)
            HM(L,L+NCS)=BIJ(I,J)+EIJ(I,J)
            HM(L,NPN2)=GIJ(I,J)+2*DELTAZ*BIJ(I,J)
        ELSE
            HM(L,L)=DIJ(I,J)
            HM(L,L+1)=AIJ(I,J)+FIJ(I,J)
            HM(L,L+NCS)=BIJ(I,J)+EIJ(I,J)
            HM(L,NPN2)=GIJ(I,J)+2*DELTAZ*BIJ(I,J)
        ENDIF
    ENDIF
ENDIF
700    CONTINUE
L1=L
I=NLSSA+2
DO 710 J=1,NCS+I-2
    L1=L1+1
    IF(J.EQ.NCS+I-2) THEN
        HM(L1,L1-(NCS+I-2))=BIJ(I,J)
        HM(L1,L1-1)=AIJ(I,J)
        HM(L1,L1)=DIJ(I,J)
        HM(L1,L1+NCS+I-2)=EIJ(I,J)
        LPR=(NLS-1)*DELTAZ
        H0=(I-1)*DELTAZ-(LPR-LAG)
        HM(L1,NPN2)=GIJ(I,J)-H0*FIJ(I,J)
    ELSE
        IF(J.NE.1) THEN
            HM(L1,L1-(NCS+I-2))=BIJ(I,J)
            HM(L1,L1-1)=AIJ(I,J)
            HM(L1,L1)=DIJ(I,J)
            HM(L1,L1+1)=FIJ(I,J)
            HM(L1,L1+NCS+I-2)=EIJ(I,J)
            HM(L1,NPN2)=GIJ(I,J)
        ELSE
            HM(L1,L1-(NCS+I-2))=BIJ(I,J)
            HM(L1,L1)=DIJ(I,J)
            HM(L1,L1+1)=FIJ(I,J)+AIJ(I,J)
            HM(L1,L1+NCS+I-2)=EIJ(I,J)
            HM(L1,NPN2)=GIJ(I,J)
        ENDIF
    ENDIF
710    CONTINUE

IF(NLSCA.EQ.0) GOTO 1008
IF(NLSCA.EQ.1) GOTO 712
L0=L1
DO 711 I=NLSSA+3,NLS-1
    DO 711 J=1,NCS+I-2
        L0=L0+1
        IF(J.EQ.NCS+I-2) THEN
            HM(L0,L0)=DIJ(I,J)

            HM(L0,L0-1)=AIJ(I,J)

            HM(L0,L0+NCS+I-2)=EIJ(I,J)

            H01=((NLSSA+2)*DELTAZ-(LPR-LAG))+(I-NLSSA+3)*
            DELTAZ

            HM(L0,NPN2)=GIJ(I,J)-H01*FIJ(I,J)-(H01-DELTAZ)*

```

2


```

                                HM(L3,L3+1)=AIJ(I,J)+FIJ(I,J)
                                HM(L3,L3+NTC)=EIJ(I,J)
                                HM(L3,NPN2)=GIJ(I,J)
                                ENDIF
                                ENDIF
                                ENDIF
730      CONTINUE
      L4=L3
      DO 740 I=NLS+2,NTL-1
        DO 740 J=1,NTC
          L4=L4+1
          IF(J.EQ.NTC)THEN
            HM(L4,L4-1)=AIJ(I,J)+FIJ(I,J)
            HM(L4,L4)=DIJ(I,J)
            HM(L4,L4+NTC)=EIJ(I,J)
            HM(L4,L4-NTC)=BIJ(I,J)
            HM(L4,NPN2)=GIJ(I,J)
          ELSE
            IF(J.NE.1) THEN
              HM(L4,L4-1)=AIJ(I,J)
              HM(L4,L4)=DIJ(I,J)
              HM(L4,L4+1)=FIJ(I,J)
              HM(L4,L4-NTC)=BIJ(I,J)
              HM(L4,L4+NTC)=EIJ(I,J)
              HM(L4,NPN2)=GIJ(I,J)
            ELSE
              HM(L4,L4-NTC)=BIJ(I,J)
              HM(L4,L4)=DIJ(I,J)
              HM(L4,L4+1)=AIJ(I,J)+FIJ(I,J)
              HM(L4,L4+NTC)=EIJ(I,J)
              HM(L4,NPN2)=GIJ(I,J)
            ENDIF
          ENDIF
        ENDIF
      CONTINUE
740      L5=L4
      I=NTL
      DO 750 J=1,NTC
        L5=L5+1
        IF(J.EQ.NTC) THEN
          HM(L5,L5-NTC)=BIJ(I,J)
          HM(L5,L5-1)=AIJ(I,J)+FIJ(I,J)
          HM(L5,L5)=DIJ(I,J)
          HM(L5,NPN2)=GIJ(I,J)-HI(I+1,J)*EIJ(I,J)
        ELSE
          IF(J.NE.1) THEN
            HM(L5,L5-NTC)=BIJ(I,J)
            HM(L5,L5-1)=AIJ(I,J)
            HM(L5,L5)=DIJ(I,J)
            HM(L5,L5+1)=FIJ(I,J)
            HM(L5,NPN2)=GIJ(I,J)-HI(I+1,J)*EIJ(I,J)
          ELSE
            HM(L5,L5-NTC)=BIJ(I,J)
            HM(L5,L5)=DIJ(I,J)
            HM(L5,L5+1)=AIJ(I,J)+FIJ(I,J)
            HM(L5,NPN2)=GIJ(I,J)-HI(I+1,J)*EIJ(I,J)
          ENDIF
        ENDIF
      CONTINUE
750      WRITE(*,760) L5
760      FORMAT(/,1X,'O NUMERO TOTAL DE LINHAS E =',2X,I5)
      WRITE(4444,800) T/60
800      FORMAT(1X,/' matriz de incidência HM(i,j), com inclusão dos
      * termos dependentes Gij(i,j) na última coluna, no instante T=
      * ',F5.1,2X,'min'/)
      DO 820 I=1,NPN1
820      WRITE(4444,1800) (HM(I,J),J=1,NPN2)
1800      FORMAT(1X,150F18.12//)
      return
      end

```

SUB-ROTINA ASSEMBLEVECTF1

! Construction of the vector with the initial values of
! the matric potentials for each node (i,j) for Fase 1
!
! The output of this subroutine is the vector H1(i).

Subroutine assembleVectF1 (NTL, NCFS, NTC, NLS, NCS, NLSSA,
* NPN1, ICONTEMPO, H, HI, H1, T)

```

Dimension H(200,200), HI(200,200), H1(2000)

      IF(ICONTEMPO.EQ.1) T=0
      LI=0
      DO 770 I=1,NLSSA+1
        DO 770 J=1,NCS+I-1
          LI=LI+1
          IF(T.GT.0) THEN
            H1(LI)=H(I,J)
          ELSE
            H1(LI)=HI(I,J)
          ENDIF
770      CONTINUE
      LI1=LI
      DO 771 I=NLSSA+2,NLS-1
        DO 771 J=1,NCS+I-2
          LI1=LI1+1
          IF(T.GT.0) THEN
            H1(LI1)=H(I,J)
          ELSE
            H1(LI1)=HI(I,J)
          ENDIF
771      CONTINUE
      LI2=LI1
      I=NLS
      DO 772 J=1,NTC-NCFS
        LI2=LI2+1
        IF(T.GT.0) THEN
          H1(LI2)=H(I,J)
        ELSE
          H1(LI2)=HI(I,J)
        ENDIF
772      CONTINUE
      LI3=LI2
      DO 780 I=NLS+1,NTL
        DO 780 J=1,NTC
          LI3=LI3+1
          IF(T.GT.0) THEN
            H1(LI3)=H(I,J)
          ELSE
            H1(LI3)=HI(I,J)
          ENDIF
780      CONTINUE

      WRITE(3333,900) T/60
900      FORMAT(1X,/'Vetor com os valores das incógnitas H1(i)
      *      no instante T= ',F5.1,2X,'min'/)
      DO 920 I=1,NPN1
920      WRITE(3333,1900) H1(I)
1900      FORMAT(1X,150F10.5//)

      return
      end

```

SUB-ROTINA GSEIDEL

! Gauss Seidel for Fases 1, 2 and 3.

! Routine for solution of the linear system consisting of the Richard's equation
! for calculate the water volume infiltrated in a infiltration trench.

! The incidence matrix HM(NPN1,NPN2) is assembled on assembleMatF1. It's coefficients
! are calculated on incidFase1.

! The vector containing the independent terms H1(NPN1) is assembled on assembleVectF1

! The Fase1 (one) means the advance and supply fases, occurring when water is
! applied into the trench.

! The Fase 2 (two) means the recession fase, occurring when water infiltrates after
! cut-off.

! The Fase 3 (three) means the redistribution fase, occurring when water moves in the
! soil after infiltration ended.

! The maximum number of iterations is given by NMITER. The maximum value of the Gauss
! Seidel residual is represented by ERADM.

! The output of this subroutine is the vector H1(i).

```

Subroutine gSeidel(H1, HM, NPN1, NPN2, NPN3, NPN4, NTC, KIT,
*      NumberOfInt)
  Dimension HM(2000,2000),H1(2000)
768      NMITER=1
  ERADM=0.003
! NORMALIZACAO DE ELEMENTOS DA DIAGONAL DE CADA FILA
  NumberOfInt = NumberOfInt + 1
  DO 870 I=1,NPN1
    TDIAG=HM(I,I)
    IF (TDIAG.EQ.0) THEN
      TDIAG = 0.000000000001
    ENDIF
    DO 880 J=1,NPN2
880      HM(I,J)=HM(I,J)/TDIAG
    870    CONTINUE
C INICIO DAS INTERACOES
  KIT=0
  111    DO 890 ITER=1,NMITER
    FLAG=1
    DO 900 I=1,NPN3
      VALINH=H1(I)
      H1(I)=HM(I,NPN2)
C PESQUISA DA SOLUCAO DA PRIMEIRA PARTE
      DO 910 J=1,I+NTC
        IF(I.EQ.J) GOTO 910
        H1(I)=H1(I)-HM(I,J)*H1(J)
      910    CONTINUE
C      TESTE DE CONVERGENCIA DA PRIMEIRA PARTE
      IF(ABS(VALINH-H1(I)).LE.ERADM) GOTO 900
      FLAG=0
    900    CONTINUE
    DO 901 I=NPN3+1,NPN4
      VALINH=H1(I)
      H1(I)=HM(I,NPN2)
C      PESQUISA DA SOLUCAO DA SEGUNDA PARTE
      DO 911 J=I-NTC,I+NTC
        IF(I.EQ.J) GOTO 911
        H1(I)=H1(I)-HM(I,J)*H1(J)
      911    CONTINUE
C      TESTE DE CONVERGENCIA DA SEGUNDA PARTE
      IF(ABS(VALINH-H1(I)).LE.ERADM) GOTO 901
      FLAG=0
    901    CONTINUE
    DO 902 I=NPN4+1,NPN1
      VALINH=H1(I)
      H1(I)=HM(I,NPN2)
C      PESQUISA DA SOLUCAO DA TERCEIRA PARTE
      DO 912 J=I-NTC,NPN1
        IF(I.EQ.J) GOTO 912
        H1(I)=H1(I)-HM(I,J)*H1(J)
      912    CONTINUE
C      TESTE DE CONVERGENCIA DA TERCEIRA PARTE
      IF(ABS(VALINH-H1(I)).LE.ERADM) GOTO 902
      FLAG=0

```

```

902          CONTINUE
          IF(FLAG.EQ.1) GOTO 112
890          CONTINUE
          KIT=KIT+1
          !If FLAG is equal to 0 the process will be done again
          IF(FLAG.NE.1) GOTO 111
112          return
          end

```

SUB-ROTINA SOILMOISTCONF1

G Calculates the soil moisture content of the domain, during the Fase 1,
 G using the values of the matric potencial, for each node, that was
 G calculated on the subroutine gSeidel. The expression used to do that
 G is the Van Genuchten's equation.

```

Subroutine SoilMoistConf1(TETA, KAPA, C, H, TETAS, GAMA, NCS,
*      NLSSA, BETA11, BETA, NTL, ALFA, TETAR,
*      NCFs, NTC, CKS, NLS, H1, INCR, NVEZES,
*      T)

```

```

Real KAPA(200,200)

```

```

Dimension TETA(200,200), C(200,200), H(200,200), H1(2000)

```

```

      LO1=0
      DO 501 I=1,NLSSA+1
        DO 501 J=1,NCS+I-1
          LO1=LO1+1
          H(I,J)=H1(LO1)

```

```

!   If the matric potencial H has a positive value, the program
!   considers that the soil moisture is equal to the saturation
!   moisture, and the hydraulic conductivity is maximum. Else, it
!   calculates the soil moisture and the hydraulic conductivity

```

```

          IF(H1(LO1).GE.0) THEN
            TETA(I,J)=TETAS
            C(I,J)=0
            KAPA(I,J)=CKS
          ELSE
            ABH=ABS(H(I,J))
            TETA(I,J)=(TETAS-TETAR)/((1+(ALFA*ABH)**BETA)**
$      BETA11)+TETAR
            KAPA(I,J)=CKS*EXP(GAMA*(TETA(I,J)-(TETAS)))
$      C(I,J)=ALFA*(TETAS-TETAR)*BETA*BETA11*(1+(ALFA*
$      ABH)**BETA)
$      ABH)**BETA)**
$      BETA11)**2)
          ENDIF
501      CONTINUE
      LO2=LO1
      DO 502 I=NLSSA+2,NLS-1
        DO 502 J=1,NCS+I-2
          LO2=LO2+1
          H(I,J)=H1(LO2)
          IF(H1(LO2).GE.0) THEN
            TETA(I,J)=TETAS
            C(I,J)=0
            KAPA(I,J)=CKS
          ELSE
            ABH=ABS(H(I,J))
            TETA(I,J)=(TETAS-TETAR)/((1+(ALFA*ABH)**BETA)
$      **BETA11)+TETAR
            KAPA(I,J)=CKS*EXP(GAMA*(TETA(I,J)-(TETAS)))
$      C(I,J)=ALFA*(TETAS-TETAR)*BETA*BETA11*(1+(ALFA*
$      ABH)**BETA)
$      ABH)**BETA)**
$      BETA11)**2)
          ENDIF
502      CONTINUE

```



```

LO3=LO2
I=NLS
DO 503 J=1,NTC-NCFS
    LO3=LO3+1
    H(I,J)=H1(LO3)
    IF(H1(LO3).GE.0)THEN
        TETA(I,J)=TETAS
        C(I,J)=0
        KAPA(I,J)=CKS
    ELSE
        ABH=ABS(H(I,J))
        TETA(I,J)=(TETAS-TETAR)/((1+(ALFA*ABH)**BETA)
        **BETA11)+TETAR
        C(I,J)=ALFA*(TETAS-TETAR)*BETA*BETA11*(1+(ALFA*
        ABH)**BETA)
        **BETA11-1)*(ALFA*ABH)**(BETA-1)/(((1+(ALFA*
        ABH)**BETA)**
        BETA11)**2)
        KAPA(I,J)=CKS*EXP(GAMA*(TETA(I,J)-(TETAS)))
    ENDIF
503    CONTINUE
    LO4=LO3
    DO 504 I=NLS+1,NTL
        DO 504 J=1,NTC
            LO4=LO4+1
            H(I,J)=H1(LO4)
            IF(H1(LO4).GE.0)THEN
                TETA(I,J)=TETAS
                C(I,J)=0
                KAPA(I,J)=CKS
            ELSE
                ABH=ABS(H(I,J))
                TETA(I,J)=(TETAS-TETAR)/((1+(ALFA*ABH)**BETA)
                **BETA11)+TETAR
                C(I,J)=ALFA*(TETAS-TETAR)*BETA*BETA11*(1+(ALFA*
                ABH)**BETA)
                **BETA11-1)*(ALFA*ABH)**(BETA-1)/(((1+(ALFA*
                ABH)**BETA)**
                BETA11)**2)
                KAPA(I,J)=CKS*EXP(GAMA*(TETA(I,J)-(TETAS)))
            ENDIF
504    CONTINUE

WRITE(2222,1580) T/60
1580    FORMAT(1X,/' Perfil de umidade no instante t= ',F5.1,2X,'min'/)
DO 1560 I=1,NLS-1
1560    WRITE(2222,2070) (TETA(I,J),J=1,NCS+I-1)
DO 1570 I=NLS,NTL+(NVEZES*INCR+2)
1570    WRITE(2222,2070) (TETA(I,J),J=1,NTC)
2070    FORMAT(3X,40F10.7)

WRITE(1111,1582) T/60
1582    FORMAT(1X,/' Potencial matrico no instante t= ',F5.1,2X,'min'/)
DO 1562 I=1,NLS-1
1562    WRITE(1111,2072) (H(I,J),J=1,NCS+I-1)
DO 1572 I=NLS,NTL+(NVEZES*INCR+2)
1572    WRITE(1111,2072) (H(I,J),J=1,NTC)
2072    FORMAT(3X,40F10.7)

WRITE(7777,1584) T/60
1584    FORMAT(1X,/' Condutividade hidraulica em t= ',F5.1,2X,'min'/)
DO 1564 I=1,NLS-1
1564    WRITE(7777,2074) (KAPA(I,J),J=1,NCS+I-1)
DO 1574 I=NLS,NTL+(NVEZES*INCR+2)
1574    WRITE(7777,2074) (KAPA(I,J),J=1,NTC)
2074    FORMAT(3X,40F10.7)

WRITE(6666,1586) T/60
1586    FORMAT(1X,/' Valores dos coeficientes C em t= ',F5.1,2X,'min'/)
DO 1566 I=1,NLS-1
1566    WRITE(6666,2076) (C(I,J),J=1,NCS+I-1)
DO 1576 I=NLS,NTL+(NVEZES*INCR+2)
1576    WRITE(6666,2076) (C(I,J),J=1,NTC)
2076    FORMAT(3X,40F10.7)

return
end

```

SUB-ROTINA WATERVOLUMEF1

! INSERIR COMENTÁRIO

```
Subroutine WaterVolumeF1(NLSSA, TACRE, HTEMPALI, LAG, NTL, LCOMP,
*          DELTAZ, DELTAX, T, NCFS, TETAS, NLS, NCS,
*          NTC, X, Y, NOMEF1, NUMERO, TETAI, H, HI,
*          ML, TEMPO, TETA, VOL1, NTC1, DIF, VOL)
```

common /bisimul/ il, im

REAL LAG

```
Dimension TETA(200,200), X(200), Y(200), TETAI(200,200),
*          H(200,200), HI(200,200)
```

CHARACTER NOMEF1*13, NUMERO(400)*3

DIF=ABS(HI(NTL-2,NTC))-ABS(H(NTL-2,NTC))

```
IF(LAG.GE.HTEMPALI) THEN
  WRITE(il,1067) LAG
```

```
  WRITE(im,1067) LAG
```

```
1067      FORMAT(1X,'VALOR MAXIMO DE LAG=',F8.4)
```

ENDIF

```
IF(LAG.GE.HTEMPALI) GOTO 1062
```

```
5519      IF(T.EQ.TEMPO) THEN
```

```
      TEMPO=TEMPO+TACRE
```

```
1062      WRITE(il,1061) T
```

```
1061      FORMAT(1X,'TEOR DE UMIDADE',/,10X,'TEMPO=',F7.0,8X,
$          'SEGUNDOS',/)
```

```
      IF (NLSSA.LT.0) NLSSA=0 ! Melissa on 6.4.05
```

```
DO 505 I=1,NLSSA+1
```

```
  DO 505 J=NCS+I,NTC
```

```
505      TETA(I,J)=.92
```

```
DO 506 I=1,NLSSA+1
```

```
506      WRITE(il,1072)(TETA(I,J),J=1,NTC)
```

```
DO 508 I=NLSSA+2,NLS
```

```
  DO 508 J=NCS+I,NTC
```

```
508      TETA(I,J)=0.92
```

```
DO 509 I=NLSSA+2,NLS
```

```
509      TETA(I,NCS+I-1)=TETAS
```

```
I=NLS
```

```
DO 546 J=NTC-NCFS+2,NTC
```

```
546      TETA(I,J)=TETAS
```

```
DO 545 I=NLSSA+2,NLS
```

```
545      WRITE(il,1072)(TETA(I,J),J=1,NTC)
```

```
DO 6515 I=NLS+1,NTL
```

```
6515      WRITE(il,1072)(TETA(I,J),J=1,NTC)
```

```
1072      FORMAT(1X,40F6.5)
```

```
VOL=0
```

```
VMALH=DELTAX*DELTAZ*LCOMP
```

```
DO 1 I=1,NLS-1
```

```
  DO 1 J=1,(NCS+I-2)
```

```
    TETAM=TETA(I,J)-TETAI(I,J)+TETA(I+1,J)-
```

```
$      TETAI(I+1,J)+
```

```
$      TETA(I,J+1)-TETAI(I,J+1)+TETA(I+1,J+1)-
```

```
$      TETAI(I+1,J+1)
```

```
    TEORM=TETAM/4
```

```
1      VOL=VOL+TEORM*VMALH
```

```
DO 2 I=1,NLS-1
```

```
  J=NCS+I-1
```

```
  TETAM=TETA(I,J)-TETAI(I,J)+TETA(I+1,J)-TETAI(I+1,J)+
```

```
$      TETA(I+1,J+1)-TETAI(I+1,J+1)
```

```
  TEORM=TETAM/3
```

```
2      VOL=VOL+TEORM*VMALH/2
```

```
DO 3 I=NLS,NTL-1
```

```
  DO 3 J=1,NTC-1
```

```
    TETAM=TETA(I,J)-TETAI(I,J)+TETA(I+1,J)-
```

```
$      TETAI(I+1,J)+
```

```
$      TETA(I,J+1)-TETAI(I,J+1)+TETA(I+1,J+1)-
```

```
$      TETAI(I+1,J+1)
```

```
    TEORM=TETAM/4
```

```
3      VOL=VOL+TEORM*VMALH
```

```

VOL1=2*VOL
WRITE(il,1472) VOL1
WRITE(im,1472) VOL1
1472   FORMAT(1X,'FASE DE ALIM.VOL. INF=',F12.3,2X,'(cm3)')
DO 4444 I=1,NTL
      DO 4444 J=1,NTC-1
          N1=2*NTC-J
4444   TETA(I,N1)=TETA(I,J)
      ML=ML+1
      NOMEFI='MATRIZ'//NUMERO(ML)//'. DAT'
      OPEN(1,FILE=NOMEFI,STATUS='new')
      NTC1=2*NTC-1
      DO 5055 I=1,NTC1
          X(I)=I
5055   DO 5060 J=1,NTL
          Y(J)=J
5060   WRITE(1,*) (X(I),I=1,NTC1)
          WRITE(1,*) (Y(J),J=1,NTL)
          DO 5050 J=1,NTC1
5050   WRITE(1,*) (TETA(I,J),I=1,NTL)
      CLOSE (1)
ENDIF
IF(LAG.GE.HTEMPALI.OR.T.EQ.TEMPO) GOTO 1099
DO 9509 I=NLSA+2,NLS
9509   TETA(I,NCS+I-1)=TETAS
      I=NLS
      DO 9559 J=NTC-NCFS+2,NTC
9559   TETA(I,J)=TETAS
      VOL=0
      VMALH=DELTAX*DELTAZ*LCOMP
      DO 9 I=1,NLS-1
          DO 9 J=1,(NCS+I-2)
              TETAM=TETA(I,J)-TETAI(I,J)+TETA(I+1,J)-TETAI
              $ (I+1,J)+TETA(I,J+1)-TETAI(I,J+1)+TETA(I+1,J+1)
              $ -TETAI(I+1,J+1)
              TEORM=TETAM/4
9          VOL=VOL+TEORM*VMALH
      DO 10 I=1,NLS-1
          J=NCS+I-1
          TETAM=TETA(I,J)-TETAI(I,J)+TETA(I+1,J)-TETAI(I+1,J)+
          $ TETA(I+1,J+1)-TETAI(I+1,J+1)
          TEORM=TETAM/3
10       VOL=VOL+TEORM*VMALH/2
          DO 11 I=NLS,NTL-1
              DO 11 J=1,NTC-1
                  TETAM=TETA(I,J)-TETAI(I,J)+TETA(I+1,J)-TETAI
                  $ (I+1,J)+TETA(I,J+1)-TETAI(I,J+1)+TETA(I+1,J+1)
                  $ -TETAI(I+1,J+1)
                  TEORM=TETAM/4
11       VOL=VOL+TEORM*VMALH
      VOL1=2*VOL
      IF(VOL1.GT..0)THEN
          WRITE(im,1073) VOL1,T
1073   FORMAT(/,1X,'F. ALIM.VOL INF=',F10.3,2X,'(cm3)',1X,
          $ 'TEMPO='F10.3)
      ENDIF
1099 return
end

```

SUB-ROTINA INCRINESF1

G Increasing the number of lines of the domain, using the variables
 G ACTIV, NVEZES and INCR, for Fase 1.
 G The variable ACTIV sets the difference of matric potential, at the
 G last line, that is necessary to activate the profile
 G The variable NVEZES sets the number of times that the profile will
 G be activated
 G The variable INCR sets the number of lines increased each time

```

Subroutine IncrLinesF1 (HM, NCS, NLS, NCFS, NLSCA, NLSSA, GAMA,
*      CKS, BETA11, BETA, ALFA, TETAR, TETAS, C,
*      NTC, INCR, ACTIV, H, HI, TETA, KAPA, DIF,
*      NTL, NPN1, NPN2, NPN3, NPN4)

```

```

Real KAPA(200,200)

```

```

Dimension HM(2000,2000), H(200,200), HI(200,200), TETA(200,200),
*      C(200,200)

```



```

1099      IF(ABS(DIF).GE.ACTIV) THEN
          DO 9119 I=NTL+1,(NTL+INCR+2)
              DO 9119 J=1,NTC
                  H(I,J)=HI(I,J)
                  ABH=ABS(H(I,J))
                  TETA(I,J)=(TETAS-TETAR)/((1+(ALFA*ABH)**BETA)
                      **BETA11)+TETAR
                  C(I,J)=ALFA*(TETAS-TETAR)*BETA*BETA11*(1+
                      (ALFA*ABH)**BETA)
                      **((BETA11-1)*(ALFA*ABH)**(BETA-1))/((1+
                      (ALFA*ABH)**BETA)**
                      BETA11)**2)
                  KAPA(I,J)=CKS*EXP(GAMA*(TETA(I,J)-(TETAS)))

          DO 75455 I=1,NPN3
              DO 75455 J=1,I+NTC
                  HM(I,J)=0
          75455      DO 75466 I=NPN3+1,NPN4
              DO 75466 J=I-NTC,I+NTC
                  HM(I,J)=0
          75466      DO 75477 I=NPN4+1,NPN1
              DO 75477 J=I-NTC,NPN1
                  HM(I,J)=0
          75477      DO 75488 I=1,NPN1
              HM(I,NPN2)=0
          75488      NTL=NTL+INCR
                  LL=0
                  DO 888 I=1,NLSSA
                      LL=LL+I
          888          LL1=0
                  DO 889 I=1,NLSCA
                      LL1=LL1+I-1
          889          LL2=NTC-NCFS
                  LL3=NTC*(NTL-NLS)
                  NPN1=NCS+NLSSA*NCS+LL+NLSCA*(NCS+NLSSA)+LL1+LL2+LL3
                  NPN2=NPN1+1
                  NPN3=NPN1-LL3
                  NPN4=NPN1-NTC
C      WRITE(*,2224) NPN1,NPN2,NPN3,NPN4
C2224 FORMAT(/,5X,'NPN1=',I4,3X,'NPN2=',I4,3X,'NPN3=',I4,3X,'NPN4=',I4)
          ENDIF

      Return
      End

```

SUB-ROTINA INCIDFASE1

```

!   Determining the coefficients of the Incidence Matrix,
!   Aij, Bij, Dij, Eij, Fij and Gij, for the Fase 1, according to the
!   equation 4 of Tabuada et. al (1995), that is the discretization of
!   two-dimensional Richards' Equation.
!
!   The Fase 1 (one) means the advance and supply fases, occurring when
!   water is supplied into the trench.
!
!   Input variables: NLS, NCS, NTL, NTC, NCFS, DELTAX, DELTAZ, CANG, CKS, GAMA,
!   TETAS, TETAR, ALFA, BETA (from input file dados.dat)
!   NLSSA (number of lines without water inside the furrow, from Bidisul)
!   H(i,j) (values of matric potential, from SoilMoistContF1)
!   HI(I,J) (Initial values of matric potential, from Bidisul)
!   KAPA(i,j) (from SoilMoistContF1)
!   BETA11 (m de Van Genuchten, from SoilMoistContF1)
!   C(i,j) (derivation of Van Genuchten equation, from SoilMoistContF1)
!   DELTAT1 (DELTAT in hours, from Bidisul)
!
!   Output variables: AIJ, BIJ, EIJ, FIJ, DIJ, GIJ (coefficients of the incidence matrix,
!   to assembleMatF2)

```

```

      Subroutine incidFase1(DELTAT1, NCFS, BETA11, BETA, ALFA, TETAR, H,
3665TETAS, GAMA, C, CKS, CANG, DELTAZ, NLSSA,
3665DELTAX, NLS, KAPA, HI, NTC, NTL, NCS, AIJ,
3665BIJ, DIJ, EIJ, FIJ, GIJ, NVEZES, INCR, T)

```

```

      REAL KAPA(200,200)

```

```

      Dimension AIJ(200,200), BIJ(200,200), DIJ(200,200), EIJ(200,200),
3665FIJ(200,200), GIJ(200,200), H(200,200), HI(200,200),
3665C(200,200)

```

```

!
!   CALCULO DOS Aij, Bij, Dij, Eij E Fij
!   PARA AS CONDICÖES DE FRONTEIRA
!   NA SITUAÇÃO DE ALIMENTAÇÃO
!

DO 516 I=1,NLSSA+1
  DO 516 J=2,NCS+I-1
    AIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+KAPA(I,J-1))*0.5/DELTAX**2
  DO 517 I=NLSSA+2,NLS
    DO 517 J=2,NCS+I-2
      AIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+KAPA(I,J-1))*0.5/DELTAX**2
    DO 519 I=NLS+1,NTL
      DO 519 J=2,NTC
        AIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+KAPA(I,J-1))*0.5/DELTAX**2
    DO 520 I=1,NTL
      AIJ(I,1)=(KAPA(I,1)+KAPA(I,2))*0.5/DELTAX**2
C
C   CALCULO DOS Bij (regiões UZ7J, UQ6W, $Ç19I, $1011I,
C   S1213F, 14TE15, 1617EF, OA)
DO 521 I=2,NLSSA+2
  DO 521 J=1,NCS+I-2
    BIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+KAPA(I-1,J))*0.5/DELTAX**2
DO 522 I=2,NLSSA+1
  ABH=ABS((1-(CANG*DELTAX)/DELTAX)*H(I,NCS+I-1)+
  $ (CANG*DELTAX/DELTAX)*H(I,NCS+I-2)-DELTAX)
  CKAP=CKS*EXP(GAMA*(((TETAS-TETAR)/(1+(ALFA*ABH)
  $ **BETA)**BETA11)+TETAR)-(TETAS)))
3665 BIJ(I,NCS+I-1)=(KAPA(I,NCS+I-1)+CKAP)*0.5/DELTAX**2
DO 530 I=NLSSA+3,NLS
  DO 530 J=1,NCS+I-3

3665 BIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+KAPA(I-1,J))*0.5/DELTAX**2

  DO 523 I=NLSSA+3,NLS

3665 BIJ(I,NCS+I-2)=(KAPA(I,J)+CKS)*0.5/DELTAX**2

  I=NLS+1

DO 524 J=1,NTC-NCFS

3665 BIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+KAPA(I-1,J))*0.5/DELTAX**2
I=NLS+1
DO 525 J=NTC-NCFS+1,NTC
3665 BIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+CKS)*0.5/DELTAX**2
DO 526 I=NLS+2,NTL
  DO 526 J=1,NTC
    BIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+KAPA(I-1,J))*0.5/DELTAX**2
DO 527 J=1,NCS
  ABH=ABS(H(2,J)-2*DELTAX)
  CKAP=CKS*EXP(GAMA*(((TETAS-TETAR)/(1+(ALFA*ABH)
  $ **BETA)**BETA11)+TETAR)-(TETAS)))
3665 BIJ(1,J)=(KAPA(1,J)+CKAP)*0.5/DELTAX**2
C
C   CALCULO DOS Eij (OW6A, J1X7, S12T, FE)
DO 528 I=1,NLSSA+1
  DO 528 J=1,NCS+I-1
    EIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+KAPA(I+1,J))*0.5/DELTAX**2
DO 529 I=NLSSA+2,NLS
  DO 529 J=1,NCS+I-2
    EIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+KAPA(I+1,J))*0.5/DELTAX**2
DO 531 I=NLS+1,NTL-1
  DO 531 J=1,NTC
    EIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+KAPA(I+1,J))*0.5/DELTAX**2
DO 532 J=1,NTC
  ABH=ABS(HI(NTL+1,J))
  CKAP=CKS*EXP(GAMA*(((TETAS-TETAR)/(1+(ALFA*ABH)
  $ **BETA)**BETA11)+TETAR)-(TETAS)))
3665 EIJ(NTL,J)=(KAPA(NTL,J)+CKAP)*0.5/DELTAX**2
C
C   CALCULO DOS Fij (OA6W, UQ6W, J1819I, 711, S205F, TE)
C
DO 533 I=1,NLSSA+1

  DO 533 J=NCS+I-2
3665 FIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+KAPA(I,J+1))*0.5/DELTAX**2

  FIJ(1,NCS)=(KAPA(1,NCS)+KAPA(1,NCS-1))*0.5/DELTAX**2
DO 534 I=2,NLSSA+1

  ABH=ABS(DELTAX/(DELTAX*CANG)*H(I+1,NCS+I-1)+

```

```

$      (1-DELTAX/(DELTAZ*CANG))*H(I,NCS+I-1)-DELTAX/CANG)
CKAP=CKS*EXP(GAMA*(((TETAS-TETAR)/(1+(ALFA*ABH)
**BETA)**BETA11)+TETAR)-(TETAS)))
534 FIJ(I,NCS+I-1)=(KAPA(I,NCS+I-1)+CKAP)*.5/DELTAX**2

DO 535 I=NLSSA+2,NLS
DO 535 J=1,NCS+I-3

3665    FIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+KAPA(I,J+1))* .5/DELTAX**2

DO 536 I=NLSSA+2,NLS

3665    FIJ(I,NCS+I-2)=(KAPA(I,NCS+I-2)+CKS)*.5/DELTAX**2

DO 537 I=NLS+1,NTL

DO 537 J=1,NTC-1
3665    FIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+KAPA(I,J+1))* .5/DELTAX**2

DO 538 I=NLS+1,NTL

3665    FIJ(I,NTC)=(KAPA(I,NTC)+KAPA(I,NTC-1))* .5/DELTAX**2

C CALCULO DOS Dij E Gij (OA6W, J7XI, STEF)
DO 539 I=1,NLSSA+1

DO 539 J=1,NCS+I-1
DIJ(I,J)=-C(I,J)/DELTAT1-AIJ(I,J)-BIJ(I,J)
-EIJ(I,J)-FIJ(I,J)
3665    GIJ(I,J)=-C(I,J)/DELTAT1*H(I,J)-DELTAX*BIJ(I,J)+DELTAX*EIJ(I,J)

DO 540 I=NLSSA+2,NLS
DO 540 J=1,NCS+I-2

DIJ(I,J)=-C(I,J)/DELTAT1-AIJ(I,J)-BIJ(I,J)-EIJ(I,J)-
FIJ(I,J)
$
3665    GIJ(I,J)=-C(I,J)/DELTAT1*H(I,J)-DELTAX*BIJ(I,J)+DELTAX*EIJ(I,J)

DO 541 I=NLS+1,NTL

DO 541 J=1,NTC

DIJ(I,J)=-C(I,J)/DELTAT1-AIJ(I,J)-BIJ(I,J)-EIJ(I,J)-
FIJ(I,J)
$
3665    GIJ(I,J)=-C(I,J)/DELTAT1*H(I,J)-DELTAX*BIJ(I,J)+DELTAX*EIJ(I,J)

WRITE(8888,2650) T/60
3665    FORMAT(1X,/' Instante T= ',F5.1,2X,'min'/)

WRITE(8888,2660)
3665    FORMAT(1X,/' matriz dos coeficientes Aij(i,j) ',/)
DO 1655 I=1,NLS-1
3665    WRITE(8888,3665) (aij(I,J),J=1,NCS+I-1)
DO 1660 I=NLS,NTL+(NVEZES*INCR+2)
3665    WRITE(8888,3665) (aij(I,J),J=1,NTC)

WRITE(8888,2665)
3665    FORMAT(1X,/' matriz dos coeficientes Bij(i,j) ',/)
DO 1670 I=1,NLS-1
3665    WRITE(8888,3665) (bij(I,J),J=1,NCS+I-1)
DO 1675 I=NLS,NTL+(NVEZES*INCR+2)
3665    WRITE(8888,3665) (bij(I,J),J=1,NTC)

WRITE(8888,2680)
3665    FORMAT(1X,/' matriz dos coeficientes Eij(i,j) ',/)
DO 1685 I=1,NLS-1
3665    WRITE(8888,3665) (Eij(I,J),J=1,NCS+I-1)
DO 1690 I=NLS,NTL+(NVEZES*INCR+2)
3665    WRITE(8888,3665) (Eij(I,J),J=1,NTC)

WRITE(8888,2695)
3665    FORMAT(1X,/' matriz dos coeficientes Fij(i,j) ',/)
DO 1700 I=1,NLS-1
3665    WRITE(8888,3665) (Fij(I,J),J=1,NCS+I-1)
DO 1705 I=NLS,NTL+(NVEZES*INCR+2)
3665    WRITE(8888,3665) (Fij(I,J),J=1,NTC)

WRITE(8888,2710)
3665    FORMAT(1X,/' matriz dos coeficientes Gij(i,j) ',/)

```



```

DO 1715 I=1,NLS-1
3665   WRITE(8888,3665) (Gij(I,J),J=1,NCS+I-1)
DO 1720 I=NLS,NTL+(NVEZES*INCR+2)
3665   WRITE(8888,3665) (Gij(I,J),J=1,NTC)

WRITE(8888,2725)
3665   FORMAT(1X,/' matriz dos coeficientes Dij(I,J) ',/)
DO 1730 I=1,NLS-1
3665   WRITE(8888,3665) (Dij(I,J),J=1,NCS+I-1)
DO 1735 I=NLS,NTL+(NVEZES*INCR+2)
3665   WRITE(8888,3665) (Dij(I,J),J=1,NTC)

3665   FORMAT(3X,40E10.3//)

return
end

```

SUB-ROTINA ASSEMBLEMATF2

```

! Construction of the incidence matrix for Fase 2, using the coefficients
! that was calculated on incidFase2
!
! The output of this subroutine is the incidence matrix HM(I,J).

Subroutine assembleMatF2 (AIJ, BIJ, EIJ, FIJ, DIJ, GIJ, NTL, NCFS,
*                       NTC, NLSCA, LAG, NLS, NPN2, DELTAX, T,
*                       CANG, DELTAZ, NCS, NLSSA, HI, LPR, HM,
*                       NPN1)

Dimension AIJ(200,200), BIJ(200,200), DIJ(200,200), EIJ(200,200),
*         FIJ(200,200), GIJ(200,200), HI(200,200), HM(2000,2000)

REAL LAG,LPR

L=0

DO 707 I=1,NLSSA+1

    DO 707 J=1,NCS+I-1

        L=L+1

        IF(I.NE.1)THEN ! Primeira e terceira geometrias
            IF(J.EQ.NCS+I-1)THEN

                HM(L,L-1)=AIJ(I,J)+BIJ(I,J)*DELTAX*
                CANG/DELTAX
                HM(L,L)=DIJ(I,J)+(1-CANG*DELTAX/DELTAX)*
                BIJ(I,J)+
                (1-DELTAX/(CANG*DELTAX))*FIJ(I,J)
                HM(L,L+NCS+I-1)=EIJ(I,J)+FIJ(I,J)*
                DELTAX/(DELTAX*CANG)
                HM(L,NPN2)=GIJ(I,J)+(DELTAX/CANG)*FIJ(I,J)+
                DELTAX*BIJ(I,J)

            ELSE

                IF(J.NE.1)THEN
                    HM(L,L-(NCS+I-2))=BIJ(I,J)
                    HM(L,L-1)=AIJ(I,J)
                    HM(L,L)=DIJ(I,J)
                    HM(L,L+1)=FIJ(I,J)
                    HM(L,L+NCS+I-1)=EIJ(I,J)
                    HM(L,NPN2)=GIJ(I,J)

                ELSE
                    HM(L,L-(NCS+I-2))=BIJ(I,J)
                    HM(L,L)=DIJ(I,J)
                    HM(L,L+1)=AIJ(I,J)+FIJ(I,J)
                    HM(L,L+NCS+I-1)=EIJ(I,J)
                    HM(L,NPN2)=GIJ(I,J)

                ENDIF

            ENDIF

        ELSE

            IF(J.EQ.NCS)THEN ! Segunda geometria
                HM(L,L-1)=AIJ(I,J)+FIJ(I,J)
                HM(L,L)=DIJ(I,J)
                HM(L,L+NCS)=BIJ(I,J)+EIJ(I,J)
                HM(L,NPN2)=GIJ(I,J)+2*DELTAX*BIJ(I,J)

            ELSE

                IF(J.NE.1)THEN

```

```

HM(L,L-1)=AIJ(I,J)
HM(L,L)=DIJ(I,J)
HM(L,L+1)=FIJ(I,J)
HM(L,L+NCS)=BIJ(I,J)+EIJ(I,J)
HM(L,NPN2)=GIJ(I,J)+2*DELTAZ*BIJ(I,J)
ELSE
HM(L,L)=DIJ(I,J)
HM(L,L+1)=AIJ(I,J)+FIJ(I,J)
HM(L,L+NCS)=BIJ(I,J)+EIJ(I,J)
HM(L,NPN2)=GIJ(I,J)+2*DELTAZ*BIJ(I,J)
ENDIF
ENDIF
CONTINUE
707
IF(NLSCA.EQ.0) GOTO 7997
L1=L
I=NLSSA+2
DO 717 J=1,NCS+I-2
L1=L1+1
IF(J.EQ.NCS+I-2)THEN
HM(L1,L1-(NCS+I-2))=BIJ(I,J)
HM(L1,L1-1)=AIJ(I,J)
HM(L1,L1)=DIJ(I,J)
HM(L1,L1+NCS+I-2)=EIJ(I,J)
LPR=(NLS-1)*DELTAZ
H0=(I-1)*DELTAZ-(LPR-LAG)
IF(H0.LT.0) H0=0
HM(L1,NPN2)=GIJ(I,J)-H0*FIJ(I,J)
ELSE
IF(J.NE.1)THEN
HM(L1,L1-(NCS+I-2))=BIJ(I,J)
HM(L1,L1-1)=AIJ(I,J)
HM(L1,L1)=DIJ(I,J)
HM(L1,L1+1)=FIJ(I,J)
HM(L1,L1+NCS+I-2)=EIJ(I,J)
HM(L1,NPN2)=GIJ(I,J)
ELSE
HM(L1,L1-(NCS+I-2))=BIJ(I,J)
HM(L1,L1)=DIJ(I,J)
HM(L1,L1+1)=FIJ(I,J)+AIJ(I,J)
HM(L1,L1+NCS+I-2)=EIJ(I,J)
HM(L1,NPN2)=GIJ(I,J)
ENDIF
ENDIF
CONTINUE
717
IF(NLSCA.EQ.1) GOTO 722
L0=L1
DO 171 I=NLSSA+3,NLS-1
DO 171 J=1,NCS+I-2
L0=L0+1
IF(J.EQ.NCS+I-2) THEN
HM(L0,L0)=DIJ(I,J)
HM(L0,L0-1)=AIJ(I,J)
HM(L0,L0+NCS+I-2)=EIJ(I,J)
H01=((NLSSA+2)*DELTAZ-(LPR-LAG))+(1-NLSSA+3)
*DELTAZ
HM(L0,NPN2)=GIJ(I,J)-H01*FIJ(I,J)-
(H01-DELTAZ)*BIJ(I,J)
ELSE
IF(J.NE.1)THEN
HM(L0,L0-(NCS+I-3))=BIJ(I,J)
HM(L0,L0)=DIJ(I,J)
HM(L0,L0+1)=FIJ(I,J)
HM(L0,L0-1)=AIJ(I,J)
HM(L0,L0+NCS+I-2)=EIJ(I,J)
HM(L0,NPN2)=GIJ(I,J)
ELSE
HM(L0,L0)=DIJ(I,J)
HM(L0,L0+1)=AIJ(I,J)+FIJ(I,J)
HM(L0,L0+NCS+I-2)=EIJ(I,J)
HM(L0,L0-(NCS+I-3))=BIJ(I,J)
HM(L0,NPN2)=GIJ(I,J)
ENDIF
ENDIF
CONTINUE
171

```

```

L2=L0
IF(NLSA.GT.1) GOTO 733
722 L2=L1
H02=H0
IF(NLSA.EQ.1) GOTO 744
733 H02=H01
744 I=NLS
DO 729 J=1,NTC-NCFS
L2=L2+1
IF(J.EQ.NTC-NCFS)THEN
HM(L2,L2-1)=AIJ(I,J)
HM(L2,L2)=DIJ(I,J)
HM(L2,L2+(NCS+I-2))=EIJ(I,J)
HM(L2,NPN2)=GIJ(I,J)-H02*BIJ(I,J)-LAG*FIJ(I,J)
ELSE
IF(J.NE.1) THEN
HM(L2,L2-(NCS+I-3))=BIJ(I,J)
HM(L2,L2-1)=AIJ(I,J)
HM(L2,L2)=DIJ(I,J)
HM(L2,L2+1)=FIJ(I,J)
HM(L2,L2+NCS+I-2)=EIJ(I,J)
HM(L2,NPN2)=GIJ(I,J)
ELSE
HM(L2,L2-(NCS+I-3))=BIJ(I,J)
HM(L2,L2)=DIJ(I,J)
HM(L2,L2+1)=AIJ(I,J)+FIJ(I,J)
HM(L2,L2+NCS+I-2)=EIJ(I,J)
HM(L2,NPN2)=GIJ(I,J)
ENDIF
ENDIF
729 CONTINUE
GOTO 7998
7997 L2=L
I=NLS
DO 7129 J=1,NTC-NCFS
L2=L2+1
IF(J.EQ.NTC-NCFS)THEN
HM(L2,L2-1)=AIJ(I,J)
HM(L2,L2)=DIJ(I,J)
HM(L2,L2-(NCS+I-2))=BIJ(I,J)
HM(L2,L2+(NCS+I-2))=EIJ(I,J)
HM(L2,NPN2)=GIJ(I,J)-LAG*FIJ(I,J)
ELSE
IF(J.NE.1) THEN
HM(L2,L2-(NCS+I-2))=BIJ(I,J)
HM(L2,L2-1)=AIJ(I,J)
HM(L2,L2)=DIJ(I,J)
HM(L2,L2+1)=FIJ(I,J)
HM(L2,L2+NCS+I-2)=EIJ(I,J)
HM(L2,NPN2)=GIJ(I,J)
ELSE
HM(L2,L2-(NCS+I-2))=BIJ(I,J)
HM(L2,L2)=DIJ(I,J)
HM(L2,L2+1)=AIJ(I,J)+FIJ(I,J)
HM(L2,L2+NCS+I-2)=EIJ(I,J)
HM(L2,NPN2)=GIJ(I,J)
ENDIF
ENDIF
7129 CONTINUE
7998 L3=L2
I=NLS+1
DO 737 J=1,NTC
L3=L3+1
IF(J.EQ.NTC)THEN
HM(L3,L3-1)=AIJ(I,J)+FIJ(I,J)
HM(L3,L3)=DIJ(I,J)
HM(L3,L3+NTC)=EIJ(I,J)
HM(L3,NPN2)=GIJ(I,J)-LAG*BIJ(I,J)
ELSE
IF(J.GT.NTC-NCFS)THEN
HM(L3,L3-1)=AIJ(I,J)
HM(L3,L3)=DIJ(I,J)
HM(L3,L3+1)=FIJ(I,J)
HM(L3,L3+NTC)=EIJ(I,J)
HM(L3,NPN2)=GIJ(I,J)-LAG*BIJ(I,J)
ELSE
IF(J.NE.1)THEN

```



```

HM(L3,L3-1)=AII(I,J)
HM(L3,L3)=DII(I,J)
HM(L3,L3+1)=FII(I,J)
HM(L3,L3+NTC)=EII(I,J)
HM(L3,L3-(NTC-NCFS))=BII(I,J)
HM(L3,NPN2)=GII(I,J)
ELSE
HM(L3,L3-(NTC-NCFS))=BII(I,J)
HM(L3,L3)=DII(I,J)
HM(L3,L3+1)=AII(I,J)+FII(I,J)
HM(L3,L3+NTC)=EII(I,J)
HM(L3,NPN2)=GII(I,J)
ENDIF
ENDIF
ENDIF
737 CONTINUE
L4=L3
DO 747 I=NLS+2,NTL-1
DO 747 J=1,NTC
L4=L4+1
IF(J.EQ.NTC)THEN
HM(L4,L4-1)=AII(I,J)+FII(I,J)
HM(L4,L4)=DII(I,J)
HM(L4,L4+NTC)=EII(I,J)
HM(L4,L4-NTC)=BII(I,J)
HM(L4,NPN2)=GII(I,J)
ELSE
IF(J.NE.1)THEN
HM(L4,L4-1)=AII(I,J)
HM(L4,L4)=DII(I,J)
HM(L4,L4+1)=FII(I,J)
HM(L4,L4-NTC)=BII(I,J)
HM(L4,L4+NTC)=EII(I,J)
HM(L4,NPN2)=GII(I,J)
ELSE
HM(L4,L4-NTC)=BII(I,J)
HM(L4,L4)=DII(I,J)
HM(L4,L4+1)=AII(I,J)+FII(I,J)
HM(L4,L4+NTC)=EII(I,J)
HM(L4,NPN2)=GII(I,J)
ENDIF
ENDIF
747 CONTINUE
L5=L4
I=NTL
DO 757 J=1,NTC
L5=L5+1
IF(J.EQ.NTC)THEN
HM(L5,L5-NTC)=BII(I,J)
HM(L5,L5-1)=AII(I,J)+FII(I,J)
HM(L5,L5)=DII(I,J)
HM(L5,NPN2)=GII(I,J)-HI(I+1,J)*EII(I,J)
ELSE
IF(J.NE.1) THEN
HM(L5,L5-NTC)=BII(I,J)
HM(L5,L5-1)=AII(I,J)
HM(L5,L5)=DII(I,J)
HM(L5,L5+1)=FII(I,J)
HM(L5,NPN2)=GII(I,J)-HI(I+1,J)*EII(I,J)
ELSE
HM(L5,L5-NTC)=BII(I,J)
HM(L5,L5)=DII(I,J)
HM(L5,L5+1)=AII(I,J)+FII(I,J)
HM(L5,NPN2)=GII(I,J)-HI(I+1,J)*EII(I,J)
ENDIF
ENDIF
757 CONTINUE
C WRITE(*,769) L5
C769 FORMAT(/,1X,'O NUMERO TOTAL DE LINHAS E = ',2X,I5)
WRITE(4444,1800) T/60
1800 FORMAT(1X,/' matriz de incidência HM(i,j), com inclusão dos
* termos dependentes Gij(i,j) na última coluna, no instante T=

```

```

      * ',F5.1,2X,'min'/)
      DO 1820 I=1,NPN1
1820      WRITE(4444,2800) (HM(I,J),J=1,NPN2)

2800      FORMAT(1X,150F18.12//)

      return
      end

```

SUB-ROTINA ASSEMBLEVCTF2

! Construction of the vector with the initial values of
! the matric potentials for each node (i,j), for Fase 2
!
! The output of this subroutine is the vector H1(i).

Subroutine assembleVectF2 (NTL, NCFS, NTC, NLS, NCS, NLSSA,
* NLSCA, H, H1, NPN1, T)

Dimension H(200,200), H1(2000)

```

      LI=0

      DO 1870 I=1,NLSSA+1

          DO 1870 J=1,NCS+I-1

              LI=LI+1

1870      H1(LI)=H(I,J)

          IF(NLSCA.EQ.0) GOTO 2711
          LI1=LI
          DO 271 I=NLSSA+2,NLS-1
              DO 271 J=1,NCS+I-2
                  LI1=LI1+1
271      H1(LI1)=H(I,J)
          LI2=LI1
          GOTO 2712
2711      LI2=LI
2712      I=NLS
          DO 2772 J=1,NTC-NCFS
              LI2=LI2+1
2772      H1(LI2)=H(I,J)
          LI3=LI2

          DO 7780 I=NLS+1,NTL

              DO 7780 J=1,NTC

                  LI3=LI3+1

7780      H1(LI3)=H(I,J)

      WRITE(3333,1900) T/60
1900      FORMAT(1X,/'Vetor com os valores das incógnitas H1(i)
      * no instante T= ',F5.1,2X,'min'/)
      DO 1920 I=1,NPN1
1920      WRITE(3333,2900) H1(I)

2900      FORMAT(1X,150F10.5//)

      return
      end

```

SUB-ROTINA SOILMOISTCONF2

G Calculates the soil moisture content of the domain, during the Fase 2,
G using the values of the matric potencial, for each node, that was
G calculated on the subroutine gSeidel. The expression used to do that
G is the Van Genuchten's equation.

Subroutine SoilMoistConf2(TETA, KAPA, C, H, TETAS, GAMA, NCS,
* NLSSA, BETA11, BETA, NTL, ALFA, TETAR,
* NCFS, NTC, CKS, NLS, H1, INCR, NVEZES,

```

*          T, DELTAZ, LAG, NLSCA, NPN1, NPN2,
*          NPN3, NPN4, HM)

Real KAPA(200,200), LAG

Dimension TETA(200,200), C(200,200), H(200,200), HM(2000,2000),
*          H1(2000)

LO1=0

DO 5501 I=1,NLSSA+1

    DO 5501 J=1,NCS+I-1

        LO1=LO1+1

        H(I,J)=H1(LO1)

!   If the matric potencial H has a positive value, the program
!   considers that the soil moisture is equal to the saturation
!   moisture, and the hydraulic conductivity is maximum. Else, it
!   calculates the soil moisture and the hydraulic conductivity

        IF(H1(LO1).GE.0) THEN

            TETA(I,J)=TETAS

            C(I,J)=0

            KAPA(I,J)=CKS

        ELSE

            ABH=ABS(H(I,J))

            TETA(I,J)=(TETAS-TETAR)/((1+(ALFA*ABH)
$          **BETA)**BETA11)+TETAR
            C(I,J)=ALFA*(TETAS-TETAR)*BETA*BETA11*(1+
$          (ALFA*ABH)**BETA)
$          *(BETA11-1)*(ALFA*ABH)**(BETA-1)/
$          (((1+(ALFA*ABH)**BETA)**
$          BETA11)**2)

            KAPA(I,J)=CKS*EXP(GAMA*(TETA(I,J)-(TETAS)))

        ENDIF

5501    CONTINUE
        IF(NLSCA.EQ.0) GOTO 2714

        LO2=LO1
        DO 1502 I=NLSSA+2,NLS-1
            DO 1502 J=1,NCS+I-2
                LO2=LO2+1
                H(I,J)=H1(LO2)
                IF(H1(LO2).GE.0) THEN
                    TETA(I,J)=TETAS
                    C(I,J)=0
                    KAPA(I,J)=CKS
                ELSE
                    ABH=ABS(H(I,J))

                    TETA(I,J)=(TETAS-TETAR)/((1+(ALFA*ABH)
$          **BETA)**BETA11)+TETAR
                    C(I,J)=ALFA*(TETAS-TETAR)*BETA*BETA11*(1+
$          (ALFA*ABH)**BETA)
$          *(BETA11-1)*(ALFA*ABH)**(BETA-1)/(((1+
$          (ALFA*ABH)**BETA)**
$          BETA11)**2)

                    KAPA(I,J)=CKS*EXP(GAMA*(TETA(I,J)-(TETAS)))

                ENDIF

1502    CONTINUE
        DO 1001 I=NLSSA+2,NLS-1

1001    TETA(I,NCS+I-1)=TETAS

```



```

LO3=LO2
GOTO 2715

2714      LO3=LO1

C          TESTE PARA DETECTAR QUANDO UN NO FICA
C          SEM AGUA NA FASE DE RECESSAO
C          R=LAG/NLSCA
C          AUMENTO DO N. DE LINHAS SEM AGUA
C          AUMENTO DE H(I,J) E DE NPN1 E NPN2

2715      IF(NLSCA.EQ.0) GOTO 7999

R=LAG/NLSCA
IF(R.LT.DELTAZ) THEN
    NLSSA=NLSSA+1
    NLSCA=NLSCA-1
    I=NLSSA+1
    H(NLSSA+1,NCS+I-1)=0
    TETA(NLSSA+1,NCS+I-1)=TETAS
    C(NLSSA+1,NCS+I-1)=0
    KAPA(NLSSA+1,NCS+I-1)=CKS
    DO 77455 I=1,NPN3
        DO 77455 J=1,I+NTC
77455      HM(I,J)=0
        DO 77466 I=NPN3+1,NPN4
            DO 77466 J=I-NTC,I+NTC
77466      HM(I,J)=0
        DO 77477 I=NPN4+1,NPN1
            DO 77477 J=I-NTC,NPN1
77477      HM(I,J)=0
        DO 77488 I=1,NPN1
77488      HM(I,NPN2)=0
        NPN1=NPN1+1
        NPN2=NPN2+1
        NPN3=NPN3+1
        NPN4=NPN4+1
    WRITE(*,2223) NPN1,NPN2,NPN3,NPN4
    C2223      FORMAT(/,5X,'NPN1=',I4,3X,'NPN2=',I4,3X,'NPN3=',
C $          ,I4,3X,'NPN4=',I4)
    ENDIF
7999      I=NLS

DO 3503 J=1,NTC-NCFS
    LO3=LO3+1
    H(I,J)=H1(LO3)
    IF(H1(LO3).GE.0) THEN
        TETA(I,J)=TETAS
        C(I,J)=0
        KAPA(I,J)=CKS
    ELSE
        ABH=ABS(H(I,J))
        TETA(I,J)=(TETAS-TETAR)/((1+(ALFA*ABH)**BETA)
$          **BETA11)+TETAR
        C(I,J)=ALFA*(TETAS-TETAR)*BETA*BETA11*(1+
$          (ALFA*ABH)**BETA)
$          *(BETA11-1)*(ALFA*ABH)**(BETA-1)/(((1+(ALFA
$          *ABH)**BETA)**
$          BETA11)**2)
        KAPA(I,J)=CKS*EXP(GAMA*(TETA(I,J)-(TETAS)))
    ENDIF
3503      CONTINUE

I=NLS
DO 1002 J=NTC-NCFS+1,NTC
1002      TETA(I,J)=TETAS

```

```

      LO4=LO3
      DO 7504 I=NLS+1,NTL
        DO 7504 J=1,NTC
          LO4=LO4+1
          H(I,J)=H1(LO4)
          IF(H1(LO4).GE.0) THEN
            TETA(I,J)=TETAS
            C(I,J)=0
            KAPA(I,J)=CKS
          ELSE
            ABH=ABS(H(I,J))
            TETA(I,J)=(TETAS-TETAR)/((1+(ALFA*ABH)
            **BETA)**BETA11)+TETAR
            C(I,J)=ALFA*(TETAS-TETAR)*BETA*BETA11*(1+
            (ALFA*ABH)**BETA)
            **((BETA11-1)*(ALFA*ABH)**(BETA-1))/((1+
            (ALFA*ABH)**BETA)**
            BETA11)**2)
            KAPA(I,J)=CKS*EXP(GAMA*(TETA(I,J)-(TETAS)))
          ENDIF
        CONTINUE
      7504
      WRITE(2222,3580) T/60
      3580   FORMAT(1X,/' Perfil de umidade no instante t= ',F5.1,2X,'min'/)
      DO 3560 I=1,NLS-1
      3560   WRITE(2222,4070) (TETA(I,J),J=1,NCS+I-1)
      DO 3570 I=NLS,NTL+(NVEZES*INCR+2)
      3570   WRITE(2222,4070) (TETA(I,J),J=1,NTC)
      4070   FORMAT(3X,40F10.7)

      WRITE(1111,3582) T/60
      3582   FORMAT(1X,/' Potencial matrico no instante t= ',F5.1,2X,'min'/)
      DO 3562 I=1,NLS-1
      3562   WRITE(1111,4072) (H(I,J),J=1,NCS+I-1)
      DO 3572 I=NLS,NTL+(NVEZES*INCR+2)
      3572   WRITE(1111,4072) (H(I,J),J=1,NTC)
      4072   FORMAT(3X,40F10.7)

      WRITE(7777,3584) T/60
      3584   FORMAT(1X,/' Condutividade hidraulica em t= ',F5.1,2X,'min'/)
      DO 3564 I=1,NLS-1
      3564   WRITE(7777,4074) (KAPA(I,J),J=1,NCS+I-1)
      DO 3574 I=NLS,NTL+(NVEZES*INCR+2)
      3574   WRITE(7777,4074) (KAPA(I,J),J=1,NTC)
      4074   FORMAT(3X,40F10.7)

      WRITE(6666,3586) T/60
      3586   FORMAT(1X,/' Valores dos coeficientes C em t= ',F5.1,2X,'min'/)
      DO 3566 I=1,NLS-1
      3566   WRITE(6666,4076) (C(I,J),J=1,NCS+I-1)
      DO 3576 I=NLS,NTL+(NVEZES*INCR+2)
      3576   WRITE(6666,4076) (C(I,J),J=1,NTC)
      4076   FORMAT(3X,40F10.7)

      Return
      End

```

SUB-ROTINA WATERVOLUMEF2

```

C _____
C                               VOLR E O VOLUME INFILTRADO NA
C
C                               FASE DE RECESSAO DURANTE O TEMPO DELTAT
C _____
C

```

```

      Subroutine WaterVolumeF2(TETA, DELTAT, TETAS, NTL, NLSSA,
*      NCS, NLS, DELTAZ, DELTAX, NCF5,
*      CANG, TACRE, LCOMP, X, Y, NOMEFI,
*      NUMERO, TETAI, H, HI, LAG, ML, NTC,
*      TEMPO, VOL1, DIF, T, DELTAT1, NTC2,
*      T2, VOLR, VOL)

```

common /bisimul/ il, im

REAL LAG

Dimension TETA(200,200), X(200),Y(200), TETAI(200,200),

```

*      H(200,200), HI(200,200)

CHARACTER NOMEFI*13, NUMERO(400)*3

IF(N.EQ.1) VOLAL=VOL1

S=1/CANG

AINT=2*(NCFS-1)*DELTAX*LAG+S*LAG**2
VOLT=AINT*LCOMP
VOL=0
VMALH=DELTAX*DELTAZ*LCOMP
DO 17 I=1,NLS-1
    DO 17 J=1,(NCS+I-2)

        TETAM=TETA(I,J)-TETAI(I,J)+TETA(I+1,J)-TETAI
$      (I+1,J)+TETA(I,J+1)-TETAI(I,J+1)+TETA(I+1,J+1)-TETAI
$      (I+1,J+1)
        TEORM=TETAM/4
17    VOL=VOL+TEORM*VMALH
DO 18 I=1,NLS-1
    J=NCS+I-1
    TETAM=TETA(I,J)-TETAI(I,J)+TETA(I+1,J)-TETAI
$      (I+1,J)+TETA(I+1,J+1)-TETAI(I+1,J+1)
    TEORM=TETAM/3
18    VOL=VOL+TEORM*VMALH/2
DO 19 I=NLS,NTL-1
    DO 19 J=1,NTC-1
        TETAM=TETA(I,J)-TETAI(I,J)+TETA(I+1,J)-
$      TETAI(I+1,J)+TETA(I,J+1)-TETAI(I,J+1)+
$      TETA(I+1,J+1)-TETAI(I+1,J+1)
        TEORM=TETAM/4
19    VOL=VOL+TEORM*VMALH
VOL1=2*VOL
VOLR=VOL1
DELTAV=VOLR-VOLAL
VOLT=VOLT-DELTAV
AINTT=VOLT/LCOMP
HD=2*(NCFS-1)*DELTAX
HR=(HD**2-4*S*(-AINTT))**.5
LAG=(-HD+HR)/(2*S)
VOLAL=VOLR
N=2

!Largura da base da trincheira, em cm.
!Largura da lâmina d'água, em cm.
!Altura da lâmina d'água, em cm.
!Vol. d'água no dom. (cm3) na fase d alim.

T2=T/60
IF(LAG.LE.0.1) LAG=0.0
T=T+DELTAT
DELTAT1=DELTAT/3600

DIF=ABS(HI(NTL-2,NTC))-ABS(H(NTL-2,NTC))
IF(LAG.LE.0.1) THEN

    WRITE(II,41) LAG

    WRITE(IM,41) LAG

41    FORMAT(1X,'LAG=',F10.5)

ENDIF

IF(T.EQ.TEMPO.OR.LAG.LE.0.1) THEN
    TEMPO=TEMPO+TACRE

    T2=T/60

    WRITE(IM,1470) VOLR,T2,LAG
1470    FORMAT(1X,'F.REC.VOL=',F15.3,2X,'(cm3)',1X,
$      'TEMPO=',F15.2,1X,'(min)',1X,'LAG=',F10.3)
    WRITE(II,2061) T,LAG

2061    FORMAT(1X,'TEOR DE UMIDADE',/,1X,'TEMPO=',
$      F7.0,3X,'SEGUNDOS',/,2X,'LAG=',F10.3)
    DO 9505 I=1,NLSSA+1

        DO 9505 J=NCS+I,NTC

9505    TETA(I,J)=.92

```



```

DO 6506 I=1,NLSSA+1
6506      WRITE(ii,2072)(TETA(I,J),J=1,NTC)
      DO 6508 I=NLSSA+2,NLS
        DO 6508 J=NCS+1,NTC
6508      TETA(I,J)=0.92
DO 1509 I=NLSSA+2,NLS
1509      TETA(I,NCS+I-1)=TETAS
      I=NLS
      DO 9546 J=NTC-NCFS+2,NTC
        TETA(I,J)=TETAS
9546      DO 2545 I=NLSSA+2,NLS
2545      WRITE(ii,2072)(TETA(I,J),J=1,NTC)
      DO 7515 I=NLS+1,NTL
7515      WRITE(ii,2072)(TETA(I,J),J=1,NTC)
2072      FORMAT(1X,40F6.5)
      DO 4445 I=1,NTL
        DO 4445 J=1,NTC-1
          N2=2*NTC-J
          TETA(I,N2)=TETA(I,J)
4445      ML=ML+1
      NOMEFI='MATRIZ'//NUMERO(ML)//'.DAT'
      OPEN(1,FILE=NOMEFI,STATUS='new')
      NTC2=2*NTC-1
      DO 5057 I=1,NTC2
5057      X(I)=I
      DO 3060 J=1,NTL
3060      Y(J)=J
      WRITE(1,*) (X(I),I=1,NTC2)
      WRITE(1,*) (Y(J),J=1,NTL)
      DO 5056 J=1,NTC2
5056      WRITE(1,*) (TETA(I,J),I=1,NTL)
      CLOSE (1)
      ENDIF
      Return
      End

```

SUB-ROTINA INCR LINES F2

- G Increasing the number of lines of the domain, using the variables
 G ACTIV, NVEZES and INCR, for Fase 2.
 G The variable ACTIV sets the difference of matrix potential, at the
 G last line, that is necessary to activate the profile
 G The variable NVEZES sets the number of times that the profile will
 G be activated
 G The variable INCR sets the number of lines increased each time

```

Subroutine IncrLinesF2 (HM, NCS, NLS, NCFS, NLSCA, NLSSA, GAMA,
*      CKS, BETA11, BETA, ALFA, TETAR, TETAS, C,
*      NTC, INCR, ACTIV, H, HI, TETA, KAPA, DIF,
*      NTL, NPN1, NPN2, NPN3, NPN4)

```

```

Real KAPA(200,200)

```

```

Dimension HM(2000,2000), H(200,200), HI(200,200), TETA(200,200),
*      C(200,200)

```

```

      IF (ABS(DIF).GE.ACTIV) THEN
        DO 97119 I=NTL+1,(NTL+INCR+2)
          DO 97119 J=1,NTC
            H(I,J)=HI(I,J)
            ABH=ABS(H(I,J))
            TETA(I,J)=(TETAS-TETAR)/((1+(ALFA*ABH)
$          **BETA)**BETA11)+TETAR
            C(I,J)=ALFA*(TETAS-TETAR)*BETA*BETA11*(1+
$          (ALFA*ABH)**BETA)
$          **BETA11-1)*(ALFA*ABH)**(BETA-1)/((1+
$          (ALFA*ABH)**BETA)**
$          BETA11)**2)
97119      KAPA(I,J)=CKS*EXP(GAMA*(TETA(I,J)-(TETAS)))

```

```

DO 71455 I=1,NPN3
      DO 71455 J=1,I+NTC
71455      HM(I,J)=0
      DO 71466 I=NPN3+1,NPN4
      DO 71466 J=I-NTC,I+NTC
71466      HM(I,J)=0
      DO 71477 I=NPN4+1,NPN1
      DO 71477 J=I-NTC,NPN1
71477      HM(I,J)=0
      DO 71488 I=1,NPN1
71488      HM(I,NPN2)=0
      NTL=NTL+INCR
      LL=0
      DO 9888 I=1,NLSSA
71488      LL=LL+I
      LL1=0
      DO 9889 I=1,NLSCA
71489      LL1=LL1+I-1
      LL2=NTC-NCFS
      LL3=NTC*(NTL-NLS)
      NPN1=NCS+NLSSA*NCS+LL+NLSCA*(NCS+NLSSA)+LL1+LL2+LL3
      NPN2=NPN1+1
      NPN3=NPN1-LL3
      NPN4=NPN1-NTC
      WRITE(*,9224) NPN1,NPN2,NPN3,NPN4
C9224      FORMAT(/,5X,'NPN1=',I4,3X,'NPN2=',I4,3X,'NPN3=
C $      ',I4,3X,'NPN4=',I4)
      ENDIF
      Return
      End

```

SUB-ROTINA INCIDFASE2

```

! Determining the coefficients of the Incidence Matrix,
! Aij, Bij, Dij, Eij, Fij and Gij, for the Fase 2, according to the
! equation 4 of Tabuada et. al (1995), that is the discretization of
! two-dimensional Richards' Equation.
!
! The Fase 2 (two) means the recession fase, occurring when
! water infiltrates, after cut-off.
!
! Input variables: NLS, NCS, NTL, NTC, NCFS, DELTAX, DELTAZ, CANG, CKS, GAMA,
! TETAS, TETAR, ALFA, BETA (from input file dados.dat)
! NLSSA (number of lines without water inside the furrow, from Bidisul)
! NLSCA (number of lines with water inside the furrow, from Bidisul)
! H(i,j) (values of matric potential, from SoilMoistConf2)
! HI(i,j) (initial values of matric potential, from Bidisul)
! KAPA(i,j) (from SoilMoistConf2)
! BETA11 (m de Van Genuchten, from SoilMoistConf2)
! C(i,j) (derivation of Van Genuchten equation, from SoilMoistConf2)
! DELTAT1 (DELTAT in hours, from Bidisul)
!
! Output variables: AIJ, BIJ, EIJ, FIJ, DIJ, GIJ (coefficients of the incidence matrix,
! to assembleMatF3)
!
Subroutine incidFase2(DELTAT1, NCFS, BETA11, BETA, ALFA, TETAR, H,
* TETAS, GAMA, C, CKS, CANG, DELTAZ, NLSSA, T,
* NLSCA, DELTAX, NLS, KAPA, HI, NTC, NTL, NCS,
* AIJ, BIJ, DIJ, EIJ, FIJ, GIJ, INCR, NVEZES)
REAL KAPA(200,200)
Dimension AIJ(200,200),BIJ(200,200),DIJ(200,200), H(200,200),
* EIJ(200,200),FIJ(200,200),GIJ(200,200), C(200,200),
* HI(200,200)
C
C =====
C =
C
C = CALCULO DOS Aij, Bij, Dij, Eij E Fij =
C = PARA AS CONDICAOES DE FRONTEIRA =
C = NA SITUACAO DE RECESSAO =
C =
C =====

```

```

C      CALCULO DOS AIJ
377      N=0
      IF(N.EQ.2) GOTO 334
      N=N+1
334      DO 6516 I=1,NLSSA+1
          DO 6516 J=2,NCS+I-1
6516      AIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+KAPA(I,J-1))* .5/DELTAX**2
          DO 7517 I=NLSSA+2,NLS
              DO 7517 J=2,NCS+I-2
7517      AIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+KAPA(I,J-1))* .5/DELTAX**2
          DO 9519 I=NLS+1,NTL
              DO 9519 J=2,NTC
9519      AIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+KAPA(I,J-1))* .5/DELTAX**2
          DO 7520 I=1,NTL
7520      AIJ(I,1)=(KAPA(I,1)+KAPA(I,2))* .5/DELTAX**2
C      CALCULO DOS Bij
          DO 9521 I=2,NLSSA+2
              DO 9521 J=1,NCS+I-2
9521      BIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+KAPA(I-1,J))* .5/DELTAZ**2
          DO 4522 I=2,NLSSA+1
              ABH=ABS((1-(CANG*DELTAZ)/DELTAX)*H(I,NCS+I-1)+
              $      (CANG*DELTAZ/DELTAX)*H(I,NCS+I-2)-DELTAZ)
              CKAP=CKS*EXP(GAMA*(((TETAS-TETAR)/(1+(ALFA*ABH)
              $      **BETA)**BETA11)
              $      +TETAR)-(TETAS)))
4522      BIJ(I,NCS+I-1)=(KAPA(I,NCS+I-1)+CKAP)* .5/DELTAZ**2

      IF(NLSCA.LT.1) GOTO 45231

          DO 4530 I=NLSSA+3,NLS
              DO 4530 J=1,NCS+I-3
4530      BIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+KAPA(I-1,J))* .5/DELTAZ**2

          DO 4523 I=NLSSA+3,NLS
4523      BIJ(I,NCS+I-2)=(KAPA(I,J)+CKS)* .5/DELTAZ**2

45231      I=NLS+1

          DO 4524 J=1,NTC-NCFS
4524      BIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+KAPA(I-1,J))* .5/DELTAZ**2

          I=NLS+1

          DO 4525 J=NTC-NCFS+1,NTC
4525      BIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+CKS)* .5/DELTAZ**2

          DO 4526 I=NLS+2,NTL
              DO 4526 J=1,NTC
4526      BIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+KAPA(I-1,J))* .5/DELTAZ**2

          DO 4527 J=1,NCS
              ABH=ABS(H(2,J)-2*DELTAZ)
              CKAP=CKS*EXP(GAMA*(((TETAS-TETAR)/(1+(ALFA*ABH)
              $      **BETA)**BETA11)+TETAR)-(TETAS)))
4527      BIJ(1,J)=(KAPA(1,J)+CKAP)* .5/DELTAZ**2
C      CALCULO DOS Eij
C
          DO 4528 I=1,NLSSA+1
              DO 4528 J=1,NCS+I-1
4528      EIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+KAPA(I+1,J))* .5/DELTAZ**2

          DO 4529 I=NLSSA+2,NLS
              DO 4529 J=1,NCS+I-2
4529      EIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+KAPA(I+1,J))* .5/DELTAZ**2

          DO 4531 I=NLS+1,NTL-1
              DO 4531 J=1,NTC
4531      EIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+KAPA(I+1,J))* .5/DELTAZ**2

          DO 4532 J=1,NTC
              ABH=ABS(HI(NTL+1,J))
              CKAP=CKS*EXP(GAMA*(((TETAS-TETAR)/(1+(ALFA*ABH)
              $      **BETA)**BETA11)+TETAR)-(TETAS)))

```



```

4532      EIJ(NTL,J)=(KAPA(NTL,J)+CKAP)*.5/DELTAZ**2
C          CALCULO DOS Fij
C
DO 4533 I=1,NLSSA+1
DO 4533 J=NCS+I-2
4533      FIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+KAPA(I,J+1))* .5/DELTAZ**2

FIJ(1,NCS)=(KAPA(1,NCS)+KAPA(1,NCS-1))* .5/DELTAZ**2
DO 4534 I=2,NLSSA+1
      ABH=ABS(DELTAZ/(DELTAZ*CANG)*H(I+1,NCS+I-1)+
      $      (1-DELTAZ/(DELTAZ*CANG))*H(I,NCS+I-1)-DELTAZ/CANG)
      CKAP=CKS*EXP(GAMA*(((TETAS-TETAR)/(1+(ALFA*ABH)
      $      **BETA)**BETA11)+TETAR)-(TETAS)))
4534      FIJ(I,NCS+I-1)=(KAPA(I,NCS+I-1)+CKAP)*.5/DELTAZ**2

DO 4535 I=NLSSA+2,NLS
DO 4535 J=1,NCS+I-3
4535      FIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+KAPA(I,J+1))* .5/DELTAZ**2

DO 4536 I=NLSSA+2,NLS
4536      FIJ(I,NCS+I-2)=(KAPA(I,NCS+I-2)+CKS)*.5/DELTAZ**2

DO 4537 I=NLS+1,NTL
DO 4537 J=1,NTC-1
4537      FIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+KAPA(I,J+1))* .5/DELTAZ**2

DO 4538 I=NLS+1,NTL
4538      FIJ(I,NTC)=(KAPA(I,NTC)+KAPA(I,NTC-1))* .5/DELTAZ**2
C          CALCULO DOS Dij E Gij
C
DO 4539 I=1,NLSSA+1
DO 4539 J=1,NCS+I-1
      DIJ(I,J)=-C(I,J)/DELTAT1-AIJ(I,J)-BIJ(I,J)
      $      -EIJ(I,J)-FIJ(I,J)
4539      GIJ(I,J)=-C(I,J)/DELTAT1*H(I,J)-DELTAZ*BIJ(I,J)+DELTAZ*EIJ(I,J)

DO 4540 I=NLSSA+2,NLS
DO 4540 J=1,NCS+I-2
      DIJ(I,J)=-C(I,J)/DELTAT1-AIJ(I,J)-BIJ(I,J)
      $      -EIJ(I,J)-FIJ(I,J)
4540      GIJ(I,J)=-C(I,J)/DELTAT1*H(I,J)-DELTAZ*BIJ(I,J)+DELTAZ*EIJ(I,J)
DO 4541 I=NLS+1,NTL
DO 4541 J=1,NTC
      DIJ(I,J)=-C(I,J)/DELTAT1-AIJ(I,J)-BIJ(I,J)
      $      -EIJ(I,J)-FIJ(I,J)
4541      GIJ(I,J)=-C(I,J)/DELTAT1*H(I,J)-DELTAZ*BIJ(I,J)+DELTAZ*EIJ(I,J)

WRITE(8888,3650) T/60
3650      FORMAT(1X,' Instante T= ',F5.1,2X,'min/')

      WRITE(8888,3660)
3660      FORMAT(1X,' matriz dos coeficientes Aij(i,j) ',/)
DO 3655 I=1,NLS-1
3655      WRITE(8888,4665) (aij(I,J),J=1,NCS+I-1)
DO 2660 I=NLS,NTL+(NVEZES*INCR+2)
2660      WRITE(8888,4665) (aij(I,J),J=1,NTC)

      WRITE(8888,3665)
3665      FORMAT(1X,' matriz dos coeficientes Bij(i,j) ',/)
DO 2670 I=1,NLS-1
2670      WRITE(8888,4665) (bij(I,J),J=1,NCS+I-1)
DO 2675 I=NLS,NTL+(NVEZES*INCR+2)
2675      WRITE(8888,4665) (bij(I,J),J=1,NTC)

      WRITE(8888,3680)
3680      FORMAT(1X,' matriz dos coeficientes Eij(i,j) ',/)
DO 2685 I=1,NLS-1
2685      WRITE(8888,4665) (Eij(I,J),J=1,NCS+I-1)
DO 2690 I=NLS,NTL+(NVEZES*INCR+2)
2690      WRITE(8888,4665) (Eij(I,J),J=1,NTC)

      WRITE(8888,3695)
3695      FORMAT(1X,' matriz dos coeficientes Fij(i,j) ',/)
DO 2700 I=1,NLS-1
2700      WRITE(8888,4665) (Fij(I,J),J=1,NCS+I-1)
DO 2705 I=NLS,NTL+(NVEZES*INCR+2)
2705      WRITE(8888,4665) (Fij(I,J),J=1,NTC)

WRITE(8888,3710)

```

```

3710     FORMAT(1X,/' matriz dos coeficientes Gij(i,j) ',/)
DO 2715 I=1,NLS-1
2715     WRITE(8888,4665) (Gij(I,J),J=1,NCS+I-1)
DO 2720 I=NLS,NTL+(NVEZES*INCR+2)
2720     WRITE(8888,4665) (Gij(I,J),J=1,NTC)

WRITE(8888,3725)
3725     FORMAT(1X,/' matriz dos coeficientes Dij(i,j) ',/)
DO 2730 I=1,NLS-1
2730     WRITE(8888,4665) (Dij(I,J),J=1,NCS+I-1)
DO 2735 I=NLS,NTL+(NVEZES*INCR+2)
2735     WRITE(8888,4665) (Dij(I,J),J=1,NTC)

4665     FORMAT(3X,40E10.3//)

```

```

return
end

```

SUB-ROTINA ASSEMBLEMATF3

! Construction of the incidence matrix for Fase 3, using the coefficients
! that was calculated on incidFase3

! The output of this subroutine is the incidence matrix HM(i,j).

```

Subroutine assembleMatF3 (AIJ, BIJ, EIJ, FIJ, DIJ, GIJ, NTL, NCFS,
* NTC, NLS, NPN2, DELTAX, CANG, DELTAZ,
* NCS, HI, HM, T, NPN1)

```

```

Dimension AIJ(200,200), BIJ(200,200), DIJ(200,200), EIJ(200,200),
* FIJ(200,200), GIJ(200,200), HI(200,200), HM(2000,2000)

```

```

6668     L=0
DO 777 I=1,NLS-1
DO 777 J=1,NCS+I-1
L=L+1
IF(I.NE.1)THEN
IF(J.EQ.NCS+I-1)THEN
HM(L,L-1)=AIJ(I,J)+BIJ(I,J)*DELTAX
* CANG/DELTAX
HM(L,L)=DIJ(I,J)+(1-CANG*DELTAX/DELTAX)
* BIJ(I,J)+(1-DELTAX/(CANG*DELTAX))
* FIJ(I,J)
HM(L,L+NCS+I-1)=EIJ(I,J)+FIJ(I,J)
* DELTAX/(DELTAX*CANG)
HM(L,NPN2)=GIJ(I,J)+(DELTAX/CANG)
* FIJ(I,J)+DELTAX*BIJ(I,J)
ELSE
IF(J.NE.1)THEN
HM(L,L-(NCS+I-2))=BIJ(I,J)
HM(L,L-1)=AIJ(I,J)
HM(L,L)=DIJ(I,J)
HM(L,L+1)=FIJ(I,J)
HM(L,L+NCS+I-1)=EIJ(I,J)
HM(L,NPN2)=GIJ(I,J)
ELSE
HM(L,L-(NCS+I-2))=BIJ(I,J)
HM(L,L)=DIJ(I,J)
HM(L,L+1)=AIJ(I,J)+FIJ(I,J)
HM(L,L+NCS+I-1)=EIJ(I,J)
HM(L,NPN2)=GIJ(I,J)
ENDIF
ENDIF
ELSE
IF(J.EQ.NCS)THEN
HM(L,L-1)=AIJ(I,J)+FIJ(I,J)
HM(L,L)=DIJ(I,J)
HM(L,L+NCS)=BIJ(I,J)+EIJ(I,J)
HM(L,NPN2)=GIJ(I,J)+2*DELTAX*BIJ(I,J)
ELSE
IF(J.NE.1)THEN

```

```

HM(L,L-1)=AIJ(I,J)
HM(L,L)=DIJ(I,J)
HM(L,L+1)=FIJ(I,J)
HM(L,L+NCS)=BIJ(I,J)+EIJ(I,J)
HM(L,NPN2)=GIJ(I,J)+2*DELTAZ
$ *BIJ(I,J)
ELSE
HM(L,L)=DIJ(I,J)
HM(L,L+1)=AIJ(I,J)+FIJ(I,J)
HM(L,L+NCS)=BIJ(I,J)+EIJ(I,J)
HM(L,NPN2)=GIJ(I,J)+2*DELTAZ
$ *BIJ(I,J)
ENDIF
ENDIF
777 CONTINUE
L1=L
I=NLS
DO 9010 J=1,NTC-NCFS+1
L1=L1+1
IF(J.EQ.(NTC-NCFS+1)) THEN
$ DELTAZ/DELTAZ HM(L1,L1-1)=AIJ(I,J)-BIJ(I,J)*CANG*
$ *BIJ(I,J) HM(L1,L1)=DIJ(I,J)+(1+(CANG*DELTAZ/DELTAZ))
HM(L1,L1+1)=FIJ(I,J)
HM(L1,L1+NTC)=EIJ(I,J)
HM(L1,NPN2)=GIJ(I,J)+DELTAZ*BIJ(I,J)
ELSE
IF(J.NE.1) THEN
HM(L1,L1-1)=AIJ(I,J)
HM(L1,L1)=DIJ(I,J)
HM(L1,L1+1)=FIJ(I,J)
HM(L1,L1-(NTC-NCFS))=BIJ(I,J)
HM(L1,L1+NTC)=EIJ(I,J)
HM(L1,NPN2)=GIJ(I,J)
ELSE
HM(L1,L1+1)=AIJ(I,J)+FIJ(I,J)
HM(L1,L1)=DIJ(I,J)
HM(L1,L1-(NTC-NCFS))=BIJ(I,J)
HM(L1,L1+NTC)=EIJ(I,J)
HM(L1,NPN2)=GIJ(I,J)
ENDIF
ENDIF
9010 CONTINUE
L2=L1
I=NLS
DO 1011 J=NTC-NCFS+2,NTC
L2=L2+1
IF(J.EQ.NTC) THEN
HM(L2,L2-1)=AIJ(I,J)+FIJ(I,J)
HM(L2,L2)=DIJ(I,J)
HM(L2,L2+NTC)=EIJ(I,J)+BIJ(I,J)
HM(L2,NPN2)=GIJ(I,J)+2*DELTAZ*BIJ(I,J)
ELSE
HM(L2,L2-1)=AIJ(I,J)
HM(L2,L2)=DIJ(I,J)
HM(L2,L2+1)=FIJ(I,J)
HM(L2,L2+NTC)=EIJ(I,J)+BIJ(I,J)
HM(L2,NPN2)=GIJ(I,J)+2*DELTAZ*BIJ(I,J)
ENDIF
1011 CONTINUE

```



```

L4=L2
DO 4747 I=NLS+1,NTL-1
    DO 4747 J=1,NTC
        L4=L4+1
        IF(J.EQ.NTC) THEN
            HM(L4,L4-1)=AIJ(I,J)+FIJ(I,J)
            HM(L4,L4)=DIJ(I,J)
            HM(L4,L4+NTC)=EIJ(I,J)
            HM(L4,L4-NTC)=BIJ(I,J)
            HM(L4,NPN2)=GIJ(I,J)
        ELSE
            IF(J.NE.1) THEN
                HM(L4,L4-1)=AIJ(I,J)
                HM(L4,L4)=DIJ(I,J)
                HM(L4,L4+1)=FIJ(I,J)
                HM(L4,L4-NTC)=BIJ(I,J)
                HM(L4,L4+NTC)=EIJ(I,J)
                HM(L4,NPN2)=GIJ(I,J)
            ELSE
                HM(L4,L4-NTC)=BIJ(I,J)
                HM(L4,L4)=DIJ(I,J)
                HM(L4,L4+1)=AIJ(I,J)+FIJ(I,J)
                HM(L4,L4+NTC)=EIJ(I,J)
                HM(L4,NPN2)=GIJ(I,J)
            ENDIF
        ENDIF
    ENDIF
4747 CONTINUE
!

L5=L4
I=NTL
DO 4757 J=1,NTC
    L5=L5+1
    IF(J.EQ.NTC) THEN
        HM(L5,L5-NTC)=BIJ(I,J)
        HM(L5,L5-1)=AIJ(I,J)+FIJ(I,J)
        HM(L5,L5)=DIJ(I,J)
        HM(L5,NPN2)=GIJ(I,J)-HI(I+1,J)*EIJ(I,J)
    ELSE
        IF(J.NE.1) THEN
            HM(L5,L5-NTC)=BIJ(I,J)
            HM(L5,L5-1)=AIJ(I,J)

```

```

HM(L5,L5)=DIJ(I,J)
HM(L5,L5+1)=FIJ(I,J)
HM(L5,NPN2)=GIJ(I,J)-HI(I+1,J)*EIJ(I,J)
ELSE
HM(L5,L5-NTC)=BIJ(I,J)
HM(L5,L5)=DIJ(I,J)
HM(L5,L5+1)=AIJ(I,J)+FIJ(I,J)
HM(L5,NPN2)=GIJ(I,J)-HI(I+1,J)*EIJ(I,J)
ENDIF
ENDIF
4757      CONTINUE
D WRITE(*,1769) L5
D1769 FORMAT(/,1X,'<F.REDIST.> O NO TOTAL DE LINHAS E = ',2X,I5)
WRITE(4444,2800) T/60
2800      FORMAT(1X,/' matriz de incidência HM(i,j), com inclusão dos
* termos dependentes Gij(i,j) na última coluna, no instante T=
* ',F5.1,2X,'min'/)
DO 2820 I=1,NPN1
2820      WRITE(4444,3800) (HM(I,J),J=1,NPN2)
3800      FORMAT(1X,150F18.12//)
return
end

```

SUB-ROTINA ASSEMBLEVECTF3

! Construction of the vector with the initial values of
! the matrix potentials for each node (i,j), for Fase 3
!
! The output of this subroutine is the vector H1(i).

```

Subroutine assembleVectF3 (NTL, NTC, NLS, NCS, H, H1, T, NPN1)
Dimension H(200,200), H1(2000)
LI=0
DO 2870 I=1,NLS-1
DO 2870 J=1,NCS+I-1
LI=LI+1
2870      H1(LI)=H(I,J)
LI3=LI
DO 47780 I=NLS,NTL
DO 47780 J=1,NTC
LI3=LI3+1
47780      H1(LI3)=H(I,J)
WRITE(3333,2900) T/60
2900      FORMAT(1X,/'Vetor com os valores das incógnitas H1(i)
* no instante T= ',F5.1,2X,'min'/)
DO 2920 I=1,NPN1
2920      WRITE(3333,3900) H1(I)
3900      FORMAT(1X,150F10.5//)
return
end

```

SUB-ROTINA WATERVOLUMEF3

!

```

Subroutine WaterVolumeF3(TETA, NCS, NLS, LAG, TTREG, NZR, VOLZR,
*      LCOMP, DELTAZ, IFIMREC, DELTAX, NTL, T,
*      NUMERO, NOMEFI, FLAGTEST, TETAI, H, HI,
*      ML, TEMPO, NTC, DELTAT, DELTAT1, VOL1)
common /bisimul/ il, im

REAL LAG

Dimension TETA(200,200), X(200),Y(200), TETAI(200,200),
*      H(200,200), HI(200,200)

CHARACTER NOMEFI*13, NUMERO(400)*3

IF (FLAGTEST.EQ.1) GOTO 2051

DIF=ABS(HI(NTL-2,NTC))-ABS(H(NTL-2,NTC))
IF(IFIMREC.EQ.1) THEN

    WRITE(6,2050) T,LAG

    WRITE(7,2050) T,LAG

2050      FORMAT(1X,'FIM REC. INICIO REDIST.,TEMPO=',F9.1,2X,
*      'LAG=',F10.3)

ENDIF

IF(T.GE.TTREG) GOTO 2051

IF(T.GE.TEMPO.OR.IFIMREC.EQ.1) THEN
    IF(IFIMREC.EQ.1) GOTO 2051

    IF(MCONT.EQ.1) DELTAT=1.
    DELTAT=DELTAT+MCONT
    DELTAT1=DELTAT/3600

    TEMPO=360*DELTAT+TEMPO

2051      WRITE(6,3061) T

    WRITE(7,3061) T

3061      FORMAT(1X,'TEOR DE UMIDADE',/,10X,'TEMPO=',F7.0,8X,
$      'SEGUNDOS',/)

    IF(NTL.GE.80) THEN

        WRITE(6,1497) NTL

1497      FORMAT(1X,'NTL=',I2)

    ENDIF

    DO 19505 I=1,NLS-1

        DO 19505 J=NCS+1,NTC

19505      TETA(I,J)=.92

        DO 16506 I=1,NLS

16506      WRITE(6,3072)(TETA(I,J),J=1,NTC)

        DO 8515 I=NLS+1,NTL

8515      WRITE(6,3072)(TETA(I,J),J=1,NTC)
3072      FORMAT(1X,40F6.5)

        VOL=0

        VMALH=DELTAX*DELTAT*LCOMP

        DO 32 I=1,NLS-1

            DO 32 J=1,(NCS+I-2)

                TETAM=TETA(I,J)-TETAI(I,J)+TETA(I+1,J)
                -TETAI(I+1,J)+TETA(I,J+1)-TETAI(I,J+1)
$

```



```

$          +TETA(I+1,J+1)-TETAI(I+1,J+1)
          TEORM=TETAM/4
32      VOL=VOL+TEORM*VMALH
      DO 34 I=1,NLS-1
          J=NCS+I-1
          TETAM=TETA(I,J)-TETAI(I,J)+TETA(I+1,J)-TETAI(I+1,J)+
$          TETA(I+1,J+1)-TETAI(I+1,J+1)
          TEORM=TETAM/3
34      VOL=VOL+TEORM*VMALH/2
      DO 35 I=NLS,NTL-1
          DO 35 J=1,NTC-1
              TETAM=TETA(I,J)-TETAI(I,J)+TETA(I+1,J)
$              -TETAI(I+1,J)+TETA(I,J+1)-TETAI(I,J+1)
$              +TETA(I+1,J+1)-TETAI(I+1,J+1)
              TEORM=TETAM/4
35      VOL=VOL+TEORM*VMALH
      VOL1=2*VOL/1000
      VOLZR=0
      IF(NTL.GE.NZR) THEN
          VMALH=DELTAX*DELTAZ*LCOMP
          DO 25 I=1,NLS-1
              DO 25 J=1,(NCS+I-2)
                  TETAM=TETA(I,J)-TETAI(I,J)+TETA(I+1,J)
$                  -TETAI(I+1,J)+TETA(I,J+1)-TETAI(I,J+1)
$                  +TETA(I+1,J+1)-TETAI(I+1,J+1)
                  TEORM=TETAM/4
25      VOLZR=VOLZR+TEORM*VMALH
          DO 26 I=1,NLS-1
              J=NCS+I-1
              TETAM=TETA(I,J)-TETAI(I,J)+TETA(I+1,J)
$              -TETAI(I+1,J)+TETA(I+1,J+1)-TETAI(I+1,J+1)
              TEORM=TETAM/3
26      VOLZR=VOLZR+TEORM*VMALH/2
          DO 27 I=NLS,NZR-1
              DO 27 J=1,NTC-1
                  TETAM=TETA(I,J)-TETAI(I,J)+TETA(I+1,J)
$                  -TETAI(I+1,J)+TETA(I,J+1)-TETAI(I,J+1)
$                  +TETA(I+1,J+1)-TETAI(I+1,J+1)
                  TEORM=TETAM/4
27      VOLZR=VOLZR+TEORM*VMALH
          VOLZR=2*VOLZR/1000
      ENDIF
      WRITE(7,81073) VOL1,VOLZR
      WRITE(6,81073) VOL1,VOLZR
81073      FORMAT(/,1X,'FASE DE REDISTRIBUICAO',1X,'VOL.
$      INFILTRADO',/,1X,'VOLT.=',F10.3,2X,'(litros)',
$      'VOLZR1=',F10.3,2X,'(litros)')
      DO 4446 I=1,NTL
          DO 4446 J=1,NTC-1
              N3=2*NTC-J
4446      TETA(I,N3)=TETA(I,J)

```

```

      ML=ML+1

      NOMEFI='MATRIZ'//NUMERO(ML)//'.DAT'
      OPEN(1,FILE=NOMEFI,STATUS='new')
      NTC3=2*NTC-1

      DO 8057 I=1,NTC3
8057          X(I)=1
      DO 2060 J=1,NTL
2060          Y(J)=J
      WRITE(1,*) (X(I),I=1,NTC3)
      WRITE(1,*) (Y(J),J=1,NTL)
      DO 15056 J=1,NTC3
15056          WRITE(1,*) (TETA(I,J),I=1,NTL)

      CLOSE(1)
      MCONT=MCONT+1

      ENDIF
      Return
      End

```

SUB-ROTINA INCR LINES F3

G Increasing the number of lines of the domain, using the variables
 G ACTIV, NVEZES and INCR, for Fase 1.
 G The variable ACTIV sets the difference of matric potential, at the
 G last line, that is necessary to activate the profile
 G The variable NVEZES sets the number of times that the profile will
 G be activated
 G The variable INCR sets the number of lines increased each time

```

Subroutine IncrLinesF3 (HM, NCS, NLS, GAMA, DIF, NTL, NPN1, NPN2,
*                      CKS, BETA11, BETA, ALFA, TETAR, TETAS, C,
*                      NTC, INCR, ACTIV, H, HI, TETA, KAPA, NPN3,
*                      NPN4)

      Real KAPA(200,200)

      Dimension HM(2000,2000), H(200,200), HI(200,200), TETA(200,200),
*              C(200,200)

      IF (ABS(DIF).GE.ACTIV) THEN

C          IF (NTL.GT.80) GOTO 7666 !
          IF (NTL.GT.80) CLOSE (7) ! melissa on 28.Feb.2005
          DO 19519 I=NTL+1,(NTL+INCR+2)
              DO 19519 J=1,NTC
                  H(I,J)=HI(I,J)
                  ABH=ABS(H(I,J))
                  TETA(I,J)=(TETAS-TETAR)/((1+(ALFA*ABH)
$                      **BETA)**BETA11)+TETAR
                  C(I,J)=ALFA*(TETAS-TETAR)*BETA*BETA11
$                      *(1+(ALFA*ABH)**BETA)
$                      **BETA11-1)*(ALFA*ABH)**(BETA-1)/(((1
$                      +(ALFA*ABH)**BETA)**BETA11)**2)
19519          KAPA(I,J)=CKS*EXP(GAMA*(TETA(I,J)-(TETAS)))
              DO 78455 I=1,NPN3
                  DO 78455 J=1,I+NTC
78455          HM(I,J)=0
              DO 78466 I=NPN3+1,NPN4
                  DO 78466 J=I-NTC,I+NTC
78466          HM(I,J)=0
              DO 78477 I=NPN4+1,NPN1
                  DO 78477 J=I-NTC,NPN1
78477          HM(I,J)=0
              DO 78488 I=1,NPN1
                  HM(I,NPN2)=0
78488          NTL=NTL+INCR
                  LL=0
                  DO 1888 I=1,NLS-2
1888          LL=LL+I
                  LL3=NTC*(NTL-(NLS-1))
                  NPN1=NCS*(NLS-1)+LL+LL3

                  NPN2=NPN1+1

```

```

      NPN3=NPN1-LL3
      NPN4=NPN1-NTC
C WRITE(*,3224) NPN1,NPN2,NPN3,NPN4
C3224 FORMAT(/,5X,'NPN1=',I4,3X,'NPN2=',I4,3X,'NPN3=',
C $ I4,3X,'NPN4=',I4)
      ENDIF
      Return
      End

```

SUB-ROTINA INCIDFASE3

```

!   Determining the coefficients of the Incidence Matrix,
!   Aij, Bij, Dij, Eij, Fij and Gij, for the Fase 3, according to the
!   equation 4 of Tabuada et. al (1995), that is the discretization of
!   two-dimensional Richards' Equation.
!
!   The Fase 3 (three) means the redistribution fase, occurring when
!   water moves in the soil after infiltration ended.
!
!   Input variables: NLS, NCS, NTL, NTC, NCFS, DELTAX, DELTAZ, CANG, CKS, GAMA,
!   TETAS, TETAR, ALFA, BETA (from input file dados.dat)
!   H(i,j) (values of matric potential, from SoilMoistConf3)
!   HI(i,j) (initial values of matric potential, from Bidisul)
!   KAPA(i,j) (from SoilMoistConf3)
!   BETA11 (m de Van Genuchten, from SoilMoistConf3)
!   C(i,j) (derivation of Van Genuchten equation, from SoilMoistConf3)
!   DELTAT1 (DELTAT in hours, from Bidisul)
!
!   Output variables: AIJ, BIJ, EIJ, FIJ, DIJ, GIJ (coefficients of the incidence matrix,
!   to ???????)
!
      Subroutine incidFase3(DELTAT1, NCFS, BETA11, BETA, ALFA, TETAR, H,
      * TETAS, GAMA, C, CKS, CANG, DELTAZ, DELTAX,
      * NLS, KAPA, HI, NTC, NTL, NCS, AIJ, BIJ, DIJ,
      * EIJ, FIJ, GIJ, T, INCR, NVEZES)

      REAL KAPA(200,200)

      Dimension AIJ(200,200),BIJ(200,200),DIJ(200,200), H(200,200),
      * EIJ(200,200),FIJ(200,200),GIJ(200,200), C(200,200)

C      CALCULO DOS Aij
C
1003      DO 3575 I=1,NLS-1
          DO 3575 J=2,NCS+1-1
3575      AIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+KAPA(I,J-1))* .5/DELTAX**2

          DO 3580 I=NLS,NTL
          DO 3580 J=2,NTC
3580      AIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+KAPA(I,J-1))* .5/DELTAX**2

          DO 3585 I=1,NTL
3585      AIJ(I,1)=(KAPA(I,1)+KAPA(I,2))* .5/DELTAX**2
C      CALCULO DOS Bij
C
      DO 3590 I=2,NLS
          DO 3590 J=1,NCS+I-2
3590      BIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+KAPA(I-1,J))* .5/DELTAX**2

          DO 3591 I=2,NLS-1
          ABH=ABS((1-(CANG*DELTAX)/DELTAX)*H(I,NCS+
          $ I-1)+(CANG*DELTAX/DELTAX)*H(I,NCS+I-2)-DELTAX)
          CKAP=CKS*EXP(GAMA*(((TETAS-TETAR)/
          $ (1+(ALFA*ABH)**BETA)**BETA11)
          $ +TETAR)-(TETAS)))
3591      BIJ(I,NCS+I-1)=(KAPA(I,NCS+I-1)+CKAP)
          $ * .5/DELTAX**2
          I=NLS

          DO 3592 J=NTC-NCFS+1,NTC
          ABH=ABS(H(NLS+1,J)-2*DELTAX)
          CKAP=CKS*EXP(GAMA*(((TETAS-TETAR)/
          $ (1+(ALFA*ABH)**BETA)**BETA11)
          $ +TETAR)-(TETAS)))
3592      BIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+CKAP)* .5/DELTAX**2

          DO 3595 I=NLS+1,NTL

```



```

DO 3595 J=1,NTC
3595 BIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+KAPA(I-1,J))* .5/DELTAZ**2

DO 3600 J=1,NCS
    ABH=ABS(H(2,J)-2*DELTAZ)
    CKAP=CKS*EXP(GAMA*(((TETAS-TETAR)/(1+(ALFA
$ *ABH)**BETA)**BETA11)+TETAR)-(TETAS)))
3600 BIJ(1,J)=(KAPA(1,J)+CKAP)*.5/DELTAZ**2
C    CALCULO DOS Eij
C
DO 3605 I=1,NLS-1
    DO 3605 J=1,NCS+I-1
3605 EIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+KAPA(I+1,J))* .5/DELTAZ**2

DO 3610 I=NLS,NTL-1
    DO 3610 J=1,NTC
3610 EIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+KAPA(I+1,J))* .5/DELTAZ**2

DO 3615 J=1,NTC
    ABH=ABS(HI(NTL+1,J))
    CKAP=CKS*EXP(GAMA*(((TETAS-TETAR)/(1+
$ (ALFA*ABH)**BETA)**BETA11)+TETAR)-(TETAS)))
3615 EIJ(NTL,J)=(KAPA(NTL,J)+CKAP)*.5/DELTAZ**2
C    CALCULO DOS Fij
C
DO 3620 I=1,NLS-1
    DO 3620 J=1,NCS+I-2
3620 FIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+KAPA(I,J+1))* .5/DELTAZ**2

DO 3625 I=NLS,NTL
    DO 3625 J=1,NTC-1
3625 FIJ(I,J)=(KAPA(I,J)+KAPA(I,J+1))* .5/DELTAZ**2

$ FIJ(1,NCS)=(KAPA(1,NCS)+KAPA(1,NCS-1))* .5
$ /DELTAZ**2

DO 3630 I=2,NLS-1
    ABH=ABS(DELTAZ/(DELTAZ*CANG)*H(I+1,NCS+I-1)+
$ (1-DELTAZ/(CANG*DELTAZ))*H(I,NCS+I-1)-
$ DELTAZ/CANG)
    CKAP=CKS*EXP(GAMA*(((TETAS-TETAR)/(1+
$ (ALFA*ABH)**BETA)**BETA11)+TETAR)-(TETAS)))
3630 FIJ(I,NCS+I-1)=(KAPA(I,NCS+I-1)+CKAP)*.5
$ /DELTAZ**2
DO 3635 I=NLS,NTL
3635 FIJ(I,NTC)=(KAPA(I,NTC)+KAPA(I,NTC-1))* .5
$ /DELTAZ**2
C    CALCULO DOS Dij E Gij
C
DO 3640 I=1,NLS-1
    DO 3640 J=1,NCS+I-1
        DIJ(I,J)=-C(I,J)/DELTAT1-AIJ(I,J)-BIJ(I,J)
        -EIJ(I,J)-FIJ(I,J)
$ GIJ(I,J)=-C(I,J)/DELTAT1*H(I,J)-DELTAZ
3640 $ *BIJ(I,J)+DELTAZ*EIJ(I,J)
$

DO 3645 I=NLS,NTL
    DO 3645 J=1,NTC
        DIJ(I,J)=-C(I,J)/DELTAT1-AIJ(I,J)-
$ BIJ(I,J)-EIJ(I,J)-FIJ(I,J)
3645 $ GIJ(I,J)=-C(I,J)/DELTAT1*H(I,J)-DELTAZ
$ *BIJ(I,J)+DELTAZ*EIJ(I,J)

WRITE(8888,4650) T/60
4650 FORMAT(1X,' Instante T= ',F5.1,2X,'min/')

WRITE(8888,4660)
4660 FORMAT(1X,' matriz dos coeficientes AIj(i,j) ',/)
DO 3655 I=1,NLS-1
3655 WRITE(8888,4665) (aij(I,J),J=1,NCS+I-1)
DO 3660 I=NLS,NTL+(NVEZES*INCR+2)
3660 WRITE(8888,4665) (aij(I,J),J=1,NTC)

WRITE(8888,4665)
4665 FORMAT(1X,' matriz dos coeficientes Bij(i,j) ',/)
DO 3670 I=1,NLS-1
3670 WRITE(8888,4665) (bij(I,J),J=1,NCS+I-1)
DO 3675 I=NLS,NTL+(NVEZES*INCR+2)
3675 WRITE(8888,4665) (bij(I,J),J=1,NTC)

```

```

WRITE(8888,4680)
4680   FORMAT(1X,'/' matriz dos coeficientes Eij(i,j) ',/')
DO 3685 I=1,NLS-1
3685   WRITE(8888,5665) (Eij(I,J),J=1,NCS+I-1)
DO 3690 I=NLS,NTL+(NVEZES*INCR+2)
3690   WRITE(8888,5665) (Eij(I,J),J=1,NTC)

WRITE(8888,3695)
3695   FORMAT(1X,'/' matriz dos coeficientes Fij(i,j) ',/')
DO 3700 I=1,NLS-1
3700   WRITE(8888,5665) (Fij(I,J),J=1,NCS+I-1)
DO 3705 I=NLS,NTL+(NVEZES*INCR+2)
3705   WRITE(8888,5665) (Fij(I,J),J=1,NTC)

WRITE(8888,3710)
3710   FORMAT(1X,'/' matriz dos coeficientes Gij(i,j) ',/')
DO 3715 I=1,NLS-1
3715   WRITE(8888,5665) (Gij(I,J),J=1,NCS+I-1)
DO 3720 I=NLS,NTL+(NVEZES*INCR+2)
3720   WRITE(8888,5665) (Gij(I,J),J=1,NTC)

WRITE(8888,3725)
3725   FORMAT(1X,'/' matriz dos coeficientes Dij(i,j) ',/')
DO 3730 I=1,NLS-1
3730   WRITE(8888,5665) (Dij(I,J),J=1,NCS+I-1)
DO 3735 I=NLS,NTL+(NVEZES*INCR+2)
3735   WRITE(8888,5665) (Dij(I,J),J=1,NTC)

5665   FORMAT(3X,40E10.3//)

      return
end

```