

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

QUANTIFICAÇÃO E ANÁLISE DO USO DA ÁGUA EM
PRÁTICAS DE AGRICULTURA IRRIGADA
NA BACIA DO DESCOBERTO – DF

PABLO DE ARAUJO FERREIRA

ORIENTADOR: SERGIO KOIDE

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E
RECURSOS HÍDRICOS

PUBLICAÇÃO: PTARH.DM – 082A/05

BRASÍLIA/DF: JULHO – 2005

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

QUANTIFICAÇÃO E ANÁLISE DO USO DA ÁGUA EM
PRÁTICAS DE AGRICULTURA IRRIGADA
NA BACIA DO DESCOBERTO – DF.

PABLO DE ARAUJO FERREIRA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA FACULDADE DE
TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU
DE MESTRE EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E RECURSOS
HÍDRICOS.

APROVADA POR:

Prof. Sergio Koide, PhD (ENC-UnB)
(Orientador)

Prof. Nabil Joseph Eid, DSc (ENC-UnB)
(Examinador Interno)

Prof. Luiz Rafael Palmier, PhD (UFMG)
(Examinador Externo)

BRASÍLIA/DF, 18 DE JULHO DE 2005

FICHA CATALOGRÁFICA

FERREIRA, PABLO DE ARAUJO

Quantificação e Análise do Uso da Água em Práticas de Agricultura Irrigada na Bacia do Descoberto – DF [Distrito Federal] 2005.

xxi, 152p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, 2005). Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1.Solo

2.Fluxo de Água na Zona Não Saturada

3.Modelagem Numérica

4.Balanço Hídrico

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

FERREIRA, P.A. (2005). Quantificação e Análise do Uso da Água em Práticas de Agricultura Irrigada na Bacia do Descoberto – DF. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM-082A/05, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 152p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Pablo de Araujo Ferreira.

TÍTULO: Quantificação e Análise do Uso da Água em Práticas de Agricultura Irrigada na Bacia do Descoberto – DF.

GRAU: Mestre

ANO: 2005

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Pablo de Araujo Ferreira

QI I, CJ D, CS 115, Guará I.

71020-040 Brasília – DF – Brasil.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Sergio Koide, pela orientação durante todo o curso do mestrado e pelas oportunidades profissionais oferecidas.

Aos professores e colegas do mestrado (turma 2003), pelos conhecimentos transmitidos e pela convivência.

Ao Gustavo, pela valiosa ajuda na parte da simulação.

Aos proprietários Adir Frauzino, Otacílio, Edna Nakamura e Raimundo, pela confiança e consentimento, para que a parte experimental deste trabalho fosse realizada nas suas propriedades.

Ao técnico agrícola Emerson, por se mostrar sempre disponível em ajudar.

Ao Júnior e aos demais técnicos do projeto do Descoberto, pelo suporte no trabalho de campo.

Ao técnico Wantuir Caixeta, do Laboratório de Física do Solo, da EMBRAPA/CPAC-DF, pelos ensaios realizados.

À meu pai (*in memoriam*) e minha mãe, pelo apoio na formação moral e intelectual de seus filhos.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo.

DEDICATÓRIA

À Marise,
mulher da minha vida.

RESUMO

QUANTIFICAÇÃO E ANÁLISE DO USO DA ÁGUA EM PRÁTICAS DE AGRICULTURA IRRIGADA NA BACIA DO DESCOBERTO – DF

Autor: Pablo de Araujo Ferreira

Orientador: Sergio Koide

Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos

Brasília, Julho de 2005

A estimativa das componentes do balanço hídrico e o estudo do consumo de água em práticas de agricultura irrigada são essenciais para avaliar as perdas ocorridas no processo de irrigação, como também analisar a eficiência desses sistemas em uma bacia hidrográfica. A utilização de ferramentas, tais como sensores que monitorem a variação do teor de umidade do solo ao longo do tempo e equipamentos que permitam, de forma direta ou indireta, a quantificação da lâmina de água utilizada nos processos de irrigação, é fundamental para esse tipo de estudo. A modelagem matemática do fluxo de água na zona não saturada do solo também pode ser uma ferramenta útil para permitir a estimação das perdas, principalmente para os perfis inferiores do solo (abaixo da zona radicular).

O objetivo que conduziu este trabalho foi o de estudar o balanço hídrico e o consumo de água em práticas de agricultura irrigada na bacia do Descoberto, por meio do monitoramento intensivo das condições de umidade do solo e das contribuições das componentes do balanço.

Foram selecionadas quatro propriedades e, em cada uma, selecionadas duas parcelas experimentais, onde foram instalados tensiômetros e umidímetros de bloco de gesso como sensores para o monitoramento da variação de tensão de água do solo ao longo do tempo. Esse monitoramento foi feito por meio de campanhas intensivas entre eventos de irrigação (turno de rega). A lâmina de água percolada para a zona abaixo da zona radicular foi estimada pela Equação de Darcy adaptada para velocidade do fluxo na zona não saturada. As perdas ocorridas no processo de irrigação foram quantificadas a partir das variáveis: lâmina real de água captada, lâmina de água aspergida, lâmina de água efetiva, interceptação (estimada pela equação empírica de Horton), evapotranspiração real da cultura e percolação.

Analisando os resultados obtidos foi verificada a baixa eficiência do sistema de irrigação por aspersão utilizado na bacia, além das grandes perdas ocorridas no sistema (perdas por vazamento), na aspersão (perdas pelo espalhamento e pela evaporação) e na aplicação da água sobre a parcela experimental (lâmina de água aplicada em excesso e percolação). Em quase todas as culturas irrigadas estudadas é necessária uma racionalização da irrigação, tendo em vista a importância da água dessa bacia para o abastecimento de Brasília.

ABSTRACT

QUANTIFICATION AND ANALYSIS OF USE OF WATER IN PRACTICES OF IRRIGATION AGRICULTURE IN DESCOBERTO BASIN – DF

Author: Pablo de Araujo Ferreira

Supervisor: Sergio Koide

Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos

Brasília, July 2005

The estimate of the water balance components and the study of water consumption in irrigated agriculture systems are essential to evaluate the losses in the irrigation process, as well as to analyze the efficiency of these systems in the catchment. The use of tools such as sensor devices to monitor soil humidity variation and others devices that allow directly or indirectly, the quantification of the water used in the irrigation processes, is basic for this type of study. Mathematical modeling of water flow in the soil unsaturated zone can also be a useful tool to allow the loss estimation, mainly to the underlain profiles of the ground (below of root zone).

The objective of this work was to study the water balance and the water consumption in irrigated agriculture practices in the basin of the Descoberto, by an intensive monitoring of soil water content and of the components of the water balance.

Four properties had been chosen and, in each of those, two experimental plots were selected, in which tensiometers and of plaster block were installed as sensors for monitoring of the time variation of the soil water tension. Intensive field work campaigns were carried out in during irrigation shifts. The deep percolation (height of water percolated to bellow the root zone) was estimated using Darcy's Equation adapted for the flow in the soil unsaturated zone. The losses occurred in the irrigation process were quantified using the variables: depth of water actually pumped, the sprinkled deep of water, water deep that reach the ground, interception (estimated by Horton's empirical equation), the actual evapotranspiration of the culture and the percolation.

Analyzing the obtained results a low efficiency of the sprinkler irrigation systems used in the areas was verified. Also was verified that there were great losses in the system (losses by leakage), in sprinkling (losses by scattering and evaporation) and in the application of the water on the experimental parcel (deep of water applied in excess and deep percolation). In almost all the irrigated cultures studied it is necessary to rationalize the irrigation in view of the importance of the waters of his catchment for supplying Brasília.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO	1
2 - OBJETIVOS.....	3
2.1 - OBJETIVO GERAL	3
2.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	4
3.1 - IRRIGAÇÃO	4
3.1.1 - Irrigação por aspersão	6
3.1.2 - Desempenho dos sistemas de irrigação.....	7
3.1.3 - Interceptação	8
3.1.4 - Perdas de carga em sistemas pressurizados.....	8
3.1.4.1 - Perdas de carga distribuídas	9
3.1.4.2 - Perdas de carga localizadas	10
3.1.5 - Medição de água consumida em práticas de irrigação	10
3.2 - SOLO	11
3.2.1 - Granulometria do solo	12
3.2.2 - Permeabilidade	15
3.2.3 - Infiltração	16
3.2.4 - Curva característica de umidade do solo	17
3.2.5 - Determinação do teor de umidade do solo	19
3.2.5.1 - Método padrão de estufa	19
3.2.5.2 - Tensiômetro.....	20
3.2.5.3 - Blocos de resistência elétrica	21
3.2.6 - Água disponível no solo.....	22
3.2.7 - Evapotranspiração	23
3.2.7.1 - Evaporação	23
3.2.7.2 - Transpiração	23
3.2.7.3 - Evapotranspiração	24
3.2.8 - Fluxo de água na zona não saturada do solo.....	26

4 - TRABALHOS RECENTES SOBRE O MONITORAMENTO DA FRENTE DE UMIDADE NO SOLO	30
4.1 - MONITORAMENTO POR MEIO DE EQUIPAMENTOS	30
4.2 - MODELAGEM DO FLUXO DE ÁGUA NA ZONA NÃO SATURADA DO SOLO	32
5 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
5.1 - SELEÇÃO DAS PROPRIEDADES E INSTALAÇÃO DAS PARCELAS EXPERIMENTAIS.....	43
5.2 - SOLO	45
5.2.1 - Granulometria média do solo e massa específica do solo	46
5.2.2 - Curva de retenção de água no solo	47
5.2.3 - Coeficiente de permeabilidade	50
5.2.3.1 - Coeficiente de permeabilidade do solo saturado	50
5.2.3.2 - Coeficiente de permeabilidade do solo em função de θ	52
5.3 - MONITORAMENTO DO FLUXO DE ÁGUA NA ZONA NÃO SATURADA DO SOLO	53
5.3.1 - Tensiômetros.....	53
5.3.2 - Umidímetros de bloco de gesso.....	56
5.3.3 - Campanha intensiva de monitoramento da frente de umidade no solo	58
5.4 - BALANÇO HÍDRICO	60
5.4.1 - Parâmetros necessários para a determinação do balanço hídrico.....	60
5.4.1.1 - Medição volumétrica das vazões das bombas hidráulicas pelo bombeamento de um volume de água conhecido (vazão real captada).....	60
5.4.1.2 - Medição indireta das vazões das bombas hidráulicas por medidas da corrente elétrica de alimentação dos motores das bombas hidráulicas.....	61
5.4.1.3 - Medição, de forma direta, das vazões dos aspersores e canhões hidráulicos (vazão aspergida)	64
5.4.1.4 - Medição, de forma indireta, das vazões dos aspersores e canhões hidráulicos, por meio do ensaio da uniformidade de aplicação da água (vazão efetiva aplicada).....	64
5.4.1.5 - Interceptação	65
5.4.1.6 - Evapotranspiração real da cultura	67
5.4.1.7 - Modelagem matemática do fluxo de água na zona não saturada do solo..	68

5.4.2 - Perdas hídricas	70
5.4.2.1 - Perda hídrica ocorrida nos sistemas de irrigação	70
5.4.2.2 - Perda hídrica ocorrida nas parcelas experimentais.....	70
5.4.2.3 - Perda hídrica total.....	71
6 - ESTUDO DE CASOS	72
6.1 - DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	72
6.2 - MÉTODOS DE IRRIGAÇÃO PRATICADOS NA BACIA DO DESCOBERTO.....	73
7 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	75
7.1 - SOLO	75
7.1.1 - Granulometria média do solo e massa específica do solo	75
7.1.2 - Curva de retenção de água no solo	78
7.1.3 - Coeficiente de permeabilidade	81
7.1.3.1 - Coeficiente de permeabilidade do solo saturado	81
7.1.3.2 - Coeficiente de permeabilidade do solo em função de θ	83
7.2 - MONITORAMENTO DO FLUXO DE ÁGUA NA ZONA NÃO SATURADA DO SOLO	83
7.2.1 - Tensiômetros.....	83
7.2.2 - Umidímetro de bloco de gesso	88
7.3 - BALANÇO HÍDRICO	96
7.3.1 - Parâmetros necessários para a determinação do balanço hídrico.....	96
7.3.1.1 - Vazões reais das bombas hidráulicas determinadas pelo bombeamento de um volume de água conhecido	96
7.3.1.2 - Vazões estimadas das bombas hidráulicas determinadas por medições da corrente elétrica de alimentação dos seus motores elétricos	98
7.3.1.3 - Vazões dos aspersores e canhões hidráulicos medidas de forma direta (vazão aspergida)	102
7.3.1.4 - Vazões dos aspersores e canhões hidráulicos, medidas de forma indireta por meio do ensaio da uniformidade de aplicação da água (vazão efetiva aplicada).....	104
7.3.1.5 - Interceptação	105
7.3.1.6 - Evapotranspiração real da cultura	107

7.3.1.7 - Modelagem matemática do fluxo de água na zona não saturada do solo	109
7.3.2 - Cálculo das perdas hídricas.....	112
7.3.2.1 - Perda hídrica nos sistemas de irrigação.....	112
7.3.2.2 - Perda hídrica nas parcelas experimentais.....	116
7.3.2.3 - Perda hídrica total.....	120
8 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	122
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	125
APÊNDICES	131
A – TABELAS DE CONVERSÃO DE R.P.M. PARA TENSÃO MÉDIA NA AMOSTRA CENTRIFUGADA PARA OS TRÊS MODELOS DE CENTRÍFUGA	132
B – TABELAS COM DATAS E HORÁRIOS DE SECAGEM DAS AMOSTRAS DE SOLO, PARA A DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DO SOLO.....	136
C – DADOS RELACIONADOS AO ENSAIO DO LEVANTAMENTO DA UNIFORMIDADE DE APLICAÇÃO DA ÁGUA DOS ASPERSORES.....	138
D – VALORES DO <i>K_C</i>, DO <i>K_S</i>, DA <i>ET_O</i> E DA <i>ET_{RC}</i>, PARA CADA CAMPANHA INTENSIVA DE MONITORAMENTO DO FLUXO DE ÁGUA NA ZONA NÃO SATURADA DO SOLO.....	145
E – EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA BRASÍLIA, ANO DE 2004.....	150

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Dinâmica do uso da água no mundo por setor [$\text{km}^3/\text{ano}(\%)$] (Fonte: Shiklomanov, 1999, modificado).	5
Tabela 3.2 – Evolução das áreas irrigadas no Brasil entre os anos de 1950 e 1998 (Fonte: Lima et al., 1999).	5
Tabela 3.3 – Métodos de irrigação e suas subclassificações.	6
Tabela 5.1 – Datas em que as parcelas experimentais foram instrumentadas.	44
Tabela 5.2 – Culturas nas parcelas experimentais e profundidades radiculares estimadas (m).	45
Tabela 5.3 – Áreas dos talhões onde as parcelas experimentais foram instaladas (m^2).	45
Tabela 5.4 – Turno de rega relacionado às parcelas experimentais de cada propriedade (Dados da tabela expressos em hora).	59
Tabela 5.5 – Datas das cinco campanhas intensivas de monitoramento da frente de umidade no solo, realizadas nas quatro propriedades, durante o ano de 2004.	60
Tabela 5.6 – Alturas das culturas utilizadas no cálculo da interceptação (Dados da tabela expressos em m).	66
Tabela 7.1 – Classificação dos perfis dos solos de cada propriedade.	77
Tabela 7.2 – Massa específica para os cinco perfis do solo de cada propriedade.	78
Tabela 7.3 – Parâmetros obtidos no ensaio da curva de retenção, propriedade P3.	81
Tabela 7.4 – Coeficiente de permeabilidade do solo saturado.	82
Tabela 7.5 – Leituras obtidas no umidímetro de bloco de gesso na propriedade P3, Parcela A, no perfil a 0,90m, durante a 2ª campanha intensiva.	94
Tabela 7.6 – Vazão real das bombas hidráulicas (lâmina real de água por unidade de tempo) utilizadas nos sistemas de irrigação [Dados da tabela expressos em m^3/h (mm/h)].	98
Tabela 7.7 – Diferença de nível entre as bombas hidráulicas e as parcelas experimentais (Dados da tabela expressos em m).	98
Tabela 7.8 – Vazão estimada das bombas hidráulicas (lâmina estimada de água por unidade de tempo), determinada por meio da potência dos motores elétricos calculada [Dados da tabela expressos em m^3/h (mm/h)].	99

Tabela 7.9 – Vazão estimada das bombas hidráulicas, determinada por meio da potência nominal do motor elétrico (Dados da tabela expressos em m ³ /h).	101
Tabela 7.10 – Vazão estimada das bombas hidráulicas determinada pela potência do motor elétrico calculada, utilizando a perda de carga medida (Dados da tabela expressos em m ³ /h).	102
Tabela 7.11 – Vazão média dos aspersores (vazão média dos aspersores expressa em lâmina de água aspergida por unidade de tempo, por linha de aspersores) [Dados da tabela expressos em m ³ /h (mm/h)].	103
Tabela 7.12 – Lâmina de água efetiva por unidade de tempo, por linha de aspersores e por canhão hidráulico (Dados da tabela expressos em mm/h).	104
Tabela 7.13 – Interceptação da superfície dos vegetais, para cada evento de irrigação, ocorrida em cada campanha intensiva de monitoramento do fluxo de água na zona não saturada do solo: Duração de cada evento de irrigação (T); Lâmina de água efetiva aplicada em cada evento de irrigação (H _A); e Interceptação ocorrida em cada evento de irrigação (H _I).	106
Tabela 7.14 – <i>ET_o</i> e <i>ET_{rc}</i> para cada campanha intensiva de monitoramento do fluxo de água na zona não saturada do solo, em cada propriedade (Dados da tabela expressos em mm).	108
Tabela 7.15 – Lâmina de água que atinge o solo (H _{AS}) e lâmina de água percolada (H _P).	111
Tabela 7.16 – Perda hídrica total em cada campanha intensiva, para cada parcela experimental, de cada propriedade: Lâmina real de água captada (H _{RC}); Lâmina de água efetiva – interceptação – percolação (H _S); e perda hídrica total (P _{HT}).	120
Tabela 7.17 – Lâmina real de água captada, lâmina total de água perdida e lâmina total de água desperdiçada, por m ² , na bacia do Descoberto, no período da seca, no ano de 2004.	121

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Corte esquemático de um aspersor rotativo (Fonte: Bernardo, 1995).	7
Figura 3.2 – Classificação textural dos solos de acordo com o tamanho das partículas (Fonte: Klar, 1984, modificado).	13
Figura 3.3 – Curva granulométrica para alguns tipos de solos (Hillel, 1998, modificado).	13
Figura 3.4 – Diagrama textural dos solos (Prevedello, 1996).	15
Figura 3.5 – Curva característica de umidade do solo para três solos de diferentes texturas (Klar, 1994, modificado).	18
Figura 3.6 – Representação ilustrativa do fenômeno da histerese em uma curva característica de umidade (Ward e Robinson, 1990, <i>apud</i> Palmier, 1995, modificado).	19
Figura 4.1 – Distribuição da carga de pressão ocasionada devido à extração de água pelas raízes no 10º dia de simulação (Fonte: Wilderotter, 2003).	40
Figura 4.2 – Distribuição da carga de pressão ocasionada devido à extração de água pelas raízes no 75º dia de simulação (Fonte: Wilderotter, 2003).	40
Figura 5.1 – Parcela experimental localizada na propriedade P2. Em destaque: 1 e 2 – Tensiômetros; e 3, 4 e 5 – Fios condutores dos umidímetros de bloco de gesso.	44
Figura 5.2 – Trincheira para a coleta de amostra de solo, localizada na propriedade P3....	46
Figura 5.3 – Equipamentos utilizados para coleta de amostra indeformada de solo: 1 – Trado; 2 – Amostrador; 3 – Espátula para corte da amostra; e 4 – Trava do amostrador.	47
Figura 5.4 – Cápsulas utilizadas para acoplar as amostras de solo ao rotor da centrífuga: 1 – Cápsulas da centrífuga modelo H-70; 2 – Base inferior das cápsulas da centrífuga modelo H-70, destacando o fundo perfurado; 3 – Cápsulas das centrífugas modelos 1400PF e DIK-3560; 4 – Detalhe do furo lateral das cápsulas das centrífugas modelos 1400PF e DIK-3560.	49
Figura 5.5 – Centrífugas utilizadas na determinação da curva de retenção de água no solo: 1 – Centrífuga modelo H-70; 2 – Visão interna da centrífuga destacando o rotor e as cápsulas da centrífuga modelo H-70; 3 – Centrífuga modelo 1400 PF; 4 – Centrífuga modelo DIK-560.	49

Figura 5.6 – Permeâmetro de carga constante (Fonte: Manual do fabricante Daiki Rika Kogyo Co., LTD.).....	52
Figura 5.7 – Modelos dos tensiômetros utilizados na fase experimental: 1 e 2 – Tensiômetros com manômetro de vácuo; e 3 e 4 – Tensiômetros com coluna de mercúrio.	54
Figura 5.8 – Instalação dos tensiômetros (1 e 2) e trado utilizado na abertura dos furos (3 e 4).	55
Figura 5.9 – Umidímetro de bloco de gesso e aparelho de leitura utilizado.	57
Figura 5.10 – Curva de calibração do umidímetro de bloco de gesso (Fonte: Manual do fabricante Delmhorst Instrument CO.).	58
Figura 5.11 – Nível a Laser (1) e detector do laser, que fica preso à régua (2).....	62
Figura 5.12 – Croqui do sistema de irrigação.....	63
Figura 5.13 – Ensaio do levantamento da uniformidade de aplicação da água dos aspersores: 1 – Parcela A, propriedade P2; e 2 – Parcela B, propriedade P1...	65
Figura 5.14 – Malha triangular utilizada na simulação numérica do programa SSFLO.	69
Figura 7.1 – Granulometria média do solo, propriedade P1.....	75
Figura 7.2 – Granulometria média do solo, propriedade P2.....	76
Figura 7.3 – Granulometria média do solo, propriedade P3.....	76
Figura 7.4 – Granulometria média do solo, propriedade P4.....	77
Figura 7.5 – Curva de retenção de água no solo, propriedade P1.	79
Figura 7.6 – Curva de retenção de água no solo, propriedade P2.	79
Figura 7.7 – Curva de retenção de água no solo, propriedade P3.	80
Figura 7.8 – Curva de retenção de água no solo, propriedade P4.	80
Figura 7.9 – Monitoramento da frente de umidade no solo, propriedade P1.	84
Figura 7.10 – Monitoramento da frente de umidade no solo, propriedade P2.	85
Figura 7.11 – Monitoramento da frente de umidade no solo, propriedade P3.	86
Figura 7.12 – Monitoramento da frente de umidade no solo, propriedade P4.	87
Figura 7.13 – Leituras umidímetro versus leituras tensiômetro, propriedade P2, Parcela B, 3º e 4º campanhas intensivas.	90
Figura 7.14 – Leituras umidímetro versus leituras tensiômetro, propriedade P2, Parcela B, 3º e 4º campanhas intensivas.	90
Figura 7.15 – Leituras umidímetro versus leituras tensiômetro, propriedade P4, Parcela B, 3º e 4º campanhas intensivas.	91

Figura 7.16 - Leituras umidímetro versus leituras tensiômetro: propriedade P2, Parcela A, 3º campanha intensiva; e propriedade P3, Parcela A, 2º campanha intensiva.....	92
Figura 7.17 – Comportamento dos umidímetros de bloco de gesso durante a 5º campanha intensiva de monitoramento do fluxo de água na zona não saturada do solo, propriedade P4, Parcela B.	93
Figura 7.18 – Influência da temperatura nas leituras obtidas com os umidímetros de bloco de gesso em laboratório, variando a temperatura do bloco e a temperatura do aparelho de leitura.	95
Figura 7.19 – Curva de calibração da caixa de água.	97
Figura 7.20 – Variação do coeficiente de permeabilidade em função do teor de umidade do solo e da tensão de sucção com o teor de umidade do solo.....	112
Figura 7.21 – Histograma da perda hídrica nos sistemas de irrigação, propriedade P1, Parcelas A e B.....	114
Figura 7.22 – Histograma da perda hídrica nos sistemas de irrigação, propriedade P2, Parcelas A e B.....	114
Figura 7.23 – Histograma da perda hídrica nos sistemas de irrigação, propriedade P3, Parcelas A e B.....	115
Figura 7.24 – Histograma da perda hídrica nos sistemas de irrigação, propriedade P4, Parcelas A e B.....	115
Figura 7.25 – Histograma da perda hídrica nas parcelas experimentais, propriedade P1, Parcelas A e B.....	117
Figura 7.26 – Histograma da perda hídrica nas parcelas experimentais, propriedade P2, Parcelas A e B.....	117
Figura 7.27 – Histograma da perda hídrica nas parcelas experimentais, propriedade P3, Parcelas A e B.....	118
Figura 7.28 – Histograma da perda hídrica nas parcelas experimentais, propriedade P4, Parcelas A e B.....	118

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

A	– Amperes
A_A	– Altura do anemômetro (m)
a_i	– Parâmetros ajustado ao local para a equação de Horton
A_G	– Coeficiente de ajuste da equação de van Genuchten
α	– Constante, tendo o sinal inverso do potencial matricial (m^{-1})
$\alpha(\theta)$	– Variável adimensional
A_m	– Área superficial do amostrador (cm^2)
atm	– Atmosfera
A_w	– Clima tropical segundo classificação de Köppen
b_i	– Parâmetros ajustado ao local para a equação de Horton
β	– Coeficiente de ajuste
C_c	– Capacidade de campo (%)
C	– Coeficiente de capacidade
$C(\Psi)$	– Coeficiente de capacidade em função do potencial matricial
$C(\theta)$	– Coeficiente de capacidade em função do teor de umidade
CH	– Canhão hidráulico
$\cos \varphi$	– Fator de potência
CUC	– Coeficiente de uniformidade de Christiansen
CUD	– Coeficiente de uniformidade de distribuição
C_{wa}	– Clima tropical de altitude segundo classificação de Köppen (temperatura média menor do que $18^\circ C$ para o mês mais frio do ano e maior do que $22^\circ C$ para o mês mais quente do ano)
C_{wb}	– Clima tropical de altitude segundo classificação de Köppen (temperatura média menor do que $18^\circ C$ para o mês mais frio do ano e menor do que $22^\circ C$ para o mês mais quente do ano)
C_{HW}	– Coeficiente de rugosidade de Hazen-Williams
d	– Diâmetro das partículas do solo
D	– Diâmetro
D_a	– Densidade aparente do solo (g/cm^3)
$D_s(\theta)$	– Difusividade em função do teor de umidade do solo (m^2/dia)
Δh	– Perda de carga localizada (m)
Δ_p	– Declividade da curva de pressão de vapor ($kPa\ ^\circ C^{-1}$)

Δt	– Intervalo de tempo
Δz	– Incremento de profundidade
DTA	– Disponibilidade Total de água no solo (mm)
ε	– Rugosidade absoluta equivalente (m)
e_a	– Pressão de vapor de saturação do ar (kPa)
E_a	– Transpiração real (cm/dia)
Efa	– Eficiência de aplicação (%)
EMBRAPA/ CPAC-DF	– Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados – DF
E_p	– Transpiração potencial (cm/dia)
e_s	– Pressão de vapor de saturação do ar (kPa)
ETc	– Evapotranspiração da cultura (mm)
ETo	– Evapotranspiração de referência (mm)
ETp	– Evapotranspiração potencial
η	– Coeficiente de rendimento global da bomba hidráulica (adimensional)
η_m	– Coeficiente de rendimento global do motor elétrico da bomba hidráulica (adimensional)
f	– Fator de atrito
F_c	– Força que atua sobre a massa da água da amostra do solo
FDR	– Reflectometria de domínio na frequência
F_{ma}	– Força exercida sobre a amostra de solo
G	– densidade de fluxo de calor do solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$)
γ	– Peso específico do fluido
$\gamma_{\text{água}}$	– Peso específico da água (n/m^3)
γ_p	– Constante psicométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$)
H	– Altura manométrica (m)
h	– Carga de pressão ou potencial matricial
H_A	– Lâmina de água efetiva aplicada em cada evento de irrigação (mm)
H_a	– Tensão da água no solo (mca)
H_{AS}	– Lâmina de água que atinge o solo (mm)
h_b	– Pressão de entrada de ar
h_f	– Perda de carga (m)
hg	– Constante igual a α , tendo o sinal inverso do potencial matricial
H_I	– Interceptação ocorrida em cada evento de irrigação (mm)

H_p	– Lâmina de água percolada (mm)
h_{pl}	– Altura da cultura (pés)
H_{RC}	– Lâmina real de água captada (mm)
H_s	– Lâmina de água efetiva – interceptação – percolação (mm)
I	– Intensidade da corrente elétrica (A)
I.S.S.S.	– Sociedade Internacional de Ciências do Solo
j	– Perda de carga unitária (adimensional)
k	– Coeficiente de permeabilidade do solo saturado
K	– Permeabilidade de saturação (m/dia)
$k(\psi)$	– Coeficiente de permeabilidade em função do potencial matricial
$k(\theta)$	– Coeficiente de permeabilidade em função da umidade do solo
K_c	– Coeficiente de cultura
k_i	– Coeficiente de permeabilidade do solo saturado em uma profundidade i qualquer (cm/s)
k_{LO}	– Coeficiente adimensional utilizado no cálculo da Δh
K_s	– Coeficiente de estresse
k_{sat}	– Coeficiente de permeabilidade do solo saturado
L_{Hg}	– Leitura da coluna de mercúrio (cm)
l	– Altura do cilindro do amostrador do solo, do permeâmetro de carga constante
λ	– Índice de porosidade
L_T	– Comprimento de tubulação (m)
L_{uj}	– Densidade radicular na camada j (cm/cm ³)
m_G	– Coeficiente de ajuste da equação de van Genuchten
m_{ca}	– Metro de coluna de água
μm	– Micrômetro
M_r	– Massa do recipiente ou do anel metálico onde se encontra a amostra do solo para o ensaio do método padrão de estufa
M_s	– Massa da amostra do solo com o recipiente depois de seca para o ensaio do método padrão de estufa
M_u	– Massa da amostra do solo com o recipiente quando coletada para o ensaio do método padrão de estufa
n	– Constante (adimensional)
n_i	– Parâmetros ajustado ao local para a equação de Horton
n_G	– Coeficiente de ajuste da equação de van Genuchten

n_p	– Número de copos pluviométricos
n_v	– Porosidade do solo
$N(Z)$	– Função da atividade radicular
OMS	– Organização Mundial da Saúde
ρ	– Massa específica (kg/m ³)
P_{HT}	– Perda hídrica total (%)
P_i	– Lâmina precipitada ou irrigada (polegada)
"	– Polegada
Pm	– Ponto de murcha (%)
Pot_m	– Potência do motor elétrico (W)
Ψ	– Potencial total da água no solo
Ψ_b	– Pressão de entrada do ar
Ψ_g	– Potencial gravitacional
Ψ_m	– Potencial matricial
Ψ_o	– Potencial osmótico
Ψ_p	– Potencial de pressão
Ψr	– Carga de pressão na interface solo-raiz (mca)
$\Psi_{(\theta)}$	– Função da carga de pressão da água no solo (mca)
PVC	– Policloreto de vinila
Q	– Vazão (m ³ /s)
q	– Densidade do fluxo (m/s)
Re	– Número de Reynolds
R_n	– Radiação livre na superfície da cultura (MJ m ⁻² dia ⁻¹)
R.P.M.	– Rotação por minuto
s	– Coordenada de posição qualquer x, y ou z
S_e	– Saturação efetiva do solo
S_i	– Interceptação (polegada)
S_j	– Extração da água na camada j (mm)
$S_{m\acute{a}x}$	– Extração máxima de água pelas raízes
S_s	– Termo de extração de água do solo
$S(\theta)$	– Extração de água pelas raízes (cm ³ /cm ³ dia)
$S(\theta, Z, t)$	– Termo de abaixamento volumétrico representando a taxa de extração de água pelas raízes (m ³ /m ³ dia)

TDR	– Reflectometria de domínio no tempo
T_m	– Temperatura média diária (°C)
θ	– Teor de umidade (adimensional)
θ_r	– Teor de umidade residual (adimensional)
θ_s	– Teor de umidade de saturação (adimensional)
UA	– Umidade real do solo para o cálculo do K_s (mm)
U_2	– Velocidade do vento a 2,0m de altura (m/s)
V	– Tensão elétrica (volts)
V_L	– Velocidade (m/s)
W_c	– Aceleração centrípeta (m/s ²)
$W(z)$	– Função da densidade do comprimento radicular
$\bar{x}$	– Média dos 25% do total de copos pluviométricos, com as menores precipitações
$\bar{X}$	– Média das precipitações
X_i	– Precipitação observada em cada copo pluviométrico
Z_r	– Profundidade radicular

1 - INTRODUÇÃO

A água é um bem essencial para a vida, porém, a cada dia, ela vem sendo degradada pela ação do homem no meio ambiente. A sua multiplicidade de usos vai desde o abastecimento humano até mesmo à diluição e ao transporte dos esgotos domésticos e industriais.

Segundo a OMS (Organização Mundial de Saúde), a quantidade de água necessária para que uma família de quatro pessoas tenha condição mínima de higiene e saúde é da ordem de 15 m³ por mês, totalizando o valor de 180 m³ por ano. Embora o suprimento global seja suficiente para fornecer esse valor de água à toda população mundial, e até mesmo a uma população maior do que a de hoje, muitas famílias vivem com um valor muito abaixo do recomendado. Isso se deve principalmente à distribuição não uniforme dos recursos hídricos e da população (Setti, 2001; Bouwer, 2002).

Com o crescimento populacional os conflitos pela utilização dos recursos hídricos se tornam cada vez maiores. Uma situação agravante é a do aumento das áreas irrigadas, que vão de encontro às preocupações ambientais, incluindo desde a manutenção da vida aquática e dos refúgios de animais selvagens, até a recreação e a vida das pessoas ribeirinhas (Bouwer, 2002).

A irrigação foi um artifício criado pelo homem para que os processos fisiológicos das culturas não fossem afetados em períodos de estiagem. De acordo com WHO (2003), a área utilizada pela agricultura é de aproximadamente 1,5 bilhões de hectares (11% de toda a superfície da Terra). Dessa área, cerca de 270 milhões de hectares (18%) são áreas irrigadas, gerando 40% de todos os alimentos produzidos no mundo.

Embora os conflitos pela água já sejam uma realidade, as práticas de irrigação nas próximas décadas serão responsáveis pela produção de 2/3 do suprimento alimentar necessário ao crescimento da população mundial, aumentando ainda mais a pressão no campo a partir da competição por água entre os diversos usuários e as preocupações ambientais, tornando-se importante a cobrança e a racionalização de seu uso. Conseqüentemente, os sistemas de irrigação terão que ser mais eficientes, visando

provavelmente a máxima produção econômica, e não a máxima produção fisiológica (English *et al.*, 2002).

Os recursos hídricos passam por certos problemas e conflitos que precisam necessariamente ser solucionados. A irrigação, embora seja um fator agregante na produção de alimentos, gera muitas discussões sobre os impactos adversos causados ao meio ambiente, à qualidade do solo e da água, à saúde pública e aos aspectos socioeconômicos de uma região. O estudo desenvolvido neste trabalho deverá, a partir da instrumentação de áreas experimentais, da determinação das propriedades físicas do solo e da modelagem matemática dos processos físicos ocorridos no meio, quantificar a água utilizada em áreas irrigadas na bacia do Descoberto. Com isso, o estudo visa fornecer subsídios para a verificação do uso racional da água em práticas de irrigação na bacia do Descoberto.

A estrutura da dissertação é apresentada da seguinte forma: No Capítulo 2 apresentam-se os objetivos que conduziram este trabalho. No Capítulo 3 é apresentada a fundamentação teórica abordando aspectos da irrigação, perdas de carga em sistemas pressurizados, medição de água consumida em práticas de irrigação, propriedades físicas do solo, fluxo de água em um meio não saturado e evapotranspiração. No Capítulo 4 apresenta-se um breve histórico procurando, de forma cronológica, discorrer sobre trabalhos de monitoramento da frente de umidade no solo. Esse capítulo foi dividido em dois tópicos: monitoramento por meio de equipamentos e modelagem do fluxo de água na zona não saturada do solo. No Capítulo 5 é apresentado o delineamento experimental, em que as componentes do balanço hídrico foram determinadas com enfoque no monitoramento da frente de umidade no solo e na quantificação das perdas ocorridas nos procedimentos de irrigação. No Capítulo 6 apresentam-se as características da área do estudo de caso. No Capítulo 7 são apresentados os resultados obtidos e as discussões feitas sobre esses resultados. Finalmente, no Capítulo 8 apresentam-se as conclusões e recomendações, além de sugestões para pesquisas futuras.

2 - OBJETIVOS

2.1 - OBJETIVO GERAL

Estudar, por meio do monitoramento e da modelagem matemática do fluxo de água na zona não saturada do solo, o balanço hídrico e o consumo de água em práticas de agricultura irrigada, com estudo de casos na bacia do Descoberto, DF.

2.2 - OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para o alcance do objetivo geral algumas etapas são propostas:

- Caracterizar fisicamente os tipos de solo utilizados para a prática agrícola na área de estudo;
- Verificar o comportamento da umidade do solo antes e logo após as irrigações praticadas usualmente nas propriedades da região;
- Estimar as componentes do balanço hídrico em áreas irrigadas do estudo de caso, utilizando como informações medidas volumétricas e medidas de energia elétrica; e
- Simular o comportamento do fluxo de água na zona não saturada do solo utilizando um modelo baseado na equação de Richards com o objetivo de identificar a perda de água para perfis abaixo da zona radicular.

3 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 - IRRIGAÇÃO

Como se pode observar na literatura, a irrigação no Brasil começou a ser praticada no século passado, principalmente a partir da década de 50, com a introdução de equipamentos estrangeiros e em decorrência do crescimento econômico e populacional do país.

Juntamente com os equipamentos estrangeiros vieram também as práticas de manejo utilizadas nos países exportadores, trazendo com isso uma série de problemas (erosão, degradação, salinização e, entre outras, a perda de nutrientes do solo), oriundos de um manejo inadequado ao tipo de solo e clima do Brasil.

A Tabela 3.1 mostra o uso da água no mundo em vários setores. Para os anos entre 1900 a 1995 os valores apresentados são calculados e, para os anos de 2000, 2010 e 2025, os valores apresentados são estimados.

Na Tabela 3.2 é mostrada a evolução das áreas irrigadas no Brasil entre os anos de 1950 a 1998. Observa-se que, entre os anos de 1994 a 1995, há um decréscimo da área irrigada.

Uma situação que merece a atenção no Brasil é a racionalização do uso da água nos manejos da irrigação, uma vez que, segundo Bernardo (1995), as práticas de irrigação utilizadas geralmente são baseadas em costumes herdados ou conveniências particulares, em lugar da utilização de procedimentos científicos para tal finalidade. O problema dessa situação é o desperdício de água gerado, pois o produtor rural, temendo um possível estresse hídrico pela cultura, irriga normalmente em excesso, procurando evitar a redução na produção (Lima *et al.*, 1999).

Bernardo (1995) destaca que para se fazer uma irrigação correta, deve-se: (1) analisar os fatores do solo, clima, planta e suprimento de água; (2) considerar os fatores do solo, água e de engenharia na determinação da aplicação de água; (3) avaliar a inter-relação entre irrigação e outros fatores culturais, tais como: variedades, densidade de plantio, fertilizante, colheitas etc; e (4) visar sempre à obtenção da melhor função econômica.

Tabela 3.1 – Dinâmica do uso da água no mundo por setor [km³/ano(%)] (Fonte: Shiklomanov, 1999, modificado).

Setor	Calculado								Estimado		
	1900	1940	1950	1960	1970	1980	1990	1995	2000	2010	2025
População (milhões de habitantes)			2542	3029	3603	4410	5285	5735	6181	7113	7877
Área irrigada (milhões de ha)	47,3	75,9	101	142	169	198	243	253	264	288	329
Uso agrícola	513(88,6)	895(82,3)	1080(78,1)	1481(75,3)	1743(69,0)	2112(66,5)	2425(66,7)	2504(66,1)	2605(65,6)	2817(63,6)	3189(60,9)
	*321(97,0)	586(96,1)	732(95,3)	1035(95,3)	1186(93,7)	1445(93,0)	1691(93,2)	1753(93,0)	1834(92,9)	1987(91,8)	2252(90,3)
Uso industrial	43,7(7,50)	127(11,7)	204(14,8)	339(17,2)	547(21,7)	713(22,5)	735(20,2)	752(19,9)	776(19,5)	908(20,5)	1170(22,3)
	*4,81(1,50)	11,9(2,00)	19,1(2,50)	30,6(2,80)	51,0(4,00)	70,9(4,60)	78,8(4,30)	82,6(4,40)	87,9(4,50)	117(5,40)	169(6,80)
Abastecimento doméstico	21,5(3,70)	58,9(5,40)	86,7(6,30)	118(6,00)	160(6,30)	219(6,90)	305(8,40)	344(9,10)	384(9,70)	472(10,7)	607(11,6)
	*4,61(1,40)	12,5(2,00)	16,7(2,20)	20,6(1,90)	28,5(2,30)	38,3(2,50)	45,0(2,50)	49,8(2,60)	52,8(2,70)	60,8(2,80)	74,1(3,00)
Reservatórios	0,300(0,100)	7,00(0,600)	11,1(0,80)	30,2(1,50)	76,1(3,00)	131(4,10)	167(4,60)	188(5,00)	208(5,20)	235(5,30)	269(5,10)
Total	579(100)	1088(100)	1382(100)	1968(100)	2526(100)	3175(100)	3633(100)	3788(100)	3973(100)	4431(100)	5235(100)
	*331(100)	610(100)	768(100)	1086(100)	1266(100)	1554(100)	1815(100)	1885(100)	1975(100)	2165(100)	2495(100)

*Volume de água efetivamente consumido.

Tabela 3.2 – Evolução das áreas irrigadas no Brasil entre os anos de 1950 e 1998 (Fonte: Lima et al., 1999).

Ano	1950	1955	1960	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1994	1995	1996	1997	1998
Área irrigada (10 ³ ha)	64	141	320	545	796	1100	1600	2100	2700	2800	2600	2656	2756	2870
Taxa de crescimento (% ao ano)		17,11	17,81	11,23	7,87	6,68	7,78	5,59	5,15	0,91	-7,14	2,15	3,77	4,14

Sales (1997, *apud* Souza, 2001) destaca que a análise da qualidade da irrigação, ou seja, da performance técnica do sistema, só é realizado quando há a associação entre os conceitos de eficiência com medidas de uniformidade, adequabilidade da irrigação e perdas no processo. Não deixando, é claro, de estabelecer a relação custo/benefício entre a qualidade da irrigação e o valor econômico da cultura.

Os métodos de irrigação praticados são classificados em três tipos conforme mostrado na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Métodos de irrigação e suas subclassificações.

Tabela 3.3 Métodos de irrigação e suas subclassificações.			
Irrigação por superfície	Irrigação por aspersão		Irrigação localizada
sistema de tabuleiros e faixas	sistema convencional		sistema de gotejamento
	sistema portátil	sistema fixo	
sistema de sulcos	sistema autopropelido		sistema de microaspersão
	sistema pivô central		

Em regiões onde a água é um fator limitante, o sistema de irrigação utilizado deve apresentar maior eficiência do uso da água. Em ordem decrescente, os sistemas de irrigação mais eficientes são: localizada, aspersão e superfície.

Entre os métodos citados, o de aspersão convencional é o método mais utilizado nas práticas de irrigação na bacia do Descoberto.

3.1.1 - Irrigação por aspersão

Na irrigação por aspersão a água é levada às plantas por meio de um mecanismo pressurizado que faz com que o jato de água se divida em pequenas gotas antes da distribuição sobre o terreno. O mecanismo que faz com que o jato de água seja fracionado é conhecido como aspersor, existindo características e modelos variados de acordo com o fabricante e a finalidade do equipamento.

Em um sistema de irrigação por aspersão, embora o princípio de funcionamento seja sempre o mesmo (fracionamento do jato de água), ele pode ser dividido em subclasses

como, sistema convencional (portátil ou fixo), sistema autopropelido, sistema pivô central e sistema lateral rolante, de acordo com o tipo de tubulação usada, o modo de instalação no campo, os tipos de conexões e engates entre tubos, a movimentação das linhas laterais e o tipo de manejo da irrigação (Bernardo, 1995).

Na Figura 3.1 observa-se um corte transversal de um aspersor onde se enfatiza seus principais componentes.

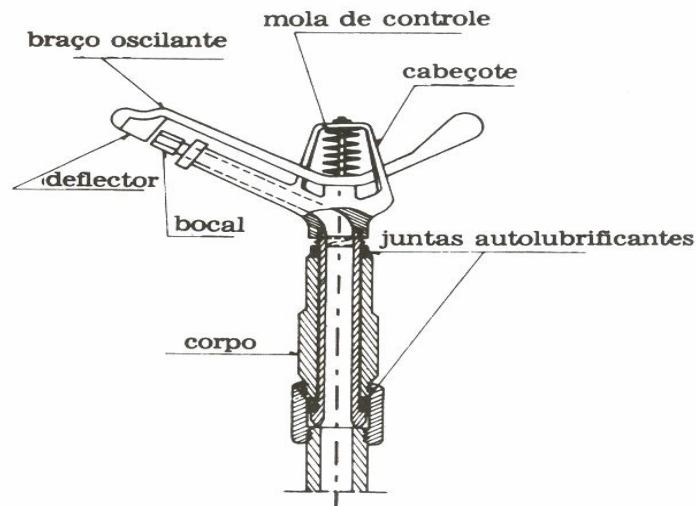


Figura 3.1 – Corte esquemático de um aspersor rotativo (Fonte: Bernardo, 1995).

3.1.2 - Desempenho dos sistemas de irrigação

O desempenho do sistema de irrigação por aspersão, em termos do aproveitamento da água, pode ser determinado por meio de alguns parâmetros: uniformidade de aplicação da água sobre o solo; perdas de água por percolação; perdas de água por vazamento nas tubulações; perdas de água por evaporação e arrastamento; e eficiência dos aspersores em relação à aplicação da água sobre o solo (Bernardo, 1995).

Um dos parâmetros de desempenho mais utilizados é o da eficiência dos aspersores em relação à aplicação da água sobre o solo, que consiste em relacionar o volume de água considerado útil para a cultura, isso é, o volume de água que atinge o solo e o volume total de água aspergida pelos aspersores ou canhões hidráulicos.

O parâmetro da eficiência dos aspersores em relação à aplicação da água sobre o solo pode confundir-se, em termos de nome, com o parâmetro da uniformidade de aplicação da água

sobre o solo. Segundo Bernardo (1995), o que é determinado por meio do parâmetro da uniformidade de aplicação é a variabilidade da lâmina de água aplicada por sistemas de irrigação, via aspersão.

3.1.3 - Interceptação

De acordo com Blake (1975, *apud* Tucci, 2001) a interceptação é a retenção de parte da precipitação, ou da irrigação, acima da superfície do solo. A interceptação da superfície vegetal é função de alguns fatores como as características da precipitação ou irrigação, as características das condições climáticas, o tipo e a densidade da vegetação e o período do ano em que ocorre um evento de precipitação ou é realizado um evento de irrigação.

A interceptação tem grande interferência no balanço hídrico de uma área experimental ou no balanço hídrico de uma bacia hidrográfica. A interceptação atua como um reservatório, o qual armazena uma parcela da precipitação ou irrigação (Tucci, 2001).

Um dos modos de estimar essa variável é por meio de equações empíricas. Tucci (2001) apresenta a equação de Horton:

$$S_i = a_i + b_i P_i^{n_i} \quad (3.1)$$

em que S_i é a interceptação (mm); P_i é a precipitação ou a irrigação (mm); e a_i , b_i e n_i são parâmetros relacionados às culturas.

Para a quantificação da interceptação, em ordem de grandeza, pode ser utilizada a tabela apresentada por Tucci (2001), onde os valores das constantes da equação de Horton são apresentados para algumas culturas.

3.1.4 - Perdas de carga em sistemas pressurizados

As perdas de carga em sistemas pressurizados podem ser classificadas em distribuídas e localizadas.

3.1.4.1 - Perdas de carga distribuídas

As perdas de carga distribuídas podem ser calculadas por vários métodos, destacando-se a fórmula universal e a fórmula de Hazen-Williams. A fórmula universal pode ser escrita como:

$$h_f = f \frac{L_T}{D} \frac{V_L^2}{2g_r} \quad (3.2)$$

em que h_f é a perda de carga (m); f é o fator de atrito; L_T é o comprimento da tubulação (m); V_L é a velocidade média (m/s); D é o diâmetro da tubulação (m); e g_r é a aceleração da gravidade (m/s²).

A fórmula de Hazen-Williams pode ser escrita como:

$$j = 6,81 \frac{V_L^{1,85}}{C_{HW}^{1,85} D^{1,17}} \quad (3.3)$$

em que j é a perda de carga unitária (adimensional); V_L é a velocidade média (m/s); D é o diâmetro da tubulação (m); e C_{HW} é o coeficiente de rugosidade (m^{0,367}/s).

Na Equação 3.2 o valor de f pode ser obtido, dentre outros métodos, por meio do uso do diagrama de Moody, da equação de Colebrook-White ou da fórmula de Shacham. Essa última tem seu uso recomendado em função de f ser obtido diretamente, conforme mostrado a seguir.

$$f = \left\{ -2 \log \left[\frac{\varepsilon}{3,70D} - \frac{5,02}{\text{Re}} \log \left(\frac{\varepsilon}{3,70D} + \frac{14,50}{\text{Re}} \right) \right] \right\}^{-2} \quad (3.4)$$

em que ε é a rugosidade absoluta equivalente (m); e Re é o número de Reynolds.

Koide (1998) destaca que, devido às dificuldades no cálculo de f , atribuídos às limitações computacionais até a década de 1970, várias fórmulas de cálculo foram utilizadas, entre

elas a de Hazen-Williams. Porém, com os avanços computacionais, a fórmula universal passou a ser mais utilizada, sendo recomendada pela NBR 12215 (Projeto de adutora de água para abastecimento público) e NBR 12218 (Projeto de rede de distribuição de água para abastecimento público).

3.1.4.2 - Perdas de carga localizadas

As perdas de carga localizadas ocorrem em peças especiais (válvulas, curvas, derivações, registros etc) integrantes do sistema pressurizado. Essas peças promovem a alteração no módulo ou direção da velocidade média e, conseqüentemente, de pressão. Esse novo estado do fluido é acrescido de turbulência, a qual promoverá a perda de carga no sistema (Porto, 1999).

A fórmula utilizada na perda de carga localizada é:

$$\Delta h = k_{LO} \frac{V_L^2}{2g} \quad (3.5)$$

em que Δh é a perda de carga localizada (m) e k_{LO} é um coeficiente adimensional que depende da geometria da conexão, do número de Reynolds, da rugosidade da parede e das condições do escoamento (Porto, 1999).

3.1.5 - Medição de água consumida em práticas de irrigação

A água consumida em sistemas de irrigação pode ser quantificada com a estimativa por consulta ao irrigante, a medição por consumo de energia elétrica, a medição por cálculo baseado no consumo de eletricidade pela bomba, a medição direta da água aplicada com o auxílio de pluviômetros e a medição volumétrica.

Medindo-se a corrente elétrica de alimentação do motor de uma bomba hidráulica (conjunto motobomba), pode-se obter, por meio de determinação indireta, a vazão da bomba. A transformação da corrente elétrica em potência do motor elétrico trifásico é dada por:

$$Pot_m = \sqrt{3}VI \cos \varphi \quad (3.6)$$

em que Pot_m é a potência do motor elétrico (W); V é a tensão elétrica (V); I é a intensidade da corrente elétrica medida (A); e $\cos \varphi$ é o fator de potência (adimensional).

No caso de determinação da potência elétrica de um motor alimentado por corrente monofásica, a expressão utilizada é semelhante à da Equação 3.6, só que sem o termo $\sqrt{3}$, que é uma propriedade para a alimentação trifásica.

Determinada a potência do motor elétrico, que aciona a bomba hidráulica, pode ser calculada a vazão bombeada pela equação:

$$Q = \frac{\eta \eta_m Pot_m}{\gamma H} \quad (3.7)$$

em que Q é a vazão da bomba hidráulica (m^3/s); η é o coeficiente de rendimento global da bomba hidráulica (adimensional); η_m é o coeficiente de rendimento global do motor elétrico (adimensional); Pot_m é a potência do motor elétrico (W); γ é o peso específico do fluido ($\gamma_{\text{água}} = 9,8 \times 10^3 \text{ N/m}^3$); e H é a altura manométrica da bomba hidráulica (m).

3.2 - SOLO

Trabalhos sobre o comportamento quantitativo dos solos são encontrados na literatura a partir do século XVII. De acordo com Caputo (1985), vários autores consideravam os solos como sendo “massas ideais de fragmentos”, atribuindo-lhes propriedades de material homogêneo e estudando-os do ponto de vista matemático em lugar do ponto de vista físico. O estudo físico, diferentemente do matemático, permite o entendimento básico do solo com todas as inter-relações com os processos cíclicos (infiltração, redistribuição, retenção no solo e extração de água pelas plantas) (Klar, 1984; Prevedello, 1996).

A formação dos solos se dá a partir da desintegração e decomposição das rochas por processos físicos, químicos e biológicos. A esses processos de desintegração e decomposição dá-se o nome de intemperismo. Segundo Klar (1984), o processo de

intemperismo varia de acordo com o clima, a topografia, a vegetação e o tipo de rocha que dá origem aos solos. Em uma região tropical, por exemplo, os solos são mais desenvolvidos, ou seja, mais intemperizados do que em regiões mais frias. Isso ocorre devido às grandes variações de temperaturas, às elevadas precipitações e, conseqüentemente, a grande incidência de raios (descarga elétrica) nessas regiões.

3.2.1 - Granulometria do solo

De acordo com Prevedello (1996), o solo pode ser separado em três frações texturais de acordo com o tamanho das partículas que o compõe: areia, silte e argila. Algumas dessas são visíveis a olho nu e outras são tão pequenas que apresentam propriedades coloidais. Três classificações utilizadas com relação ao tamanho das partículas são a do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), a da Sociedade Internacional de Ciências do Solo (I.S.S.S.) e a da NBR 6502. Na Figura 3.2 essas três classificações são mostradas.

Uma melhor representação das frações texturais é feita a partir de uma curva semilogarítmica dos tamanhos das partículas separadas. A curva é denominada de curva granulométrica, em que a abscissa representa o logaritmo da dimensão dos grãos e a ordenada a porcentagem em peso. Quanto mais acentuada for a inclinação da curva, mais uniforme é a granulometria do solo (Klar, 1984).

Na Figura 3.3 é apresentada a curva granulométrica para um solo argiloso, um siltoso, um arenoso bem graduado e outro arenoso pouco graduado.

I.S.S.S					
Argila	Silte	Areia			Cascalho
		Fina	Grossa		
0,02 x 10 ⁻¹	0,02	0,20			2,00mm

USDA							
Argila	Silte	Areia					Cascalho
		Muito Fina	Fina	Média	Grossa	Muito Grossa	
0,02 x 10 ⁻¹		0,05	0,10	0,25	0,50	1,00	2,00mm

NBR 6502							
Argila	Silte	Areia			Cascalho		
		Fina	Média	Grossa	Fino	Médio	Grosso
0,02 x 10 ⁻¹	0,06	0,20	0,60	2,0	6,0	20	60mm

Figura 3.2 – Classificação textural dos solos de acordo com o tamanho das partículas (Fonte: Klar, 1984, modificado).

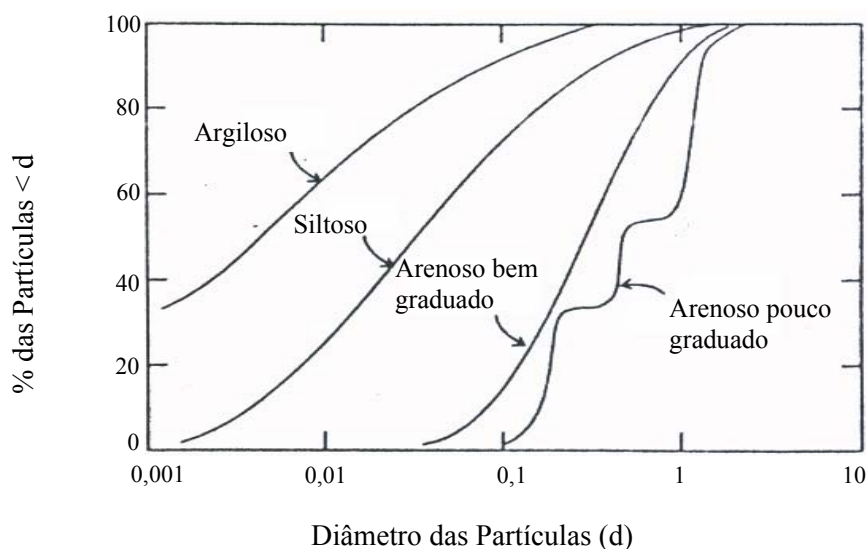


Figura 3.3 – Curva granulométrica para alguns tipos de solos (Hillel, 1998, modificado).

A fração arenosa possui partículas que variam seus diâmetros de $2000\mu\text{m}$ ($2,0\text{mm}$) até $50\mu\text{m}$ ($0,05\text{mm}$) na classificação USDA ou até $20\mu\text{m}$ ($0,02\text{mm}$) na classificação I.S.S.S. Essa fração é frequentemente dividida em subfrações que são areias grossa, média e fina.

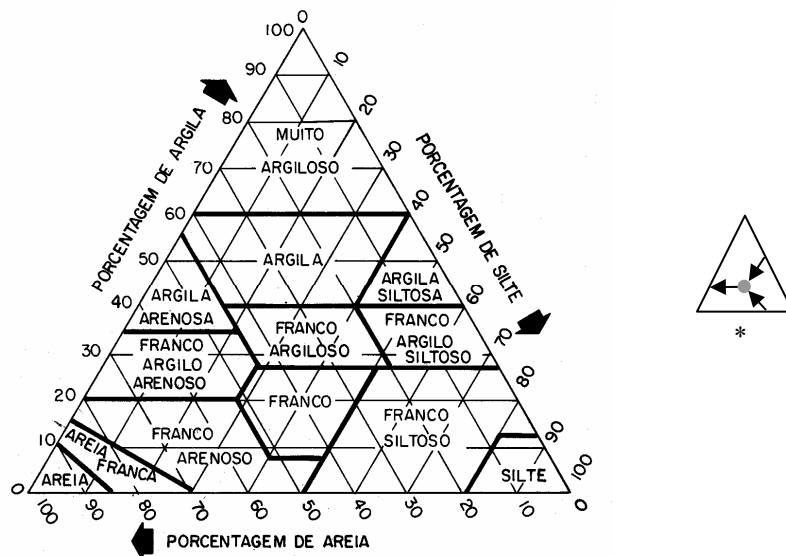
Geralmente os grãos de areia são constituídos de quartzo, mas podem também se fragmentar da mica, feldspato, e até mesmo de minerais pesados como zircônio e turmalina (Hillel, 1998).

A fração do silte é incluída em uma categoria situada entre a fração arenosa e argilosa. As partículas do silte são mineralogicamente e fisicamente parecidas com as partículas da argila, porém são maiores, tendo uma grande área superficial por unidade de massa (Hillel, 1998).

Já a fração argila, por possuir partículas muito pequenas, menores que $2,0\mu\text{m}$, são conhecidas como fração coloidal do solo. As partículas de argila podem apresentar formas laminares ou de bastão, pertencendo aos grupos de minerais conhecidos como aluminosilicatos. Os minerais aluminosilicatados são minerais secundários formados no solo, sendo originados da evolução dos minerais primários contidos na rocha-mãe. As argilas pertencem não somente a essa categoria de minerais, podendo pertencer a outras, tais como, óxido de ferro ou carbonato de cálcio (Hillel, 1998).

O ensaio de separação dessas frações é feito por meio de peneiramento, caso as partículas constituintes do solo tenham um diâmetro superior a $50\mu\text{m}$ ($0,05\text{mm}$). No caso de partículas menores, o ensaio é feito por medição da velocidade de decantação das partículas de diferentes tamanhos, a partir da dispersão da amostra do solo em solução aquosa.

Com a utilização do triângulo textural é possível classificar o solo em diferentes classes texturais a partir da combinação das diferentes frações do solo.



* Modo de se fazer a leitura no triângulo.

Figura 3.4 – Diagrama textural dos solos (Prevedello, 1996).

3.2.2 - Permeabilidade

A permeabilidade é a capacidade de transmissão de água do solo, dependendo tanto do meio (solo) como do fluido (água) que o atravessa. Na maioria das vezes o parâmetro que é utilizado nos cálculos é o coeficiente de permeabilidade, definido como a quantidade de água que atravessa uma área unitária de seção transversal do material poroso por unidade de tempo, sob um gradiente unitário de pressão em uma dada temperatura (Johnson Division, 1978).

Alguns fatores fazem com que o coeficiente de permeabilidade seja diferente em amostras do mesmo solo, tais como a temperatura e o grau de compactação do solo. A temperatura faz com que a viscosidade da água se altere e, quanto maior for a temperatura do solo, menor será a viscosidade da água, facilitando desse modo a passagem da água pelos vazios do solo, isso é, aumentando o seu coeficiente de permeabilidade. Conseqüentemente, o coeficiente de permeabilidade é inversamente proporcional à viscosidade da água.

O coeficiente de permeabilidade pode variar em razão do solo ser homogêneo ou heterogêneo e isotrópico ou anisotrópico. O coeficiente pode ser uniforme em todo o solo ou pode variar de ponto para ponto: no primeiro caso, o solo é denominado homogêneo; e no segundo caso, o solo é denominado heterogêneo. Se o coeficiente de permeabilidade em

um ponto for o mesmo em todas as direções, o solo é denominado isotrópico, e se o coeficiente diferir para diferentes direções em um ponto, o solo é dito anisotrópico (Hillel, 1998).

A determinação do coeficiente de permeabilidade pode ser realizada por meio de: medição indireta em laboratório, medição direta em laboratório (permeâmetro de carga constante ou permeâmetro de carga variável), medição direta no campo na presença do lençol freático (método do piezômetro ou método da cavidade não revestida) e medição direta no campo na ausência do lençol freático (método do poço raso, método do permeâmetro e teste de infiltração no tanque) (Klar, 1984).

3.2.3 - Infiltração

A infiltração é a passagem da água pela camada superficial do solo para dentro desse, dependendo da água disponível para infiltrar, da natureza do solo, do estado de sua superfície e das quantidades de água e ar inicialmente presentes no seu interior (Silveira *et al.*, 2001).

Muitas vezes é utilizada a velocidade de infiltração (mm/h) em lugar da infiltração (mm) propriamente dita. A velocidade de infiltração é a lâmina de água que penetra no solo por unidade de tempo, apresentando o valor máximo no início da infiltração, para a condição de umidade inicial que o solo se encontra, e tendendo a um valor constante, que em termos técnicos de irrigação é denominado de velocidade de infiltração básica do solo (Bernardo, 1995, Silveira *et al.*, 2001).

Alguns métodos são usados para a determinação da infiltração, existindo métodos práticos (ensaios de campo e laboratório) e métodos empíricos.

Os métodos práticos podem ser o método de entrada e saída da água no sulco, o método do infiltrômetro de sulco, o método do infiltrômetro de anel, permeâmetro de Guelph etc. Dois métodos empíricos são citados: a equação tipo potencial e a equação tipo Kostiakov-Lewis (Bernardo, 1995).

3.2.4 - Curva característica de umidade do solo

O solo é uma estrutura, na maioria das vezes, constituída de três fases, a fase sólida, que corresponde à matriz do solo, a fase líquida, que é a água contida no solo, e a fase gasosa, que consiste no ar armazenado no solo. A água apresenta substâncias dissolvidas e é, por isso, chamada de solução do solo. A estrutura da matriz do solo é que vai determinar a geometria dos espaços porosos no solo. São por esses espaços que a água e o ar se movimentam ou ficam armazenados no solo. A proporção relativa das três fases não é constante, podendo variar de acordo com certas características como chuva, vegetação e manejo do solo (Hillel, 1998).

Nem sempre o solo terá essas três fases, pois em algumas situações, pode ter só duas fases. Quando o solo está saturado, ele possui somente a fase sólida e líquida. Já no caso de um solo completamente seco, o que é uma situação praticamente hipotética, o solo só terá a fase sólida e gasosa.

Várias forças podem atuar sobre a água do solo, resultantes da força de atração da água pela matriz do solo (potencial matricial), da presença de solutos (potencial osmótico), da carga hidrostática e pressão externa de gases (potencial de pressão), da gravidade (potencial gravitacional), entre outros (Klar, 1984). Logo, o potencial total da água é expresso por:

$$\psi = \psi_m + \psi_o + \psi_p + \psi_g + \dots \quad (3.8)$$

em que ψ é o potencial total de água do solo; ψ_m é o potencial matricial; ψ_o é o potencial osmótico; ψ_p é o potencial de pressão; e ψ_g é o potencial gravitacional.

Entre as forças que atuam sobre a água nos solos não saturados, a que tem uma relação direta com seu armazenamento é o potencial matricial. Esse potencial também é conhecido como sucção matricial ou sucção da água do solo, podendo ainda ser denominado de tensão de umidade no solo.

A curva característica de umidade do solo é a representação gráfica entre o teor de umidade e o potencial de água do solo, sendo distinta para as diferentes estruturas e texturas dos solos.

Na Figura 3.5 as curvas características de umidade do solo para três solos de diferentes texturas – arenosa, siltosa e argilosa – são apresentadas. É observado que para um mesmo valor de potencial de água do solo ocorrem valores distintos de teor de umidade entre os solos, sendo o de textura argilosa o que apresenta o maior valor.

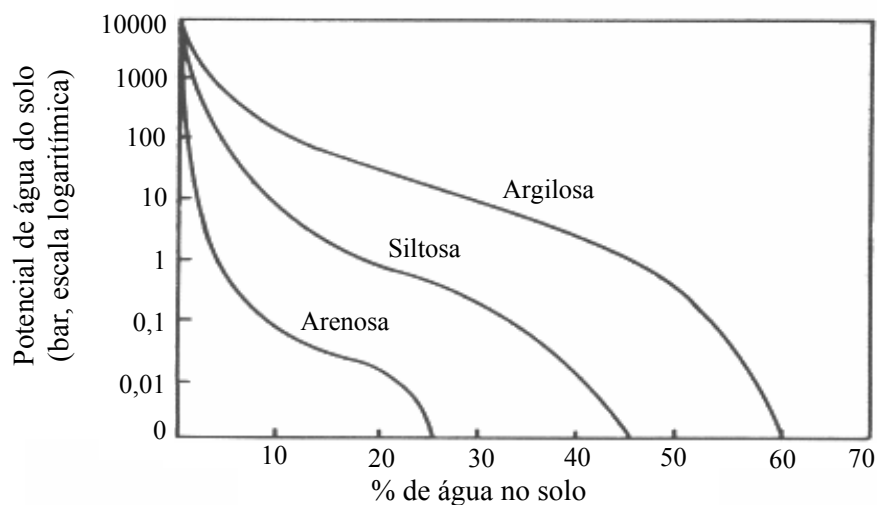


Figura 3.5 – Curva característica de umidade do solo para três solos de diferentes texturas (Klar, 1994, modificado).

A curva característica de umidade do solo é obtida em laboratório por meio do umedecimento ou secagem de amostras de um determinado solo. As curvas obtidas não são idênticas, sendo esse fenômeno denominado de histerese. Muitas vezes a diferença entre as curvas ocorrem em pequenos trechos do gráfico, estando os demais trechos sobrepostos.

Na Figura 3.6 é apresentada uma curva característica de umidade do solo em que se observa o fenômeno da histerese.

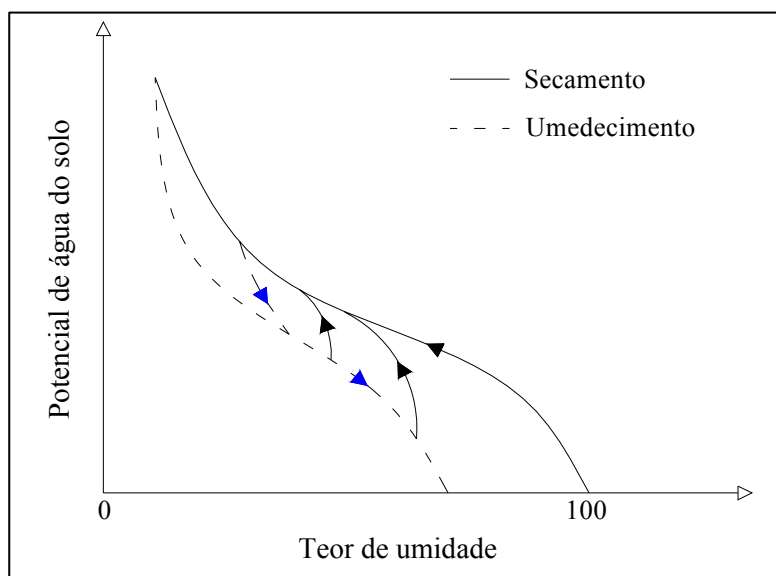


Figura 3.6 – Representação ilustrativa do fenômeno da histerese em uma curva característica de umidade (Ward e Robinson, 1990, *apud* Palmier, 1995, modificado).

De acordo com Klar (1984), o fenômeno da histerese pode ser atribuído a diversas causas, como o efeito do ângulo de contato da água com as partículas sólidas, a desuniformidade geométrica dos poros, a oclusão do ar presente nos poros etc.

3.2.5 - Determinação do teor de umidade do solo

A determinação da umidade do solo é importante em estudos agronômicos, ecológicos e hidrológicos, auxiliando a compreensão das relações químicas, mecânicas e biológicas do solo (Hillel, 1998).

A determinação da umidade do solo pode ser realizada de forma direta ou indireta. Nos métodos diretos o procedimento mais utilizado é o método padrão de estufa. Entre os métodos indiretos, podem ser citados o método dos tensiômetros e o método dos blocos de resistência elétrica.

3.2.5.1 - Método padrão de estufa

O método padrão de estufa consiste na determinação da umidade do solo a partir do princípio gravimétrico, baseado na medição da massa da amostra do solo com o recipiente, quando coletada (M_u), na massa da amostra do solo com o recipiente, depois de seca (M_s), e na massa do recipiente onde se encontra a amostra do solo (M_r).

O teor de umidade do solo (θ) é estimado com o uso da seguinte equação:

$$\theta (\%) = \frac{Mu - Ms}{Ms - Mr} \times 100 \quad (3.9)$$

A amostra do solo é seca em estufa, com uma temperatura em torno de 105°C. Ela só é considerada seca quando, entre duas pesagens consecutivas, não houver variação de massa. Para fins práticos, a amostra de solo é deixada na estufa durante 24 horas, sendo esse tempo, na maioria das vezes, suficiente.

Atenção tem de ser dada quando a amostra do solo é rica em matéria orgânica, isso porque a matéria orgânica é volatilizada a temperaturas elevadas. Para a realização do ensaio, nesse caso, a temperatura tem de ser menor, da ordem de 50°C.

3.2.5.2 - Tensiômetro

O tensiômetro é um equipamento que permite a determinação direta do potencial matricial da água em condições de campo. Esse potencial tem relação direta com o armazenamento da água no solo. Diferentemente do método padrão de estufa, o tensiômetro determina o estado de energia em que se encontra a água no solo. Essa energia pode ser convertida em teor de umidade do solo, utilizando a curva característica de umidade do solo (Klar, 1984).

No entanto, tensões muito baixas da água armazenada no solo podem fazer com que a coluna de água no interior do tensiômetro se rompa, ocasionando perda da sucção e até mesmo fazendo com que o equipamento pare de funcionar. Com o uso, a deposição de sais cristalizados e de partículas do solo sobre a cápsula porosa do tensiômetro promoverá a diminuição da porosidade da cápsula, afetando a precisão dos resultados obtidos. As leituras do tensiômetro também sofrem influência do efeito da histerese (Klar, 1984).

Em situações em que haja a necessidade de baixas medições de tensões, é recomendado o uso de dois outros equipamentos, o psicrômetro ou o osmômetro, nos quais se utilizam membranas semipermeáveis (Hillel, 1998).

Embora o tensiômetro apresente alguns pontos negativos, ele é utilizado com frequência em estudos hidrológicos e em manejos de irrigação. Os fatores que levam à sua utilização são a facilidade de manuseio, a resposta rápida do teor de umidade do solo e os resultados com uma precisão relativamente boa.

3.2.5.3 - Blocos de resistência elétrica

As leituras obtidas nos blocos de resistência elétrica não dependem somente da água contida no solo e dos sais solúveis presentes nessa água, mas também da composição e da textura do solo. Os blocos são constituídos, em seu interior, por um par de eletrodos entre os quais é medida a resistência elétrica. Os blocos podem ser de gesso, de náilon ou de fibra de vidro (Hillel, 1998).

A calibração dos blocos de resistência pode ser efetuada a partir da curva do potencial de água do solo ou do teor de umidade do solo. A calibração dos blocos, em relação ao potencial de água do solo, é considerada mais aceitável e conveniente do que a calibração em relação ao teor de umidade do solo. Isso é justificado pelo fato de um mesmo valor do potencial de água para solos distintos possuir teores de umidades diferentes. Por exemplo, um solo constituído de areia fina e argilosa pode ter 5,0% de teor de umidade para um potencial de água do solo de 1,5MPa, enquanto que um solo constituído de argila siltosa pode ter um teor de umidade de 13%, para o mesmo potencial (Gardner, 1986).

Os blocos, assim como os tensiômetros, também são afetados pela histerese, isso é, pelo sentido no qual se dá a variação da umidade do solo, se ela está aumentando ou diminuindo. As propriedades hidráulicas do bloco ou o contato desse com o solo podem impedir a rápida obtenção do equilíbrio entre o bloco e o solo, causando uma defasagem de tempo entre a situação real em que o solo se encontra e a leitura que está sendo realizada nesses blocos. O aumento da salinidade do solo promoverá um aumento da condutividade elétrica do solo, fazendo com que o equipamento registre, erroneamente, um maior teor de umidade do solo. No entanto os blocos de gesso neutralizam pequenas variações na salinidade do solo, diminuindo a imprecisão dos resultados obtidos (Hillel, 1998).

Uma desvantagem dos blocos de gesso é atribuída à solubilidade do material, que faz com que os mesmos sejam deteriorados no solo. Conseqüentemente, a relação entre o teor de

umidade do solo ou o potencial matricial do solo varia não somente de bloco para bloco, mas, também, de cada bloco com o tempo de uso. Essa variação é devida, à geometria interna dos poros e à alteração da porosidade do bloco ocasionada pela deterioração do material constituinte (Hillel, 1998).

3.2.6 - Água disponível no solo

Para Bernardo (1995), a água disponível no solo pode ser determinada conhecendo-se o teor de umidade do solo na Cc (capacidade de campo), o teor de umidade do solo no Pm (ponto de murcha), as propriedades físicas do solo e a profundidade radicular.

A capacidade de campo do solo (Cc), no conceito agrônomo, é aquela em que, após ter ocorrido a percolação profunda, as plantas conseguem extrair a água do solo sem restrição. No conceito de hidrologia subterrânea, é o teor de umidade do solo quando o movimento vertical da água no mesmo praticamente cessa.

Já o ponto de murcha do solo (Pm), por definição conceitual, é aquele em que a planta não consegue extrair água do solo na taxa em que necessita, prejudicando dessa forma o seu desenvolvimento e sua produtividade.

A disponibilidade total de água no solo (DTA) para as plantas é uma característica própria do meio, representando a quantidade de água que o solo pode reter por um determinado tempo (Bernardo, 1995), como mostrado a seguir:

$$DTA = \left[\frac{(Cc - Pm)}{10} Da \right] Z_r \quad (3.10)$$

em que DTA é a disponibilidade total de água para as plantas (mm); Cc é o teor de umidade na capacidade de campo (%); Pm é o teor de umidade no ponto de murcha (%); Da é a densidade aparente do solo (g/cm^3); e Z_r é a profundidade radicular (cm).

3.2.7 - Evapotranspiração

3.2.7.1 - Evaporação

A evaporação é o processo da passagem da água do estado líquido para o estado gasoso. Para que haja essa mudança de fase, as moléculas de água têm que absorver energia. Algumas variáveis climatológicas afetam a evaporação, como a temperatura, a umidade relativa do ar, a radiação e a velocidade do vento (Costa, 1994). Segundo Allen *et al.* (1998), a força motriz responsável pela remoção do vapor de água da superfície evaporante é a diferença entre a pressão do vapor de água dessa superfície e a pressão do vapor de água da atmosfera circundante.

De acordo com Tucci e Beltrame (2001), os métodos utilizados para a determinação da evaporação podem ser: transferência de massa, balanço de energia, equações empíricas, balanço hídrico e evaporímetros.

3.2.7.2 - Transpiração

Quando a evaporação da água é realizada a partir dos vegetais, o processo é denominado de transpiração, sendo a água extraída da planta para a atmosfera através dos estômatos, sob forma de vapor. O processo envolve um contínuo movimento da água do solo para as raízes, das raízes até a folha, e dessas para a atmosfera (Bernardo, 1995).

Os estômatos são pequenas aberturas nas folhas, através dos quais há a passagem de gases e vapor de água para a atmosfera. A abertura ou fechamento desses estômatos, a disponibilidade de água no solo e a capacidade do solo em transmitir água (coeficiente de permeabilidade) são os fatores que controlam a taxa de transpiração de uma planta qualquer. Assim como na evaporação, os fatores climáticos, como a temperatura, a umidade relativa do ar, a radiação sobre as folhas e a velocidade do vento afetam a transpiração (Allen *et al.*, 1998; Costa, 1994).

3.2.7.3 - Evapotranspiração

Os processos de evaporação e transpiração, quando associados, recebem a denominação de evapotranspiração, sendo essa variável dependente, principalmente, da planta, do solo e do clima. A evapotranspiração varia entre as culturas em função da arquitetura foliar (ângulo da folha, altura e densidade), das características das folhas (número de estômatos e o tempo de sua abertura), da duração do ciclo da cultura e da época de cultivo (Bernardo, 1995).

Allen *et al.* (1998) descrevem que a evaporação em um solo cultivado depende principalmente da fração da radiação solar que atinge a superfície do solo. À medida que as culturas crescem, a evaporação diminui e a transpiração aumenta, tornando essa última variável a principal componente da evapotranspiração. Enquanto a cultura está no seu estágio de desenvolvimento inicial, a evaporação corresponde a quase 100% da evapotranspiração. Já quando a cultura atinge a fase adulta (estágio de produção), a transpiração corresponde a aproximadamente 90% da evapotranspiração.

Os fatores que afetam a evapotranspiração são: condições climáticas (radiação solar, temperatura, umidade relativa do ar e velocidade do vento), fatores da cultura (tipo de cultura, variedade e estágio de desenvolvimento) e características do solo (salinidade, fertilidade, adubação e grau de compactação do solo) (Allen *et al.*, 1998).

Os métodos utilizados para a determinação da evapotranspiração podem ser: medidas diretas, métodos baseados na temperatura, métodos baseados na radiação, método combinado e balanço hídrico (Tucci e Beltrame, 2001).

A evapotranspiração pode ser definida em: evapotranspiração potencial (ETp), evapotranspiração de referência (ETo) e evapotranspiração da cultura (ETc).

a) Evapotranspiração potencial (ETp)

A evapotranspiração potencial, de acordo com Penman (1948, *apud* Medeiros, 2002), “é o processo de transferência de água para a atmosfera, na unidade de tempo, de uma superfície totalmente coberta por vegetação verde, de porte baixo, em pleno desenvolvimento e sem restrição de água no solo”.

b) Evapotranspiração de referência (ETo)

A evapotranspiração de referência surgiu para suprir a necessidade de uma “padronização”. Até então, a evapotranspiração determinada era a potencial, podendo a mesma ser determinada com qualquer cultura. Allen *et al.* (1998) afirmam que a evapotranspiração potencial não deve ser utilizada devido à ambigüidade na sua definição.

A evapotranspiração de referência, de acordo com Bernardo (1995), “é a evapotranspiração de uma superfície extensiva, totalmente coberta com grama de tamanho uniforme, com 8,0 a 15 cm de altura em fase de crescimento ativo, em um solo com ótimas condições de umidade”.

Para a determinação da ETo , Allen *et al.* (1998) utilizam a equação denominada FAO Penman-Monteith:

$$ETo = \frac{0,408\Delta_p (R_n - G) + \gamma_p \frac{900}{T_m + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta_p + \gamma_p (1 + 0,34 U_2)} \quad (3.11)$$

em que ETo é a evapotranspiração de referência (mm/dia); Δ_p é a declividade da curva de pressão de vapor (kPa °C⁻¹); R_n é a radiação livre na superfície das culturas (MJ m⁻² dia⁻¹); G é a densidade de fluxo de calor do solo (MJ m⁻² dia⁻¹); γ_p é a constante psicrométrica (kPa °C⁻¹); T_m é a temperatura média diária (°C); U_2 é a velocidade do vento a 2,0m de altura (m/s); e_s é a pressão de vapor de saturação do ar (kPa); e_a é a pressão de vapor atual do ar (kPa); e $(e_s - e_a)$ é o déficit de pressão de vapor de saturação do ar para a altura de referência medida (kPa).

Essa equação é uma combinação da equação de Penman-Monteith com as equações de resistência aerodinâmica e de resistência da superfície para a grama. A resistência aerodinâmica é a resistência que a superfície dos vegetais oferecem às perdas de calor e vapor de água provocadas pela passagem do ar. Já a resistência da superfície é a resistência ao fluxo de vapor de água através dos estômatos.

Allen *et al.* (1998) destacam ainda que nenhuma equação para a determinação da evapotranspiração baseada em dados meteorológicos gera valores corretos da evapotranspiração para todas as situações climáticas. Isso é atribuído às simplificações feitas nas equações e aos prováveis erros nas medições dos parâmetros climáticos.

c) Evapotranspiração da Cultura (ET_c)

A evapotranspiração da cultura é obtida pelo produto entre a evapotranspiração de referência e um fator dependente da cultura (K_c), isso é:

$$ET_c = K_c ETo \quad (3.12)$$

O K_c expressa as diferenças existentes entre a evapotranspiração de uma cultura qualquer e da cultura de grama, sendo ocasionadas pelas características dos estômatos, diferenças anatômicas das folhas, propriedades aerodinâmicas e, até mesmo, pelo albedo (reflectância da radiação solar) (Allen *et al.*, 1998).

A evapotranspiração da cultura só pode ser estimada pelo produto do coeficiente de cultura pela evapotranspiração de referência quando o sistema está sendo operado em condições ideais (padronizadas), ou seja: a cultura está livre de doenças; está bem adubada; cresce em toda a área plantada, sob condições ótimas de umidade do solo; e atinge a produção máxima sob as condições climáticas consideradas (Allen *et al.*, 1998).

A evapotranspiração da cultura sob condições não padronizadas é calculada utilizando o coeficiente de estresse (K_s) ou ajustando o coeficiente de cultura (K_c) para todos os tipos de outros estresses e restrições ambientais na evapotranspiração da cultura (Allen *et al.*, 1998).

3.2.8 - Fluxo de água na zona não saturada do solo

De acordo com Rawls *et al.* (1992), o fluxo de água na zona não saturada do solo é um processo de fluxo simultâneo entre dois fluidos imiscíveis, ar e água. Muitos desenvolvimentos teóricos e experimentais sobre a infiltração e o movimento da água no solo foram baseados na idéia de que, com o movimento da água, o ar armazenado no solo é

facilmente realocado de posições, conseqüentemente, a resistência que ele oferece ao movimento da água pode ser negligenciada. Porém, existem situações que o ar armazenado no solo pode não ser realocado, como também pode oferecer forte resistência a esse movimento. Prevedello (1996) menciona que o ar armazenado no solo promove a redução da área efetiva ao fluxo, aumentando a tortuosidade do fluxo remanescente.

A equação de Darcy foi a primeira equação que possibilitou a determinação da velocidade aparente do fluxo de água em um meio poroso saturado. A equação é função do coeficiente de permeabilidade que, nesse caso, é um parâmetro constante, e do gradiente hidráulico. Porém, para condições de não saturação, o coeficiente de permeabilidade é menor e dependente do teor de umidade do solo ou da carga de pressão da água nos meniscos dos poros. A Equação 3.13 descreve a equação de Darcy para a velocidade aparente do fluxo de água no solo saturado. As Equações 3.14a e 3.14b descrevem a equação de Darcy adaptada para a velocidade aparente do fluxo de água no solo não saturado. Nas três equações o sinal negativo indica que o fluxo é contrário ao gradiente hidráulico, tomando a superfície do solo como referência.

$$q = -k \frac{\partial h}{\partial s} \quad (3.13)$$

$$q = -k(\theta) \frac{\partial h}{\partial s} \quad (3.14a)$$

$$q = -k(\Psi) \frac{\partial h}{\partial s} \quad (3.14b)$$

em que q é a vazão por unidade de área transversal ao fluxo (m/s); k é o coeficiente de permeabilidade no solo saturado (m/s); $k(\theta)$ é o coeficiente de permeabilidade em função do teor de umidade do solo (m/s); $k(\Psi)$ é o coeficiente de permeabilidade em função da carga de pressão que a água exerce nos meniscos dos poros (m/s); $\partial h / \partial s$ é o gradiente hidráulico (adimensional), em que s é uma coordenada de posição qualquer, x , y ou z .

Segundo Klar (1984), em condições que envolvem secamento ou umedecimento, a equação de Darcy expressa em função da carga de pressão não é muito utilizada, uma vez

que essa equação é altamente influenciada pelo efeito da histerese. A equação de Darcy expressa em função do teor de umidade do solo apresenta uma menor influência para esse efeito.

De acordo com Freeze (1978), a equação da continuidade para o fluxo transiente em um elemento infinitesimal de controle é dado por:

$$\frac{\partial(\theta n_v \rho q_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\theta n_v \rho q_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\theta n_v \rho q_z)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial t}(\theta n_v \rho) \quad (3.15)$$

em que θ é a umidade do solo (decimal); n_v é a porosidade do solo (decimal); ρ é a massa específica da água (kg/m^3); e t é o tempo (s).

Expandindo o lado direito da Equação 3.15 três termos são obtidos:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta n_v \rho) = \rho n_v \frac{\partial \theta}{\partial t} + \rho \theta \frac{\partial n_v}{\partial t} + n_v \theta \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (3.16)$$

Na Equação 3.16 a variação de massa no volume armazenado pode ser atribuída à variação de umidade, à variação de porosidade e à variação de massa específica da água. Em um solo parcialmente saturado a variação da umidade é muito maior que as outras duas variações, podendo as mesmas serem desconsideradas. Assim, a forma bidimensional da Equação 3.16 fica:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (3.17)$$

Discretizando a Equação 3.14a para o elemento infinitesimal de controle, desconsiderando o sinal negativo e aplicando essas equações na Equação 3.17, tem-se:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[k_x(\theta) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y(\theta) \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_z(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} \right] \quad (3.18)$$

A Equação 3.18 é considerada a equação diferencial geral que rege o movimento de água na zona não saturada do solo, em regime transiente.

Considerando que a velocidade aparente do fluxo de água ocorra apenas na vertical, a Equação 3.18 é resumida a:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ k_z(\theta) \left[\frac{\partial \left(\frac{p}{\rho g} \right)}{\partial z} + 1 \right] \right\} \quad (3.19)$$

em que $(p/\rho g)$ é o potencial matricial.

A Equação 3.19 é a equação diferencial que rege o movimento vertical da água na zona não saturada do solo, em regime transiente.

Palmier (1995) menciona que após a ocorrência de um evento de precipitação ou de um evento de irrigação, a água que infiltra no solo é redistribuída ou drenada para camadas inferiores do solo, como também, consumida pelas plantas e evaporada através da superfície do solo. De acordo com o autor esses processos podem ser introduzidos na equação de Richards sob a forma de um termo de remoção (“*sink term*”). O termo de remoção depende da demanda evaporativa da atmosfera, do índice de área foliar, da densidade radicular e da capacidade do movimento da água no solo para conduzir água à superfície da raiz. Na Equação 3.20 é apresentada a equação de Richards, com o coeficiente de permeabilidade em função do potencial matricial, acrescentada do termo de remoção.

$$\frac{\partial \theta}{\partial \psi} \frac{\partial \psi}{\partial t} - S_s = \frac{\partial}{\partial x} \left[k_x(\psi) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[k_y(\psi) \frac{\partial h}{\partial y} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[k_z(\psi) \frac{\partial h}{\partial z} \right] \quad (3.20)$$

em que S_s é o termo de remoção da água do solo (por exemplo, extração de água pelas raízes); e $\partial \theta / \partial \psi$ é denominado de coeficiente de capacidade $[C(\psi)]$. Newman *et al.* (1975) conceituam $[C(\psi)]$ como sendo a capacidade de umidade específica.

4 - TRABALHOS RECENTES SOBRE O MONITORAMENTO DA FRENTE DE UMIDADE NO SOLO

O monitoramento da frente de umidade no solo é uma prática utilizada tanto em estudos hidrológicos como em técnicas de irrigação, seja para quantificar a água de uma maneira geral, seja para determinar a lâmina de água a ser aplicada na cultura pelo sistema de irrigação.

O monitoramento pode ser realizado de duas formas: (I) utilização de equipamentos (sonda de nêutrons, medidores de resistividade, TDR, entre outros), que a partir de medidas experimentais tanto em campo como em laboratório (medidas efetuadas em colunas de solo) permitem a determinação do teor de umidade do solo; e (II) utilização de modelos que simulem o comportamento da água na zona não saturada do solo.

Os equipamentos e modelos utilizados podem variar com relação à precisão, à intensidade de trabalho, à possibilidade de risco à saúde, e a custos (Leib *et al.*, 2003).

A precisão e a coerência dos resultados obtidos pelos equipamentos e pelos modelos estão sujeitas a fontes de erros. Essas fontes são atribuídas a erros de: calibração; do instrumento; decorrentes da variabilidade espacial do solo e da água nele contida; e de leitura (Oliveira, 1999).

4.1 - MONITORAMENTO POR MEIO DE EQUIPAMENTOS

Bacchi *et al* (1996), a partir do monitoramento das condições hídricas do solo e da determinação da quantidade de água aplicada em cada irrigação, da lâmina de água precipitada e do volume de escoamento superficial sobre duas parcelas experimentais, efetuaram o balanço hídrico de uma cultura forrageira de inverno cultivada sob condições de irrigação por aspersão. O monitoramento das condições hídricas do solo foi realizado diariamente a partir de leituras dos potenciais de água do solo, por meio de cinco conjuntos de tensiômetros instalados em cada parcela, em diferentes profundidades (de 0,20 a 0,70m) a cada dez dias. Nesse monitoramento foram determinadas: a perda de água por percolação, a ascensão capilar e a evapotranspiração no período experimental. Para a

determinação da quantidade de água aplicada em cada irrigação, foram instalados, sobre cada parcela, 10 pluviômetros ao longo da linha dos aspersores. O volume de escoamento superficial foi determinado por meio de um sistema coletor instalado nas parcelas.

Marciano *et al.* (1998) realizaram, a partir de leituras em tensiômetros, o monitoramento do teor de umidade do solo para o manejo da irrigação. Os mesmos autores observaram que, embora os resultados obtidos do potencial matricial tenham tido elevada variabilidade e heterogeneidade de variância, eles não foram críticos para o manejo da irrigação, uma vez que foram utilizados de forma indireta. Na conversão do potencial matricial para o conteúdo de água no solo, a variabilidade obtida nos tensiômetros foi minimizada, de tal forma que esse conteúdo apresentou baixa variabilidade e homogeneidade de variância, podendo a irrigação ser manejada com alto índice de confiança estatística.

Morgan *et al.* (2001) compararam a determinação da curva de retenção de água no solo por medidas em campo utilizando os métodos do tensiômetro, dos blocos de resistência e dos sensores de capacitância, com a determinação em laboratório utilizando placa de pressão. Na determinação em campo, a curva foi traçada confrontando leituras do potencial de água no solo, obtidas por meio dos tensiômetros e dos blocos de resistência, com leituras do teor de umidade do solo, obtidas a partir dos sensores de capacitância. Os blocos de resistência utilizados não foram blocos de gesso, e sim, blocos de um material sintético poroso. Os sensores de capacitância foram calibrados para o solo da área experimental a partir do princípio gravimétrico. Nos resultados foi verificado que as curvas de retenção de água no solo obtidas em campo e em laboratório diferiram. Essa diferença foi atribuída à alteração da massa específica das amostras de solo coletadas para o ensaio de laboratório.

Leib *et al.* (2003) avaliaram a capacidade de diversos sensores não calibrados na determinação do teor de umidade do solo a uma profundidade de 0,90m, tendo como referência as medições realizadas por sonda de nêutrons calibrada. Na área de estudo foi plantada alfafa e, durante toda a fase experimental, a micro-aspersão foi a prática de irrigação utilizada. Os sensores foram o de emissão de nêutrons, potencial de água do solo, condutividade elétrica da água, reflectometria de domínio na frequência (FDR) e reflectometria de domínio no tempo (TDR). Os mesmos autores concluíram que, embora os resultados obtidos tenham sido similares e consistentes em relação à direção e às mudanças do teor de umidade do solo em intervalos de irrigação variando de um dia a

várias semanas, os resultados apresentaram diferenças entre si, logo, a calibração dos sensores pode melhorar a precisão dos resultados obtidos, reduzindo a influência de alguns fatores como: temperatura, textura do solo, compactação do solo, deformação do solo, entre outros.

4.2 - MODELAGEM DO FLUXO DE ÁGUA NA ZONA NÃO SATURADA DO SOLO

Jain e Murty (1985) utilizaram um modelo matemático para a simulação do teor de água contido na zona radicular, considerando como componentes: evaporação potencial, transpiração atual, profundidade radicular, densidade radicular, teor de umidade inicial, precipitação, lâmina de água aplicada na irrigação, permeabilidade do solo não saturado e difusividade em função do teor de umidade do solo. A equação diferencial usada para o fluxo de água na zona não saturada do solo foi resolvida por um modelo numérico.

Para a extração de água pelas raízes, Jain e Murty (1985) utilizaram duas equações:

$$S(\theta) = \alpha(\theta) \frac{2E_a}{Z_r} \quad (4.1)$$

em que $S(\theta)$ é a extração de água pelas raízes ($\text{cm}^3/\text{cm}^3\text{dia}$); E_a é a transpiração atual (cm/dia); Z_r é a profundidade radicular (cm); e $\alpha(\theta)$ é a variável adimensional dependente do conteúdo de água no solo.

$$S_j = E_p \frac{L_{uj}}{\sum_{j=1}^n L_{uj}} \frac{2}{\Delta z_1 + \Delta z_2} \quad (4.2)$$

em que S_j é a extração de água na camada j ($\text{cm}^3/\text{cm}^3\text{dia}$); E_p é a transpiração potencial (cm/dia); L_{uj} é a densidade radicular na camada j (cm/cm^3); e Δz_1 e Δz_2 são os incrementos de profundidade (cm).

Foram verificadas, nos primeiros 90 dias do experimento, diferenças entre os valores observados e simulados. As diferenças obtidas foram menores quando a Equação 4.2 era

utilizada. Três hipóteses foram levantadas para tentar explicar as diferenças: (1) o solo não era homogêneo; (2) o solo não apresentava massa específica uniforme; e (3) o efeito da histerese na umidade do solo foi negligenciado (Jain e Murty, 1985).

Embora tenha ocorrido esse problema nos primeiros 90 dias da simulação, de uma forma geral, os resultados obtidos pelo modelo foram bem parecidos com os resultados observados (Jain e Murty, 1985).

Sarkar e Kar (1995), assim como Neuman *et al.* (1975), Jain e Murty (1985), Palmier (1995), dentre outros, também utilizaram na equação do fluxo vertical da água na zona não saturada do solo o termo de extração volumétrica. A equação diferencial utilizada foi:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} - k(\theta) \right] - S(\theta, Z, t) \quad (4.3)$$

em que θ é o teor de umidade do solo (adimensional); t é o tempo (dia); Z é a distância vertical abaixo da superfície do solo (m); $D(\theta)$ é a difusividade em função do teor de umidade do solo (m^2/dia); $k(\theta)$ é o coeficiente de permeabilidade em função do teor de umidade do solo (m/dia); e $S(\theta, Z, t)$ é o termo de extração volumétrica representando a taxa de extração de água pelas raízes ($\text{m}^3/\text{m}^3\text{dia}$). De acordo com Campos (1998), a difusividade em função do teor de umidade do solo é obtida pela relação $D_s(\theta) = k_s(\theta)/C(\theta)$, em que s é uma coordenada de posição qualquer, x , y ou z ; e $C(\theta)$ é o coeficiente de capacidade em função do teor de umidade do solo.

O termo de extração volumétrica é dado por:

$$S(\theta, Z, t) = N(Z) k(\theta) (\psi_r - \psi_{(\theta)}) W(Z) \quad (4.4)$$

em que $N(Z)$ é a função da atividade radicular; ψ_r é a carga de pressão na interface solo-raiz (m); $\psi_{(\theta)}$ é a carga de pressão da água no solo em função de θ (m); e $W(Z)$ é a função da densidade radicular (m/m^3).

De acordo com Sarkar e Kar (1995), a função da atividade radicular $[N(Z)]$ foi também um importante parâmetro de entrada para o modelo de simulação do fluxo de água no solo (modelo matemático com base física). Essa função foi utilizada para fazer o ajuste empírico.

$$N(Z) = \left[\frac{(100 - Z)}{100} \right]^4 \quad (4.5)$$

Os autores observaram que os valores da água contida no perfil do solo calculados pelo modelo foram superestimados em relação aos valores medidos para a camada superior e subestimados para as camadas intermediária e inferior, quando o solo estava úmido. Os valores superestimados podem ter sido ocasionados pela tendência que as raízes das culturas têm em extrair água de camadas mais profundas (Sarkar e Kar, 1995).

Koide (1990) escreveu um programa para calcular problemas de fluxo bidimensional. O programa denominado de SSFLO foi escrito em FORTRAN 77. De acordo com Campos (1998), o programa SSFLO pode ser dividido em um programa principal, que contém os cálculos comuns a todos os algoritmos e casos teste; nas funções representativas de cada caso teste, em que as funções características do solo são indicadas; e nas rotinas de cálculo que são inerentes à forma de cálculo dos diferentes modelos e suas variantes.

Clemente *et al.* (1994) compararam o desempenho de três modelos de fluxo de água na zona não saturada do solo com valores medidos no campo, para dois tipos de solo, na cidade de Ontário, Canadá: um solo classificado como arenoso argiloso não estruturado, cultivado com soja e outro solo classificado como argiloso estruturado, cultivado com grama forrageira. Os modelos empregados foram o SWATRE (Belmans *et al.*, 1983 *apud* Clemente *et al.*, 1994), o LEACHW (Wagenet e Hutson, 1989 *apud* Clemente *et al.*, 1994) e o SWASIM (Hayhoe e De Jong, 1982 *apud* Clemente *et al.*, 1994), que utilizam a equação de Richards para determinar, de forma unidimensional, o fluxo de água na zona não saturada do solo. Os modelos SWATRE e LEACHW expressam a equação de Richards em função da carga de pressão, enquanto o modelo SWASIM expressa a equação de Richards em função da difusividade e do teor de umidade do solo. As diferenças encontradas entre eles foram na formulação das equações governantes, nas diferentes técnicas de soluções das equações numéricas e nos diferentes níveis de detalhes da

representação do processo hidrológico do solo. Os resultados simulados e medidos apresentaram diferenças entre si, sendo atribuídas às seguintes causas: aproximações simplificadas utilizadas na descrição da extração de água pelas raízes da cultura; não consideração do efeito da histerese e do fluxo de água nos macroporos do solo; simplificação de dados de entrada, por exemplo, a consideração das precipitações diárias como uniformemente distribuídas ao longo de todo o dia; e variabilidade e imprecisão dos dados coletados em campo, nos dois tipos de solo. Embora tenha ocorrido discrepância entre os valores simulados e medidos, e entre os próprios valores simulados, os três modelos desempenharam satisfatoriamente a determinação do teor de umidade na zona não saturada para os dois tipos de solo.

Letha e Elango (1994) citam que entre as características físicas do solo, duas relações são as mais utilizadas no estudo do fluxo de água na zona não saturada do solo: carga de pressão (h) versus teor de umidade do solo (θ); e permeabilidade (k) versus teor de umidade do solo ou carga de pressão. De acordo com Brooks e Corey (1964, *apud* Letha e Elango, 1994) as relações entre h x θ e k x θ são:

$$S_e = \frac{(\theta - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)} = \left(\frac{h_b}{h}\right)^\lambda \text{ para } h < h_b; \text{ e } \frac{k(\theta)}{K} = S_e^\beta \text{ para } h < h_b \quad (4.6)$$

em que S_e é a saturação efetiva; θ_r é o teor de umidade residual; θ_s é o teor de umidade de saturação; h_b é a pressão de entrada de ar; $k(\theta)$ é a permeabilidade do solo não saturado, em função do teor de umidade do solo (m/dia); K é a permeabilidade de saturação (m/dia); e λ e β são parâmetros (ou constantes) relacionados pela condição $[\beta = (2/\lambda) + 3]$.

Para Mualem (1976, *apud* Letha e Elango, 1994) a relação entre k x θ é dada por:

$$\frac{k(\theta)}{K} = S_e^l \left(\frac{\int_0^{S_e} \frac{dS_e}{h}}{\int_0^1 \frac{dS_e}{h}} \right)^2 \quad (4.7)$$

em que l pode ser positivo ou negativo.

Para van Genuchten (1980, *apud* Letha e Elango, 1994) as relações entre h x θ e k x θ são:

$$S_e = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{h}{h_g}\right)^{n_G}\right]^{m_G}} \text{ para } h_g \leq 0; \text{ e } \frac{k(\theta)}{K} = S_e \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m_G}\right)^{m_G}\right]^2 \quad (4.8)$$

sendo h_g igual a α (constante com o sinal inverso do potencial matricial); e m_G e n_G sendo relacionados pela condição $[m_G = 1 - (1/n_G)]$.

Quando essas relações foram testadas, a partir de um conjunto de dados de uma amostra de solo, foi verificado que o desempenho na reprodução das relações h x θ e k x θ variaram significativamente em relação ao modelo utilizado, e que o modelo modificado de van Genuchten e o modelo criado pela combinação entre o modelo de van Genuchten e o modelo de Brooks e Corey foram os que levaram aos melhores resultados na simulação do fluxo de água na zona não saturada de um solo arenoso (Letha e Elango, 1994).

Rawls e Brakensiek (1985, *apud* Koide, 1990) apresentam uma relação simplificada para determinar os parâmetros da função de van Genuchten a partir dos parâmetros da função de Brooks e Corey (1964, *apud* Koide, 1990). A Equação 4.9 é a de Brooks e Corey.

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left[\frac{\psi_b}{\psi} \right]^\lambda \quad (4.9)$$

$$n_G = \lambda + 1 \quad (4.10)$$

$$m_G = \left[1 - \frac{1}{\lambda + 1} \right] \quad (4.11)$$

$$A_G = (\psi_b)^{-1} \quad (4.12)$$

em que ψ_b é a pressão de entrada do ar; λ é o índice de porosidade; e n_G , m_G e A_G são parâmetros da equação de van Genuchten.

Tabuada *et al.* (1995) mencionam que o uso de equações empíricas ou semi-empíricas na determinação da infiltração permite somente o cálculo do volume de água infiltrado, enquanto a equação de Richards permite a determinação tanto do volume de água infiltrado como do fluxo dessa água no interior do solo. Os autores desenvolveram e testaram o modelo BIDISUL, que simula, a partir da equação de Richards, na forma bidimensional, a infiltração da água no solo em pequenos canais fechados de irrigação. O modelo possibilita ainda a determinação da eficiência de irrigação, percolação e a forma do canal que proporcionará a maior eficiência de irrigação. No estudo foram utilizados dois solos, um denotado por solo S, solo arenoso (3,0% de argila e 10% de silte), e outro denotado por solo L, solo de aluvião (15% de argila, 20% de silte e 63% de areia muito fina). Durante a validação do modelo foi constatado que após 24 horas do evento de irrigação o volume de água contido na zona radicular do solo S era inferior a 40% do volume de água infiltrado, enquanto para o solo L esse valor era superior a 90%. Esse maior armazenamento de água no solo L faz com que o movimento lateral da água no seu interior se torne importante e, portanto, significativo para o cálculo do volume de água que fica retido na zona radicular e o que é perdido por percolação. Na conclusão do trabalho foi verificada a semelhança entre os resultados simulados e observados.

Faria e Madramootoo (1996) desenvolveram um modelo para o balanço de água no solo, considerando as vantagens e desvantagens dos modelos SWACROP (Wesseling *et al.*, 1989, *apud* Faria e Madramootoo, 1996) e VP4 (Boisvert *et al.*, 1992, *apud* Faria e Madramootoo, 1996). Os dados de entrada dos modelos são dados climáticos, parâmetros do solo, coeficientes da cultura e valores de constantes empregadas no modelo. A evapotranspiração foi separada em três componentes: evaporação do solo, transpiração e evaporação da água de chuva interceptada pela cobertura da cultura. Diferenças significativas entre os resultados simulados e observados foram encontradas na camada superior do solo, sendo atribuídas à grande variabilidade existente nas primeiras camadas do solo, podendo fazer com que o modelo não seja capaz de simular as rápidas mudanças do teor de umidade do solo causadas pelo processo de infiltração e evapotranspiração.

Lacroix *et al.* (1996) constataram a dificuldade de realizar o balanço hídrico na agricultura irrigada a partir de modelagem determinística, em escala regional. A dificuldade foi atribuída ao grande número de parâmetros que influenciam na distribuição espacial e temporal da irrigação, que tornam complicada a determinação desse balanço. Alguns

parâmetros, como o potencial de água consumido pela cultura e a capacidade de água no solo, são razoavelmente fáceis de serem estimados nessa escala, enquanto que a lâmina de água que infiltra para profundidades abaixo da profundidade radicular da cultura e as perdas por escoamento superficial são mais difíceis de estimar. Foi desenvolvido o modelo hidrodinâmico NEWSAM em que, por meio do volume de água utilizado na irrigação e do monitoramento do nível do lençol freático, é possível determinar o volume de água infiltrado no solo e o que sobra na superfície.

Chang e Corapcioglu (1997) verificaram que um grande número de modelos de fluxo de água em solos agricultáveis utiliza como parâmetros a densidade radicular e o potencial da água junto às raízes. Esses parâmetros em geral são determinados por tentativa e erro, até o momento que o modelo seja ajustado ao conjunto de dados, tornando a busca dos resultados difícil e, em alguns casos, impraticável. Nesse trabalho, eles propuseram o estudo da interação da água com as raízes das plantas por meio de uma técnica simples de determinação, isso é, desenvolveram um modelo para simular o efeito das raízes no fluxo de água na zona não saturada do solo. Notaram que em solos argilosos a extração de água pelas raízes promove uma diminuição gradual do teor de umidade, além de reduzir a infiltração na camada superficial do solo, sob uma dada condição de irrigação. Nos solos arenosos esse comportamento não foi observado, em consequência da rápida infiltração da água no solo ocasionada, provavelmente, pela grande porosidade desses solos.

Celia *et al.* (1990), estudando a equação de fluxo em solo não saturado por meio de aproximações numéricas, verificaram o problema no balanço de massa quando a solução usada era baseada na carga de pressão. Para tentar solucionar o problema no balanço de massa, os autores propuseram uma solução mista em que a expansão correta da derivada do tempo produz um algoritmo computacional simples que torna esse balanço conservativo por aproximações numéricas. Os autores destacam ainda que a diagonalização da matriz de tempo, que ocorre na aproximação pelo método das diferenças finitas, garante soluções com conservação de massa, sem oscilações, o que não é constatado quando a aproximação é realizada pelo método dos elementos finitos.

Campos (1998) utilizou, em seu trabalho, o programa SSFLO como base para analisar a eficiência de modelos para cálculo de fluxo bidimensional de água em meio poroso, utilizando o método dos elementos finitos na discretização espacial, com elementos

triangulares lineares, e condições de contorno de Neumann ou de Dirichlet. Na discretização temporal, o método utilizado foi o das diferenças finitas. Os modelos testados foram os de Neuman (1973, *apud* Campos, 1998), Solução Mista (Celia *et al.*, 1990, *apud* Campos, 1998) e RA (Rathfelder e Abriola, 1994, *apud* Campos, 1998). Quando diferentes algoritmos de cálculo foram aplicados aos três modelos, treze opções de cálculo foram obtidas.

Entre todas as opções de cálculo testadas, a de Neuman, com matriz $[F]$ aglutinada, integração por quadratura de Gauss e cálculo do coeficiente de capacidade C efetuado pela declividade da corda, foi a que apresentou o melhor desempenho global. Foi constatado ainda que essa opção não apresentou problemas apreciáveis de balanço de massa, em todos os casos testados (Campos, 1998). Campos (1998) menciona ainda que, para um grande número de pesquisadores, os problemas no balanço de massa são a grande desvantagem das formulações baseadas na carga de pressão.

Elmaloglou e Malamos (2000) trabalharam com o modelo conhecido como SWAP93. O modelo utiliza a equação de Richards para a determinação do comportamento do fluxo de água no solo. A extração de água pelas raízes tem forma semi-empírica representando uma função S_s que é dependente da extração máxima de água pelas raízes ($S_{m\acute{a}x}$) e da carga de pressão da água no solo. Na determinação do comportamento da água no solo duas situações podem ser representadas: $S_{m\acute{a}x}$ variando de forma linear ou de forma constante com a profundidade radicular. Independente de como o $S_{m\acute{a}x}$ foi considerado, os resultados obtidos pela simulação tiveram uma boa similaridade com os resultados observados para profundidades maiores que 0,30m. Para profundidades menores que 0,30m a similaridade entre os resultados já não foi adequada, devido, provavelmente, à influência de fissuras e caminhos preferenciais no solo, acarretando em perdas de água e, conseqüentemente, em valores subestimados na simulação.

Wilderotter (2003) desenvolveu um método numérico baseado na combinação de um modelo bidimensional do fluxo de água no solo, a partir da equação de Richards, com um modelo bidimensional do crescimento radicular de uma cultura qualquer. O método numérico permitiu simular simultaneamente o fluxo de água no solo e o crescimento radicular da cultura. O método dos elementos finitos foi o método numérico empregado e a idéia básica foi usar uma malha (“*grid*”) fina ao longo do sistema radicular da cultura e

uma malha grossa ao redor desse. A malha fina ao longo do sistema radicular foi utilizada de forma dinâmica, permitindo calcular e simular a extração de água pelas raízes em todos os seus estágios de desenvolvimento. A combinação entre os dois métodos foi bem sucedida, além do que o método dos elementos finitos teve uma contribuição importante no modelo bidimensional do crescimento radicular, desde a análise de um pequeno pedaço da raiz até a análise de todo o sistema radicular da cultura. Nas Figuras 4.1 e 4.2 são apresentadas as distribuições da carga de pressão ocasionadas pela extração de água pelas raízes e suas correspondentes malhas para o 10º e 75º dia de simulação. O tom escuro, localizado abaixo do sistema radicular das figuras à esquerda, representa o nível do lençol freático no solo.

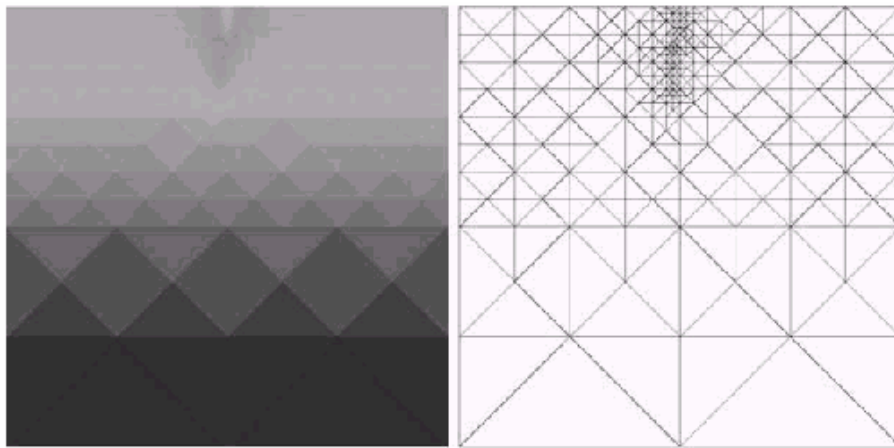


Figura 4.1 – Distribuição da carga de pressão ocasionada devido à extração de água pelas raízes no 10º dia de simulação (Fonte: Wilderotter, 2003).

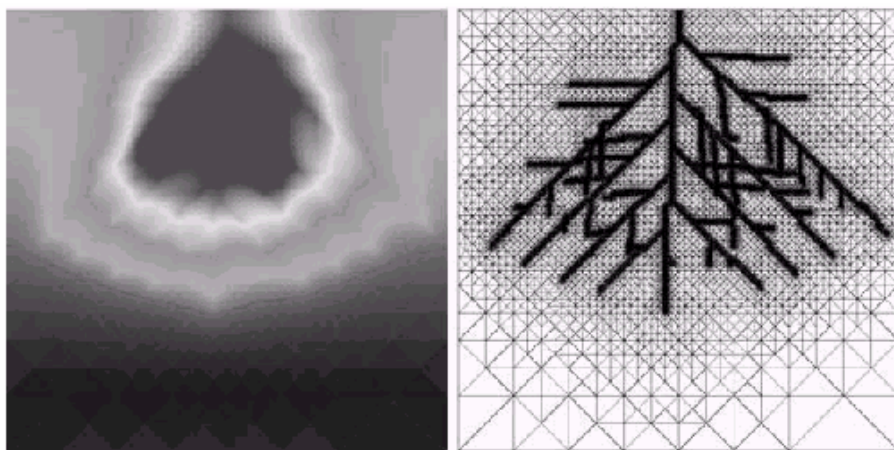


Figura 4.2 – Distribuição da carga de pressão ocasionada devido à extração de água pelas raízes no 75º dia de simulação (Fonte: Wilderotter, 2003).

5 - MATERIAIS E MÉTODOS

No estudo do fluxo de água na zona não saturada do solo os resultados podem variar em magnitude de erro, devido à complexidade e à necessidade, em alguns casos, de aproximações ou simplificações. Um dos fatores que pode contribuir para essa variação da magnitude do erro é a busca das relações entre as propriedades hidráulicas do solo.

A granulometria média do solo, a massa específica do solo, a curva de retenção de água no solo e o coeficiente de permeabilidade do solo são considerados os quatro principais parâmetros para o estudo do fluxo de água na zona não saturada do solo.

A determinação desses parâmetros foi efetuada em ensaios laboratoriais. Para essa determinação, amostras deformadas e indeformadas de solo foram coletadas. As amostras deformadas foram utilizadas nos ensaios da determinação da granulometria média e da massa específica. Já as amostras indeformadas foram utilizadas nos ensaios da determinação da curva de retenção e do coeficiente de permeabilidade.

A granulometria média do solo foi determinada por ensaios de peneiramento e de sedimentação. Associando os resultados obtidos ao diagrama textural dos solos (item 3.2.1), foi possível realizar a classificação desses. Tanto o ensaio para a determinação da granulometria média do solo, como o ensaio para a determinação da massa específica do solo, são padronizadas pelas normas da ABNT (NBR 7181 e NBR 6458).

A curva de retenção de água no solo foi obtida pelo ensaio da centrifugação. Nesse ensaio as amostras indeformadas de solo foram submetidas a tensões diferentes, de acordo com a variação da velocidade de rotação dessas amostras na centrífuga.

A determinação do coeficiente de permeabilidade do solo saturado, em laboratório, foi feita por meio do permeâmetro de carga constante. Já o coeficiente de permeabilidade do solo em função de θ foi estimado por meio da equação de Mualem, que será apresentada neste capítulo, equação essa proveniente de uma relação entre o coeficiente de

permeabilidade do solo saturado e a curva de retenção de água no solo, sendo essa última ajustada pela equação de van Genuchten, que também será apresentada neste capítulo.

Os tensiômetros e os umidímetros de bloco de gesso foram utilizados para monitorar, de forma indireta, o fluxo de água na zona não saturada do solo. Para a obtenção do teor de umidade do solo por meio dos tensiômetros foi utilizada a curva de retenção de água no solo, uma vez que seus sensores registram a tensão na qual a água está armazenada no solo. Para a obtenção do teor de umidade do solo por meio dos umidímetros de bloco de gesso foi utilizada a curva de calibração desse sensor, fornecida pelo fabricante e, a curva de retenção de água no solo. Os umidímetros de bloco de gesso, diferentemente dos tensiômetros, registram a condutividade elétrica do bloco. Assim, quanto maior for a umidade do solo maior será a umidade do bloco e também sua condutividade elétrica.

O monitoramento da frente de umidade do solo foi realizado por meio de campanhas intensivas de coleta de dados do teor de umidade do solo, entre turnos de rega. O procedimento adotado nessas campanhas consistiu em realizar leituras nos equipamentos (tensiômetros e umidímetros de bloco de gesso) antes e após a irrigação ter sido efetuada. As leituras realizadas após a irrigação foram feitas em intervalos de tempo pré-estabelecidos.

Desconsiderando a ascensão capilar, a única entrada para o balanço hídrico, neste trabalho, em áreas agricultáveis no período da seca, foi a irrigação. A medição do volume de água consumido pela irrigação foi efetuada de duas formas: medição das vazões das bombas hidráulicas e medição da vazão dos aspersores e canhões hidráulicos. As vazões das bombas hidráulicas foram determinadas tanto por meio do bombeamento de um volume de água conhecido (vazão real captada), como por meio de medidas da corrente elétrica de alimentação dos motores de bombas hidráulicas (vazão estimada captada). A medição da vazão dos aspersores e canhões hidráulicos foi realizada por meio da medição direta da vazão dos aspersores (vazão aspergida) e do levantamento da uniformidade de aplicação da água (vazão efetiva aplicada). A partir da diferença entre a lâmina real de água captada e a lâmina de água aspergida, as perdas ocorridas na adução foram quantificadas. Por outro lado, por meio da diferença entre a lâmina de água aspergida, a lâmina de água efetiva e a interceptação (saída do balanço hídrico), as perdas ocorridas na aspersão foram quantificadas.

As duas outras saídas para o balanço hídrico, neste trabalho, foram a evapotranspiração real da cultura e a percolação.

A interceptação vegetal foi estimada por meio da equação empírica de Horton, apresentada no item 3.1.3, utilizando os parâmetros relacionados às culturas obtidos em Tucci (2001), os quais serão apresentados neste capítulo.

A evapotranspiração real da cultura (ET_{rc}) foi estimada por meio da relação entre a evapotranspiração de referência (ET_o), em que os dados foram obtidos da Estação Principal da Embrapa/CPAC-DF; os coeficientes das culturas (K_c), extraídos e corrigidos por valores apresentados em Allen *et al.* (1998); e os coeficientes de estresse (K_s), obtidos por meio de uma equação em função do teor de umidade do solo.

Embora os tensiômetros e os umidímetros de bloco de gesso possam auxiliar na determinação do comportamento do volume de água no interior do solo, permitindo verificar a ocorrência da percolação e, até mesmo, da ascensão capilar, a simulação matemática possibilita, de forma mais eficaz, a análise desse comportamento e a quantificação da variação de armazenamento no solo. Na simulação do fluxo de água na zona não saturada do solo, as leituras obtidas nos tensiômetros foram utilizadas, tanto nas condições iniciais, como nas condições de contorno do modelo matemático utilizado.

5.1 - SELEÇÃO DAS PROPRIEDADES E INSTALAÇÃO DAS PARCELAS EXPERIMENTAIS

Para o desenvolvimento da parte experimental do trabalho foram selecionadas quatro propriedades, denominadas de P1, P2, P3 e P4. Em todas elas, a prática de cultivo utilizada é a agricultura irrigada.

Em cada propriedade foram selecionadas e instaladas duas parcelas experimentais. As mesmas foram instrumentadas com tensiômetros e umidímetros de bloco de gesso. Os tensiômetros foram instalados nas profundidades a 0,30, 0,50, 0,70, 0,90 e 1,5m. Já os umidímetros de bloco de gesso foram instalados nas profundidades a 0,10, 0,20, 0,30, 0,40, 0,50, 0,70, 0,90, 1,5 e 2,0m. Na Figura 5.1 é mostrada uma parcela experimental instrumentada, instalada na propriedade P2.

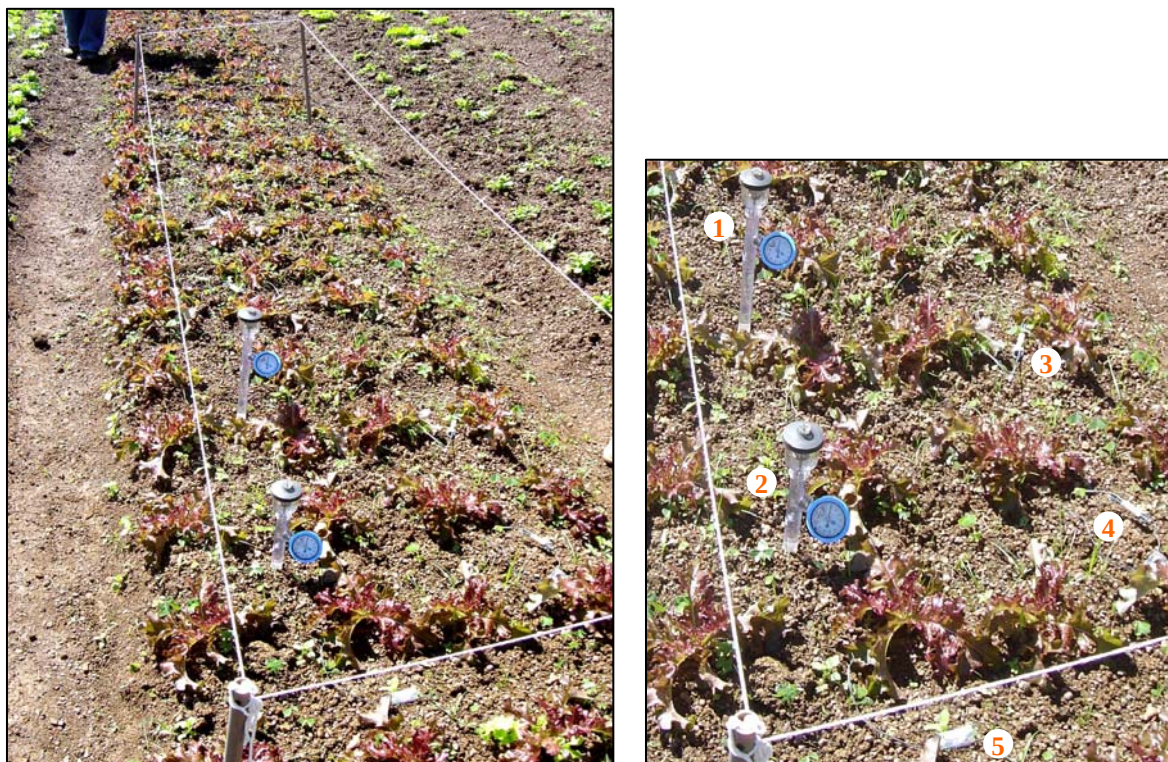


Figura 5.1 – Parcela experimental localizada na propriedade P2. Em destaque: 1 e 2 – Tensiômetros; e 3, 4 e 5 – Fios condutores dos umidímetros de bloco de gesso.

Na Tabela 5.1 são apresentadas as datas em que as parcelas experimentais foram instrumentadas e, na Tabela 5.2, as culturas presentes nas parcelas experimentais, com suas profundidades radiculares. Para a diferenciação entre as duas parcelas, foram atribuídas denominações distintas a cada uma: Parcela A e Parcela B. Na Tabela 5.3 são apresentadas as áreas dos talhões onde as parcelas experimentais foram instaladas.

Talhões são glebas ou sub áreas, dentro da área de cultivo de uma propriedade, onde se faz, na maioria das vezes, a introdução de uma cultura específica. O que acontece, em alguns casos, é o consorciamento entre dois tipos de cultura em um mesmo talhão.

Tabela 5.1 – Datas em que as parcelas experimentais foram instrumentadas.

	P1	P2	P3	P4
Parcela A	01/07/2004	01/07/2004	25/06/2004	25/06/2004
Parcela B	01/07/2004	01/07/2004	25/06/2004	25/06/2004

Tabela 5.2 – Culturas nas parcelas experimentais e profundidades radiculares estimadas (m).

P1			P2	
Parcela A	Couve	0,45*	Cebolinha	0,30*
Parcela B	Milho	0,90*	Alface	0,30*
P3			P4	
Parcela A	Espinafre	0,50*	Berinjela	0,70*
Parcela B	Chicória	0,30*	Jiló	0,70*

* valores apresentados por Gomes (1999, *apud* Carvalho, 2003).

Tabela 5.3 – Áreas dos talhões onde as parcelas experimentais foram instaladas (m²).

	P1	P2	P3	P4
Parcela A	3402	1872	1296	1350
Parcela B	1620	936	648	2025

Na seqüência, o termo área da parcela experimental corresponde à área do talhão em que a parcela experimental foi instalada.

5.2 - SOLO

As propriedades físicas do solo, tais como granulometria média e massa específica, para os perfis a 0,30, 0,50, 0,70, 0,90 e 1,5m de profundidade, de cada propriedade, foram determinadas no Laboratório de Geotecnia da UnB por meio de ensaios de análise granulométrica e de determinação da massa específica. As determinações da curva de retenção de água no solo e do coeficiente de permeabilidade do solo saturado, para os mesmos perfis, foram efetuadas no Laboratório de Física do Solo da EMBRAPA/CPAC-DF por meio de ensaios de centrifugação e de permeâmetro de carga constante. Por meio de relações entre o teor de umidade do solo com a tensão média relacionada a esse teor de umidade, obtidas no ensaio de centrifugação, outras propriedades físicas do solo foram estimadas: massa específica aparente, capacidade de campo, ponto de murcha permanente, porosidade, microporosidade e macroporosidade.

5.2.1 - Granulometria média do solo e massa específica do solo

Para a determinação da granulometria média do solo e da massa específica do solo de cada propriedade duas etapas foram realizadas. A primeira relacionada à coleta das amostras de solo nos perfis e a segunda relacionada à realização dos ensaios em laboratório.

No procedimento de coleta das amostras foram abertas trincheiras de aproximadamente 1,5 x 1,5 x 1,5m, próximas às parcelas experimentais. As amostras de solo foram coletadas nos perfis relacionados e colocadas em sacos plásticos (aproximadamente 2,5kg). O número de amostras coletadas por propriedade foi igual a 5, totalizando 20 amostras.

Na Figura 5.2 é mostrada uma trincheira aberta na propriedade P3.



Figura 5.2 – Trincheira para a coleta de amostra de solo, localizada na propriedade P3.

Os ensaios de análise granulométrica do solo e de determinação da massa específica do solo foram efetuados de acordo com a NBR 7181 (Solo – Análise Granulométrica) e a NBR 6458 (Grãos de pedregulho retidos na peneira de 4,80mm. Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água). Nessa última norma a determinação da massa específica do solo pode ser realizada tanto para o material retido na peneira de 4,8mm, como para o material que passa por ela. No caso deste trabalho, a massa específica do solo foi determinada com o material passante na peneira de 2,0mm. Esse procedimento foi adotado com base na NBR 7181.

5.2.2 - Curva de retenção de água no solo

A coleta das amostras para a determinação da curva de retenção de água no solo é distinta em relação à coleta das amostras para a determinação da granulometria média do solo. No caso da curva de retenção, as amostras foram coletadas de forma a manter a estrutura física do solo (amostras não deformadas), para que não ocorressem distorções exageradas sobre o valor real dessa propriedade física do solo.

O trado de amostra indeformada foi o equipamento utilizado para a coleta das amostras de solo. O número total de amostras por propriedade foi igual a 5, totalizando 20 amostras. Na Figura 5.3 é mostrado o trado de amostra indeformada, juntamente com as outras peças que compõem o equipamento. A haste do trado tem 0,30m; a cúpula onde o amostrador é fixado tem 0,12m de comprimento; o diâmetro e a altura do amostrador são iguais a, respectivamente, $0,50 \times 10^{-1}\text{m}$ e $0,51 \times 10^{-1}\text{m}$.

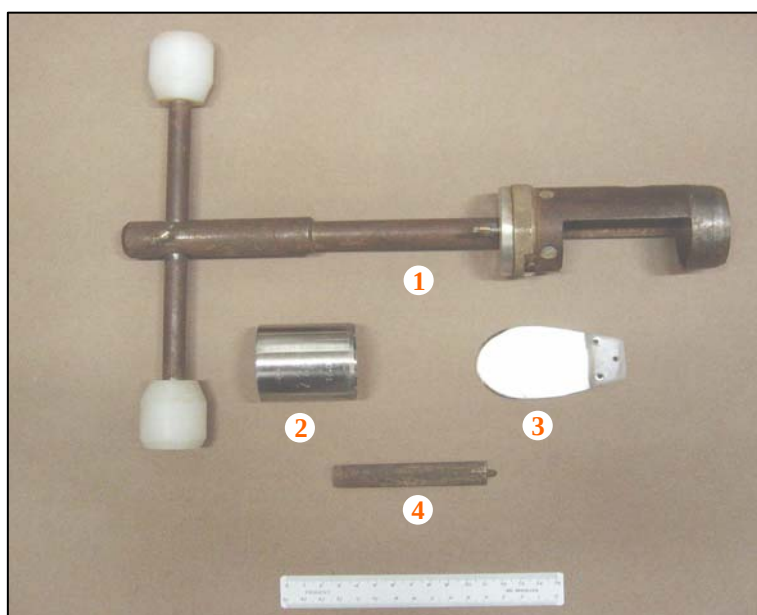


Figura 5.3 – Equipamentos utilizados para coleta de amostra indeformada de solo:
1 – Trado; 2 – Amostrador; 3 – Espátula para corte da amostra; e 4 – Trava do amostrador.

Durante a determinação da curva de retenção de água no solo, quatro centrífugas foram utilizadas (ver Figura 5.5). Duas centrífugas foram fabricadas por Kokusan Corporation, Tóquio, Japão, modelo 1400PF. Uma outra foi fabricada por Daiki Rika Kogyo CO., LTD., Tóquio, Japão, modelo DIK-3560. A última foi fabricada por Kika Seisakusho, LTD., Tóquio, Japão, modelo H-70.

O ensaio para a determinação da curva de retenção de água no solo foi efetuado por um técnico da Embrapa, de acordo com as seguintes etapas:

- 1) As amostras foram colocadas em uma bandeja com água por 24 h, para saturação. Na base das amostras, que ficam em contato com o fundo da bandeja, foram colocados papéis filtro, para evitar a perda de material das amostras;
- 2) Antes da determinação da curva de retenção de água no solo, o ensaio para a determinação do coeficiente de permeabilidade do solo saturado foi efetuado. Após o ensaio, as amostras de solo foram recolocadas na bandeja com água;
- 3) As amostras foram retiradas da bandeja, de forma individual, com o auxílio de uma espátula. Nessa etapa foi tomado o cuidado para que não ocorresse a perda de material. Antes da pesagem das amostras, o papel filtro foi retirado, e o procedimento da pesagem efetuado. Após a pesagem, as amostras foram colocadas em uma cápsula, acessório da centrífuga que permite que as amostras de solo possam ser acopladas ao rotor da mesma. As cápsulas da centrífuga modelo H-70 possuem, na base superior, uma tampa de encaixe e, na base inferior, diversos furos que permitem que a água seja drenada das amostras. Para que não ocorresse a perda de material do solo, foi colocado, internamente, na base inferior da cápsula, um papel filtro, antes que as amostras fossem colocadas. As cápsulas das centrífugas modelos 1400PF e DIK-3560 possuem na base superior, uma tampa de encaixe e, próximo à base inferior, na lateral, um furo para a drenagem da água da amostra. As amostras de solo, dentro das cápsulas dos dois últimos modelos de centrífuga, ficam sobre uma base interna com diversos furos. Nesse caso, o papel filtro também foi utilizado. Na Figura 5.4 são mostradas as cápsulas utilizadas no ensaio;
- 4) Foi aplicada a centrifugação às amostras em diferentes velocidades de rotação; e
- 5) A cada tensão aplicada foi realizada a pesagem das amostras de solo, sem as cápsulas da centrífuga. As amostras de solo ficaram submetidas a cada tensão, durante um intervalo de tempo de 30min; após esse intervalo de tempo é que eram realizadas as pesagens. As tensões escolhidas foram -0,00, -0,06, -0,10, -0,33, -0,60, -1,0 e -15atm. Em cada equipamento as tensões médias aplicadas nas amostras foram calculadas de acordo com as rotações e a distância ao centro do rotor (ver Apêndice A).

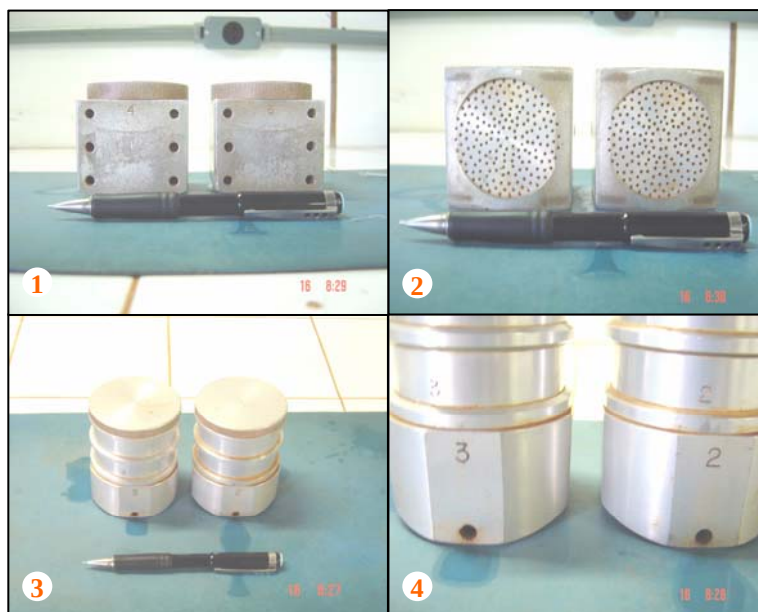


Figura 5.4 – Cápsulas utilizadas para acoplar as amostras de solo ao rotor da centrífuga:
 1 – Cápsulas da centrífuga modelo H-70; 2 – Base inferior das cápsulas da centrífuga modelo H-70, destacando o fundo perfurado; 3 – Cápsulas das centrífugas modelos 1400PF e DIK-3560; 4 – Detalhe do furo lateral das cápsulas das centrífugas modelos 1400PF e DIK-3560.



Figura 5.5 – Centrífugas utilizadas na determinação da curva de retenção de água no solo: 1 – Centrífuga modelo H-70; 2 – Visão interna da centrífuga destacando o rotor e as cápsulas da centrífuga modelo H-70; 3 – Centrífuga modelo 1400 PF; 4 – Centrífuga modelo DIK-560.

Com base nos dados obtidos pelo ensaio de centrifugação, a equação de van Genuchten, mostrada a seguir, foi ajustada aos pontos levantados experimentalmente:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^{n_G}} \right]^{1 - \frac{1}{n_G}} \quad (5.1)$$

em que θ é a umidade do solo (adimensional); θ_r é a umidade residual do solo (adimensional); θ_s é a umidade de saturação do solo (adimensional); α é uma constante com o sinal inverso do potencial matricial (kPa^{-1}); h é o potencial matricial (kPa); e n_G é uma constante (adimensional).

Os valores dos parâmetros θ_r , α e n_G da Equação 5.1 foram estimados pela técnica dos mínimos quadrados, utilizando planilha eletrônica.

Por meio dos resultados obtidos no ensaio de centrifugação, algumas propriedades físicas do solo foram estimadas: massa específica aparente, capacidade de campo (teor de umidade do solo na tensão de -0,33atm), ponto de murcha permanente (teor de umidade do solo na tensão de -15atm), porosidade (teor de umidade de saturação do solo), microporosidade (porcentagem de água extraída da amostra indeformada do solo, na tensão de -0,06atm) e macroporosidade (diferença entre a porosidade e a microporosidade).

5.2.3 - Coeficiente de permeabilidade

5.2.3.1 - Coeficiente de permeabilidade do solo saturado

Como já citado, as amostras indeformadas foram utilizadas tanto nos ensaios para determinação da curva de retenção de água no solo, como nos ensaios para a determinação do coeficiente de permeabilidade do solo saturado.

O ensaio para a determinação do coeficiente de permeabilidade do solo saturado foi efetuado por um técnico da Embrapa, de acordo com as seguintes etapas:

- 1) As amostras saturadas por 24 horas foram retiradas da bandeja, de forma individual, com o auxílio de uma espátula. Na parte superior da amostra foi fixada uma tela, com a função de evitar a perda de material. A amostra, juntamente com a tela, foi colocada dentro do recipiente do permeâmetro de carga constante, com a parte superior da amostra em contato com a base inferior do recipiente. Após esse procedimento o papel filtro foi

retirado e, com o auxílio de uma pequena espátula, o material que estava retido no papel filtro foi coletado e colocado sobre a amostra;

2) Na parte superior do amostrador foi fixado um anel de borracha preso a uma cápsula. Essa cápsula possui um dreno, que permite que a carga sobre a amostra fique constante;

3) Antes da abertura do registro do bocal, foi colocado um pedaço do papel filtro sobre a amostra, procurando, dessa forma, evitar que a vazão do bocal provocasse a erosão da camada superior da amostra. Em seguida, o registro do bocal foi aberto;

4) Para que o sistema entrasse em equilíbrio, para cada amostra ensaiada foi esperado 30min. Após esse intervalo de tempo, a medição foi efetuada. O procedimento da medição consistiu em colocar uma proveta graduada na parte inferior do recipiente do permeâmetro de carga constante (Figura 5.6) e, para um dado intervalo de tempo, medir o volume de água coletado;

5) O coeficiente de permeabilidade do solo saturado foi determinado com a equação a seguir:

$$k_i = \frac{Vol}{A_m \Delta t \frac{h_1}{l}} \quad (5.2)$$

em que k_i é o coeficiente de permeabilidade do solo saturado de uma profundidade i qualquer (cm/s); Vol é o volume de água coletado na proveta graduada durante o Δt (ml); l é a altura do cilindro do amostrador (cm) (igual a 5,1cm); A_m é a área superficial do amostrador (cm²) (igual a 20cm²); h_1 é a carga hidráulica (cm) (igual a 6,8cm); e Δt é o intervalo de tempo (s).

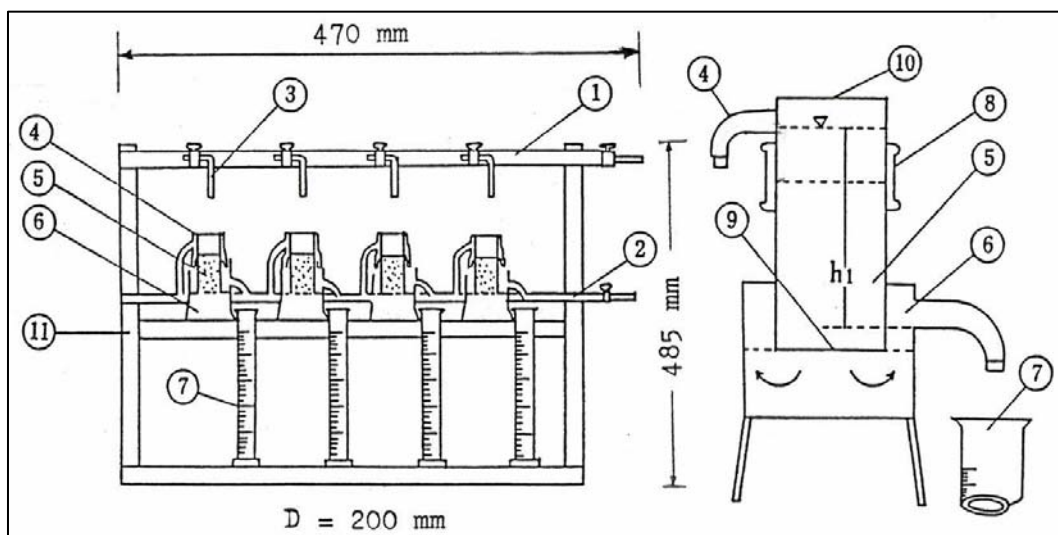


Ilustração à esquerda: 1 – tubulação de suprimento de água; 2 – tubulação de drenagem; 3 – bocal para o suprimento da água; 4 – adaptador de carga constante; 5 – amostra de solo; 6 – recipiente onde o amostrador é colocado; 7 – proveta graduada; e 11 – suporte da estrutura. Ilustração à direita: 4 – adaptador de carga constante; 5 – amostra de solo; 6 – recipiente onde o amostrador com o solo é colocado; 7 – proveta graduada; 8 – anel de borracha; 9 – disco livre com tampa; e 10 – cápsula onde o anel de borracha é preso.

Figura 5.6 – Permeômetro de carga constante (Fonte: Manual do fabricante Daiki Rika Kogyo Co., LTD.).

5.2.3.2 - Coeficiente de permeabilidade do solo em função de θ

A partir do coeficiente de permeabilidade do solo saturado e da curva de retenção de água no solo, ajustada pela equação de van Genuchten (Equação 5.1), foi estimado o coeficiente de permeabilidade do solo em função de θ , pela equação de Mualem, como mostrado a seguir (Mualem, 1986):

$$k(\theta) = k_{sat} \left[\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right]^{\frac{1}{2}} \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right)^{\frac{1}{m_G}} \right]^{m_G} \right\}^2 \quad (5.3)$$

em que $k(\theta)$ é o coeficiente de permeabilidade do solo em função do seu teor de umidade (cm/s); k_{sat} é o coeficiente de permeabilidade do solo saturado (cm/s); θ é a umidade do solo (adimensional); θ_r é a umidade residual do solo (adimensional); θ_s é a umidade de saturação do solo (adimensional); e m_G é uma constante que, de acordo com

van Genuchten (1980, *apud* Letha e Elango, 1994), pode ser obtido com o uso da equação

$$m_G = 1 - \frac{1}{n_G} \text{ sendo } n_G \text{ uma constante (adimensional).}$$

5.3 - MONITORAMENTO DO FLUXO DE ÁGUA NA ZONA NÃO SATURADA DO SOLO

Para o monitoramento do fluxo de água na zona não saturada do solo foram instalados dois tipos de equipamentos nas parcelas experimentais, os tensiômetros e os umidímetros de bloco de gesso.

5.3.1 - Tensiômetros

Os tensiômetros foram utilizados com a finalidade de monitorar a frente de umidade no solo. Esse monitoramento foi efetuado por meio de levantamentos de tensões de sucção no solo, durante a realização das campanhas intensivas.

Ao longo da fase experimental deste trabalho, dois tipos de tensiômetros foram utilizados. Os tensiômetros com manômetros de vácuo (Figura 5.7), fabricados por Soil Moisture Equipment, Santa Barbara, Estados Unidos. E, os tensiômetros com colunas de mercúrio (Figura 5.7), fabricados por Apager, Charqueada, São Paulo.

O tensiômetro com manômetro de vácuo é constituído por quatro elementos, sendo eles: um tubo de acrílico, que é o corpo do tensiômetro; uma cápsula cerâmica, que é rosqueada na parte inferior do tubo de acrílico, sendo responsável pelo contato entre o solo e a coluna de água existente dentro do tubo de acrílico; um “*jetfill*”, que é rosqueado na parte superior do tubo de acrílico, tendo a função de injetar água dentro do tubo para a eliminação de bolhas de ar; e um manômetro de vácuo, que permite a leitura das tensões de sucção, expressas em centibar. O tensiômetro com coluna de mercúrio, por sua vez, tem o tubo, que é a estrutura do tensiômetro, em material de PVC, o “*jetfill*” é substituído por uma tampa rosqueada e o manômetro de mercúrio, de onde são obtidas as leituras das tensões de sucção, é fixado e protegido por uma haste de alumínio. Para a conversão da leitura coletada no manômetro de mercúrio em leitura de tensão de sucção da água do solo, foi utilizada a seguinte equação:

$$H_a = 12,6 L_{Hg} \quad (5.4)$$

em que H_a é a tensão de sucção da água do solo (cm de água) e L_{Hg} é a leitura da coluna de mercúrio (cm de mercúrio).



A – manômetro de vácuo; B – “jetfill”; C – tubo de acrílico, sendo o corpo do tensiômetro; D – cápsula porosa; e 4 – destaque da haste de alumínio que sustenta e protege o manômetro de mercúrio, e do tubo de ligação entre o tensiômetro, em material de PVC, e o manômetro de mercúrio.

Figura 5.7 – Modelos dos tensiômetros utilizados na fase experimental:
1 e 2 – Tensiômetros com manômetro de vácuo; e 3 e 4 – Tensiômetros com coluna de mercúrio.

Em cada parcela experimental, foram instalados três tensiômetros. Nas propriedades P1 e P3, nas Parcelas A, foram instalados tensiômetros a 0,50, 0,90 e 1,5m de profundidade. Os tensiômetros instalados a 1,5m de profundidade, eram com manômetro de mercúrio, e os demais, com manômetro de vácuo. Nas propriedades P2 e P4, nas Parcelas A, foram instalados tensiômetros com manômetro de vácuo, nas profundidades a 0,50, 0,70 e 0,90m. Em todas as propriedades, nas Parcelas B, foram instalados tensiômetros com manômetro de vácuo, nas profundidades a 0,30, 0,50 e 0,90m.

A instalação dos tensiômetros foi realizada com o auxílio de um trado helicoidal com quatro centímetros de diâmetro. Depois da abertura do furo, e antes da instalação dos tensiômetros, uma massa pastosa de gesso foi preparada e colocada no interior dos furos, procurando, dessa forma, garantir o contato entre as cápsulas porosas dos tensiômetros e as paredes dos furos. Ao término da instalação, “*pellets*” (grânulos) de bentonita foram colocados entre as paredes do solo e as paredes dos tensiômetros, próximo à superfície do solo. Antes de tampar completamente o furo, com o solo retirado durante a escavação do mesmo, os “*pellets*” de bentonita foram molhados com água. Esses “*pellets*” tiveram a função de evitar a formação de caminhos preferenciais, do fluxo de água vertical, entre as paredes do solo e as paredes do tensiômetro. Na Figura 5.8 é mostrado os tensiômetros sendo instalados na propriedade P2 e o trado utilizado na abertura dos furos. A instalação dos tensiômetros, apresentada na Figura 5.8, representa a fase que antecede a colocação dos “*pellets*” de bentonita.



Figura 5.8 – Instalação dos tensiômetros (1 e 2) e trado utilizado na abertura dos furos (3 e 4).

5.3.2 - Umidímetros de bloco de gesso

Os umidímetros de bloco de gesso, assim como os tensiômetros, também foram utilizados para monitorar a frente de umidade no solo. Esse monitoramento foi efetuado por meio de determinações indiretas do teor de umidade do solo, durante a realização das campanhas intensivas (item 5.3.1).

Os umidímetros de bloco de gesso (Figura 5.9) utilizados na fase experimental deste trabalho foram fabricados por Delmhorst Instrument CO., Towaco, Estados Unidos. O aparelho de leitura utilizado é o modelo KS-D1 (Figura 5.9) do mesmo fabricante dos umidímetros de bloco de gesso.

O procedimento utilizado para a instalação dos umidímetros de bloco de gesso e o material empregado no processo foram semelhantes ao utilizado para os tensiômetros; a única diferença foi a utilização de um tubo de PVC de $\frac{3}{4}$ " ($19 \times 10^{-3}\text{m}$) como guia. Com o auxílio do tubo, a instalação dos umidímetros, nas profundidades desejadas, puderam ser efetuadas sem a ocorrência de danos a esses sensores.

A tentativa de calibrar os umidímetros de bloco de gesso foi realizada em função do teor de umidade do solo, embora, como já descrito no item 3.2.5.3, a melhor forma de obter a mesma é por meio da relação entre as leituras obtidas nos umidímetros e o potencial de água do solo, como na Figura 5.10, fornecida pelo fabricante.

Para a realização da calibração, amostras de solo foram coletadas durante uma das campanhas intensivas. As amostras foram coletadas nos mesmos horários em que os dados da campanha intensiva eram tomados. Devido à coleta da amostra do solo ser demorada, o início e o término da mesma variavam em torno de ± 20 minutos em relação às leituras realizadas nos equipamentos. Em cada coleta, as amostras de solo foram colocadas em sacos plásticos e acondicionadas em caixas de isopor. No fim de cada coleta, essas amostras, que eram relacionadas às profundidades nas quais os umidímetros de bloco de gesso foram instalados e que estavam acondicionadas na caixa de isopor, foram pesadas e identificadas na própria propriedade. Após as amostras terem sido coletadas, pesadas e identificadas, em todas as parcelas e em todas as propriedades, o procedimento adotado

para a determinação do teor de umidade do solo foi o método padrão de estufa, descrito no item 3.2.5.1.

No Apêndice B são apresentadas as tabelas contendo as datas e os horários de secagem das amostras de solo, para a determinação do teor de umidade do solo.



1 – aparelho de leitura e umidímetro de bloco de gesso; 2 – fios condutores do condutivímetro de bloco de gesso, antes de serem acoplados ao aparelho de leitura; 3 – fios condutores do umidímetro de bloco de gesso, depois de terem sido acoplados ao aparelho de leitura; e 4 – realização de uma leitura.

Figura 5.9 – Umidímetro de bloco de gesso e aparelho de leitura utilizado.

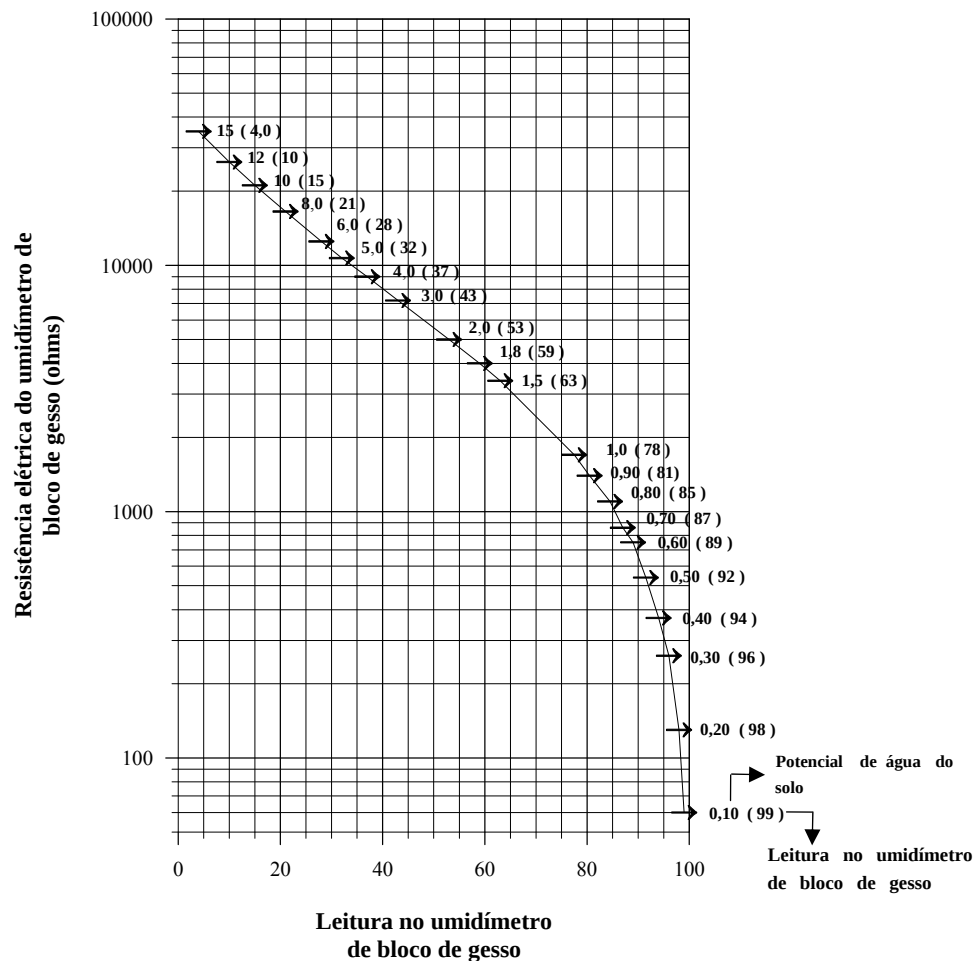


Figura 5.10 – Curva de calibração do umidímetro de bloco de gesso (Fonte: Manual do fabricante Delmhorst Instrument CO.).

5.3.3 - Campanha intensiva de monitoramento da frente de umidade no solo

As campanhas intensivas são campanhas realizadas para coleta de dados do teor de umidade do solo entre turnos de rega (Tabela 5.4). Os dados do teor de umidade do solo foram obtidos indiretamente por leituras nos tensiômetros e nos umidímetros de bloco de gesso.

A primeira campanha intensiva, executada em todas as quatro propriedades, foi efetuada de acordo com os seguintes critérios:

- 1) A primeira leitura foi realizada antes da irrigação;
- 2) A segunda leitura após o término da irrigação;
- 3) Entre a terceira e a décima leitura, as leituras foram efetuadas de 15 em 15min em relação às leituras anteriores;

- 4) Entre a décima primeira e décima quarta leitura, as leituras foram efetuadas de 30 em 30min em relação às leituras anteriores;
- 5) Da décima quinta leitura em diante as leituras foram efetuadas de 1 em 1 hora em relação às leituras anteriores; e
- 6) A última leitura da campanha foi executada antes do início da próxima irrigação.

A segunda campanha intensiva, executada em todas as quatro propriedades, também foi efetuada de acordo com alguns critérios:

- 1) Semelhante ao realizado na primeira campanha;
- 2) Semelhante ao realizado na primeira campanha; e
- 3) Da terceira leitura em diante, as leituras foram efetuadas de 1 em 1 hora em relação às leituras anteriores, com algumas exceções:

_ Entre a última leitura antes do almoço e a primeira leitura depois do almoço, o intervalo foi de 2 horas.

_ Entre a última leitura antes do jantar e a primeira leitura na parte da manhã do dia seguinte, o intervalo foi de 12 horas. No meio tempo entre essas duas leituras foi efetuada uma leitura.

_ Por último, entre a última leitura antes do almoço e a primeira leitura depois do almoço, ambas realizadas no dia seguinte, o intervalo foi de 3 horas. Essa primeira leitura depois do almoço foi a última leitura dessa campanha.

A terceira, quarta e quinta campanhas intensivas foram executadas de forma semelhante à segunda campanha intensiva. A única diferença foi relacionada à última leitura da campanha, em que essa foi realizada 24 horas após a segunda leitura.

As datas relacionadas às cinco campanhas intensivas de monitoramento da frente de umidade no solo estão apresentadas na Tabela 5.5.

Tabela 5.4 – Turno de rega relacionado às parcelas experimentais de cada propriedade (Dados da tabela expressos em hora).

	P1	P2	P3	P4
Parcela A	24	24	24	72
Parcela B	48	24	24	72

Tabela 5.5 – Datas das cinco campanhas intensivas de monitoramento da frente de umidade no solo, realizadas nas quatro propriedades, durante o ano de 2004.

Propriedades /	P1		P2	
Campanhas	Parcela A	Parcela B	Parcela A	Parcela B
1º	17/07 a 18/07	17/07 a 19/07	08/07 a 09/07	08/07 a 09/07
2º	19/08 a 20/08	19/08 a 20/08	12/08 a 13/08	12/08 a 13/08
3º	28/09 a 29/09	28/09 a 29/09	28/09 a 29/09	28/09 a 29/09
4º	30/09 a 01/10	30/09 a 01/10	29/09 a 30/09	29/09 a 30/09
5º	04/10 a 05/10	04/10 a 05/10	05/10 a 06/10	05/10 a 06/10

Propriedades /	P3		P4	
Campanhas	Parcela A	Parcela B	Parcela A	Parcela B
1º	18/07 a 19/07	18/07 a 19/07	20/07 a 23/07	20/07 a 23/07
2º	30/07 a 31/07	05/08 a 06/08	26/08 a 27/08	26/08 a 27/08
3º	24/09 a 25/09	24/09 a 25/09	23/09 a 24/09	23/09 a 24/09
4º	29/09 a 30/09	29/09 a 30/09	30/09 a 01/10	30/09 a 01/10
5º	05/10 a 06/10	05/10 a 06/10	04/10 a 05/10	04/10 a 05/10

5.4 - BALANÇO HÍDRICO

5.4.1 - Parâmetros necessários para a determinação do balanço hídrico

5.4.1.1 - Medição volumétrica das vazões das bombas hidráulicas pelo bombeamento de um volume de água conhecido (vazão real captada)

Os materiais utilizados nesse ensaio foram: uma caixa de água em fibra de vidro de 500L, formato tronco-cônico; uma fita milimetrada colada em uma haste de madeira; e um cronômetro. As dimensões da caixa de água são: diâmetro da base igual a 1,0m, diâmetro da parte superior igual a 1,2m e altura igual a 0,56m.

O ensaio foi realizado por meio do bombeamento de um volume de água da caixa durante um intervalo de tempo. O volume de água bombeado durante os ensaios compreendeu o volume de água existente entre o nível da extremidade superior da caixa e o menor nível possível, considerado como sendo aquele em que ainda não ocorre a entrada de ar na

tubulação de sucção. Para obter o menor nível de água dentro da caixa, o procedimento realizado foi o de inclinar a caixa nos segundos finais dos ensaios. O cronômetro nesse ensaio só era acionado no momento em que o sistema de irrigação estava estabilizado e a entrada de água para a caixa era interrompida.

O nível de água restante na caixa, após cada ensaio, foi medido por uma fita milimetrada colada em uma haste de madeira. A conversão do nível da água em volume de água foi efetuada por meio da interpolação entre o valor medido e os valores obtidos na calibração da caixa de água.

Para que as vazões reais das bombas hidráulicas fossem expressas em lâmina real de água por unidade de tempo, as vazões medidas foram divididas pela área de cada parcela experimental.

5.4.1.2 - Medição indireta das vazões das bombas hidráulicas por medidas da corrente elétrica de alimentação dos motores das bombas hidráulicas

Hoje, a grande parte dos profissionais, que trabalham com a gestão dos recursos hídricos, estima por meio de questionários ou por consumo de energia elétrica (via conta da concessionária), o volume de água que é captado para sistemas de irrigação. O emprego da metodologia proposta nesse item, tem por finalidade, aferir a aplicabilidade desse tipo de medição de vazão, fornecendo uma ferramenta simples a estudos que necessitem dessa informação.

Os materiais utilizados nesse ensaio foram: um alicate amperimétrico e um nível a laser (Figura 5.11).

As medições das correntes elétricas, que alimentam os motores das bombas hidráulicas, foram efetuadas por meio do alicate amperimétrico. O valor da corrente elétrica utilizado no cálculo das vazões de cada uma das quatro bombas hidráulicas foi obtido pela média entre as leituras realizadas nos três fios de cada um dos motores elétricos. As medições de corrente elétrica só foram efetuadas quando o sistema de irrigação estava estabilizado.

A diferença de nível entre as bombas hidráulicas e as parcelas experimentais foi medida pelo nível a laser, apresentado na figura a seguir:



Figura 5.11 – Nível a Laser (1) e detector do laser, que fica preso à régua (2).

O cálculo da potência do motor elétrico das bombas hidráulicas foi realizado por meio da aplicação dos valores das correntes elétricas na Equação 3.6. O fator de potência ($\cos \varphi$), variável utilizada nessa equação, foi tomado, na propriedade P2, na placa de identificação do motor elétrico. Nas demais propriedades – P1, P3 e P4 – foi atribuído a essa variável o mesmo valor da bomba hidráulica da propriedade P2. Esse procedimento foi necessário pois as placas de identificação dos motores elétricos das bombas hidráulicas não apresentaram condições para a identificação do valor de $\cos \varphi$.

A partir da Equação 3.7 (equação da potência do motor elétrico em função da vazão da bomba hidráulica), as vazões das bombas hidráulicas foram determinadas. Para essa determinação, o produto entre η e η_m foi assumido em torno de 0,60. O produto desses dois rendimentos geralmente varia entre 0,50 e 0,70. A determinação da vazão foi efetuada utilizando tanto a potência do motor elétrico calculada como a potência do motor elétrico fornecida pelo fabricante (potência nominal). O emprego da potência nominal teve o intuito de verificar o erro cometido caso a estimação da vazão fosse feita por esse valor.

Na Equação 3.7 a altura manométrica (H) foi determinada pela soma da perda de carga com a altura do tubo de elevação e com a diferença de nível da sucção e do recalque. Para

a determinação da perda de carga nas linhas dos aspersores (linhas secundárias), foi realizada a tomada de pressão no primeiro ponto da linha (primeiro aspersor) e no último ponto da mesma (último aspersor). Para a determinação da perda de carga na tubulação de sucção e na tubulação de recalque, tubulação sendo considerada até a derivação da linha principal com a linha secundária, foi utilizada a Equação 3.2 (equação da fórmula universal) nas tubulações de 4" e de 3" (sucção e linha principal) e a Equação 3.3 (equação da fórmula de Hazen-Williams) na tubulação de 2" (início da linha secundária até o primeiro aspersor ou canhão hidráulico); o croqui desse sistema é apresentado na figura a seguir. Na propriedade P1, além da determinação da perda de carga por meio da fórmula universal e da fórmula de Hazen-Williams, a mesma foi determinada pela diferença de pressão entre a bomba e as linhas de irrigação, tendo sido desprezada, nesse caso, a perda de carga na tubulação de sucção, que é muito pequena. Na fórmula universal, os valores do fator de atrito (f) foram obtidos de valores tabelados em Porto (1999); as vazões utilizadas para encontrar essa variável foram as vazões reais captadas. Nas tubulações de 2" (início da linha secundária até o primeiro aspersor ou canhão hidráulico), a fórmula universal não foi utilizada pois as vazões reais das bombas eram maiores do que as vazões apresentadas nas tabelas de f (ver Porto 1999).

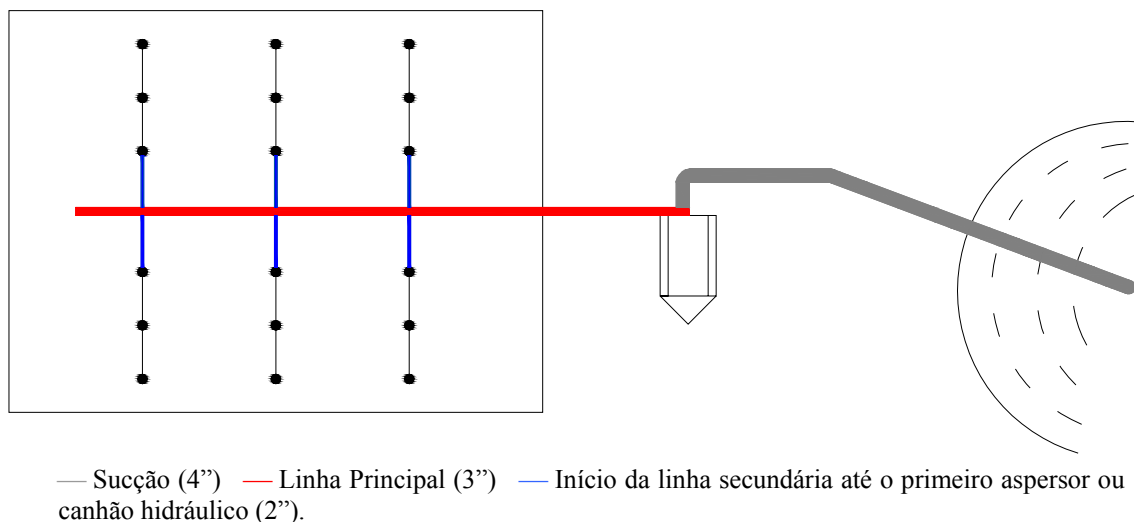


Figura 5.12 – Croqui do sistema de irrigação.

Para que as vazões estimadas das bombas hidráulicas fossem expressas em lâmina estimada de água por unidade de tempo, essas vazões foram divididas pela área de cada parcela experimental.

5.4.1.3 - Medição, de forma direta, das vazões dos aspersores e canhões hidráulicos (vazão aspergida)

A determinação direta da vazão dos aspersores ou canhões hidráulicos foi realizada com o auxílio de duas curvas de PVC, de um cronômetro e de um recipiente de volume conhecido. O ensaio consistiu em medir o intervalo de tempo que cada aspersor, que contribuía com cada parcela experimental, demorava para encher o recipiente. Para facilitar a medição, a mola de controle do braço oscilante do aspersor (Figura 3.2) foi desarmada. As medições nesse ensaio só foram efetuadas depois que o sistema de irrigação estava estabilizado. O valor da vazão dos aspersores e dos canhões hidráulicos, que contribuiu com cada parcela experimental, foi tomado, para fins de cálculo das perdas hídricas, como sendo a média dos valores medidos.

5.4.1.4 - Medição, de forma indireta, das vazões dos aspersores e canhões hidráulicos, por meio do ensaio da uniformidade de aplicação da água (vazão efetiva aplicada)

A determinação da vazão média dos aspersores ou canhões hidráulicos, por meio do ensaio da uniformidade de aplicação da água, foi conduzida com o kit de ensaio de precipitação, fabricado pela FABRIMAR IRRIGAÇÃO. Na realização do ensaio, as malhas em que os pluviômetros foram distribuídos variaram em função do número de linhas de aspersores que contribuía com cada parcela experimental, da distância entre essas linhas e da distância entre os aspersores dessas linhas. Após os ensaios, a lâmina de água armazenada em cada pluviômetro foi medida com a proveta calibrada em mm. No Apêndice C são mostrados: os mapas de contorno, que representam a uniformidade de aplicação da água dos aspersores; o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC); e o coeficiente de uniformidade de distribuição, calculado segundo a fórmula do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos.

O ensaio de uniformidade de aplicação da água pelos aspersores foi empregado não somente para a determinação da vazão, de forma indireta, dos aspersores e canhões hidráulicos, mas também para determinar o que efetivamente entra nas parcelas experimentais, pois parte da água emitida pelos aspersores é perdida devido ao vento, ou para a atmosfera (fatores: umidade relativa do ar e temperatura). Com base na medição, de

forma direta, da vazão dos aspersores ou canhões hidráulicos, essa perda não é possível de ser mensurada.



Figura 5.13 – Ensaio do levantamento da uniformidade de aplicação da água dos aspersores: 1 – Parcela A, propriedade P2; e 2 – Parcela B, propriedade P1.

5.4.1.5 - Interceptação

A interceptação foi estimada por meio da Equação 3.1 (equação de Horton). Quando as culturas estavam no estágio inicial de desenvolvimento, os parâmetros utilizados na equação de Horton foram os recomendados para pequenas culturas ($a = 0,02h_{pl}$; $b = 0,15h_{pl}$; $n = 1,0h_{pl}$; e $f_i = 0,25h_{pl}$). Os parâmetros para pequenas culturas foram utilizados também para todas as campanhas intensivas de monitoramento da frente de umidade no solo da propriedade P1, Parcela A, uma vez que a cultura não cobre todo o solo. Quando as culturas atingiram o seu estágio de maturação, foram utilizados os parâmetros recomendados para as forrageiras, considerando, nessa situação, que o solo estava completamente coberto ($a = 0,01h_{pl}$; $b = 0,10h_{pl}$; $n = 1,0$; e $f_i = 1,0$). Para a propriedade P1, Parcela B, cultivada com milho, os parâmetros utilizados para a equação

de Horton, ao longo de todas as campanhas intensivas de monitoramento da frente de umidade no solo, foram os relacionados a essa cultura ($a = 0,05h_{pi}$; $b = 0,005h_{pi}$; $n = 1,0$; e $f_i = 0,10h_{pi}$). Diferentemente das outras propriedades, para a propriedade P4, Parcelas A e B, os parâmetros utilizados, ao longo de todas as campanhas intensivas de monitoramento da frente de umidade no solo, para a equação de Horton, foram os referidos ao pomar “*beech*” ($a = 0,04$; $b = 0,18$; e $n = 1,0$).

Os parâmetros de interceptação do pomar “*beech*” (árvores de casca lisa cinzenta e madeira dura) foram utilizados como uma aproximação para as culturas da berinjela e jiló.

Na Tabela 5.6 são apresentadas as alturas das culturas ao longo das campanhas intensivas de monitoramento da frente de umidade no solo utilizadas no cálculo da interceptação.

Tabela 5.6 – Alturas das culturas utilizadas no cálculo da interceptação
(Dados da tabela expressos em m).

Propriedades / Campanhas	P1		P2	
	Parcela A	Parcela B	Parcela A	Parcela B
1º	0,50	0,05	0,25	0,05
2º	0,50	1,0	0,25	0,25
3º	0,50	1,0	0,25	0,25
4º	0,50	1,0	0,25	0,25
5º	0,50	1,0	0,25	0,25

Propriedades / Campanhas	P3		P4	
	Parcela A	Parcela B	Parcela A	Parcela B
1º	0,05	0,05	1,0	0,80
2º	0,10	0,10	1,0	0,80
3º	0,25	0,25	1,0	0,80
4º	0,25	0,25	1,0	0,80
5º	0,25	0,05	1,0	0,80

5.4.1.6 - Evapotranspiração real da cultura

A evapotranspiração real da cultura (ET_{rc}), para os dias em que ocorreram as campanhas intensivas, foi estimada por meio da relação entre o coeficiente de cultura (K_c), o coeficiente de estresse (K_s) e a evapotranspiração de referência (ET_o).

O coeficiente de cultura foi obtido por valores tabelados em Allen *et al.* (1998), os quais foram obtidos para clima semi-úmido, havendo então a necessidade da correção para clima do cerrado. Como em Allen *et al.* (1998) não é apresentado esse tipo de clima, a correção foi realizada com valores do clima semi-árido, por meio de um gráfico que relaciona a altura das culturas e a velocidade do vento a 2,0m de altura (U_2) com o valor de correção para o K_c médio (ver Allen *et al.* 1998).

Os dados de velocidade do vento foram coletados em uma estação meteorológica automática localizada na bacia do Descoberto. A velocidade coletada nessa estação foi a velocidade do vento a 10m de altura da superfície do solo. Para que a velocidade fosse corrigida para a altura de 2,0m em relação à superfície do solo, a velocidade do vento a 10m de altura foi multiplicada por um fator de 0,748 obtido com a equação a seguir (Allen *et al.*, 1998):

$$\text{Fator de Correção} = \frac{4,87}{\ln(67,8A_A - 5,42)} \quad (5.7)$$

em que A_A é a altura do anemômetro (sensor que mede a velocidade do vento).

O coeficiente de estresse foi determinado por meio de uma equação em função do teor de umidade do solo. De acordo com Bernardo (1995), a equação de K_s é expressa por:

$$K_s = \frac{\ln [(UA - Pm) + 1,0]}{\ln [(Cc - Pm) + 1,0]} \quad (5.8)$$

em que K_s é o coeficiente de estresse; UA é a umidade real do solo (mm); Pm é a umidade do solo correspondente ao ponto de murcha (mm); e Cc é a umidade do solo correspondente à capacidade de campo (mm).

O P_m e a C_c foram estimados por meio de relações entre o teor de umidade da amostra do solo com a tensão média relacionada a essa umidade, obtidas no ensaio de centrifugação (item 5.2.2). A U_A foi assumida como sendo o valor médio obtido da relação entre os valores da tensão de sucção (tensiômetros) com as curvas de retenção de água no solo, para a profundidade radicular, nas campanhas intensivas de monitoramento do fluxo de água na zona não saturada do solo.

Os dados da evapotranspiração de referência utilizados foram os fornecidos pela Estação Principal da EMBRAPA/CPAC-DF, localizada na latitude de 15°35'30 e na longitude de 47°42'00; determinados utilizando a equação de Penman-Monteith.

5.4.1.7 - Modelagem matemática do fluxo de água na zona não saturada do solo

A modelagem matemática do fluxo de água na zona não saturada do solo foi efetuada com o uso do programa SSFLO (Koide, 1990). Foi utilizada a versão adaptada por Campos (1998), sendo as modificações introduzidas referentes às formulações dos modelos de teste utilizados, mantendo a estrutura do programa original.

Campos (1998), analisando diferentes algoritmos de cálculo, como descrito no item 4.1.2, concluiu que o modelo de Neuman, utilizando a matriz de armazenamento na forma aglutinada, integração por quadratura de Gauss e cálculo do coeficiente de capacidade (C) pela declividade da corda, foi o que apresentou o melhor desempenho global nos resultados obtidos, sendo a opção de cálculo mais confiável e a utilizada neste trabalho para a simulação do fluxo de água na zona não saturada do solo.

Os parâmetros dos tipos de solo, as condições de contorno e as condições iniciais utilizados na simulação numérica foram levantados para todas as propriedades. Os parâmetros dos tipos de solo foram obtidos por meio de ensaios laboratoriais, enquanto as condições de contorno e as condições iniciais foram obtidas por meio das campanhas intensivas de monitoramento do fluxo de água na zona não saturada do solo.

A geometria da região utilizada na simulação numérica foi semelhante à descrita por Campos (1998), no teste do algoritmo para o caso do experimento do Elmaloglou. Foi

utilizada malha simétrica (Figura 5.14), e os resultados utilizados foram tomados no eixo de simetria. Nesse eixo o fluxo horizontal deve ser nulo.

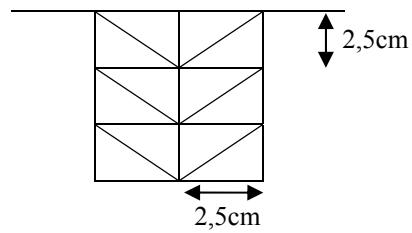


Figura 5.14 – Malha triangular utilizada na simulação numérica do programa SSFLO.

As profundidades das malhas usadas na simulação, foram de 0,90m para quase todas as campanhas intensivas, de todas as propriedades, com exceção para a 3º, 4º e 5º campanhas, realizadas nas Parcelas A, das propriedades P1 e P3, que foram de 1,5m.

5.4.2 - Perdas hídricas

5.4.2.1 - Perda hídrica ocorrida nos sistemas de irrigação

A perda hídrica no sistema de irrigação foi estimada por meio da seguinte equação:

$$\text{Perda hídrica no sistema de irrigação} = \left[\frac{(\text{lâmina real de água captada} - \text{lâmina de água aspergida})}{\text{lâmina real de água captada}} \right] \times 100 \quad (5.9)$$

5.4.2.2 - Perda hídrica ocorrida nas parcelas experimentais

A perda hídrica nas parcelas experimentais foi estimada por meio da seguinte equação:

$$\text{Perda hídrica na aspersão} = \left[\frac{(\text{lâmina de água aspergida} - \text{lâmina de água efetiva} - \text{interceptação})}{\text{lâmina de água aspergida}} \right] \times 100 \quad (5.10)$$

A perda hídrica denotada por desperdício (água aplicada em excesso) foi estimada por meio da seguinte equação:

$$\text{Desperdício} = \left[\frac{(\text{lâmina de água efetiva} - \text{interceptação} - \text{evapotranspiração real da cultura})}{(\text{lâmina de água efetiva} - \text{interceptação})} \right] \times 100 \quad (5.11)$$

A perda hídrica por percolação foi estimada por meio da seguinte equação:

$$\text{Perda hídrica por percolação} = \left\{ 1 - \left[\frac{(\text{lâmina de água efetiva} - \text{interceptação} - \text{percolação})}{(\text{lâmina de água efetiva} - \text{interceptação})} \right] \right\} \times 100 \quad (5.12)$$

5.4.2.3 - Perda hídrica total

A perda hídrica total foi estimada por meio da seguinte equação:

$$\text{Perda hídrica total} = \left[\frac{(\text{lâmina real de água captada} - \text{lâmina de água efetiva} - \text{interceptação} - \text{percolação})}{\text{lâmina real de água captada}} \right] \times 100 \quad (5.13)$$

6 - ESTUDO DE CASOS

6.1 - DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A parte experimental do trabalho foi instalada e conduzida nas sub-bacias do Capão Comprido e do Rodeador, pertencentes à bacia do Descoberto. De acordo com Ribeiro *et al.* (2000), a bacia possui uma área de 896km², incluindo a bacia de contribuição do lago do Descoberto; e está situada, aproximadamente, entre as latitudes de 15°46'35S e 16°05'30S e entre as longitudes 48°04'30W e 48°16'41W. O rio Descoberto é formado pelos córregos do Barracão e Capão da Onça, nascendo na região administrativa de Braslândia e desaguando no rio Corumbá. É considerado um rio de domínio federal, uma vez que faz divisa com dois estados, o Distrito Federal e o estado de Goiás. O lago do Descoberto é o principal manancial de abastecimento do DF, sendo responsável por cerca de 63% de toda a água captada pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB) (Christofidis, 2000).

Devido à pequena área territorial do Distrito Federal, o clima geralmente não varia muito entre um ponto e outro dentro do estado. A classificação do DF, segundo o critério de Köppen, diz que o clima se enquadra em dois tipos, o tropical – Aw e o tropical de altitude – Cwa e Cwb. Para a bacia do Descoberto, o clima predominante é o tropical de altitude, tanto o Cwa como Cwb. As estações são bem definidas, existindo uma quente e chuvosa que se estende de outubro a abril, e outra fria e seca compreendendo os meses entre maio e setembro. As temperaturas média, máxima absoluta e mínima absoluta ao longo do ano são, respectivamente, 21°C, 35°C e 2,0°C. A umidade relativa do ar, por sua vez, varia entre 25% no inverno e 68% no verão. O mês mais seco do ano é setembro e o mais chuvoso é dezembro. A média anual das precipitações pluviométricas varia, mais ou menos, entre 1200mm e 1750mm (CODEPLAN, 1984; Guia de Brasília, 2004).

Para Steinke e Steinke (2000), a classificação de Köppen não satisfaz mais o caráter explicativo da climatologia moderna, uma vez que não é levada em consideração a dinâmica da atmosfera representada pela atuação das massas de ar. Os mesmos autores sugerem que a classificação climática de Strahler (1994, *apud* Steinke e Steinke, 2000) é mais moderna e explicativa do que a anterior, pois há a consideração dos deslocamentos

das massas de ar e dos sistemas produtores de tempo a elas associadas. Assim, de acordo com essa classificação, o Distrito Federal é enquadrado no clima do tipo Tropical Alternadamente Úmido e Seco.

6.2 - MÉTODOS DE IRRIGAÇÃO PRATICADOS NA BACIA DO DESCOBERTO

De acordo com Cardoso e Netto (2000), os métodos de irrigação praticados na bacia são a irrigação por aspersão, a irrigação por sulco, a irrigação por gotejamento e a irrigação por inundação. Entre os métodos de irrigação o de aspersão corresponde a 99,6% dos métodos praticados na bacia, seguido de 0,25% para a irrigação por sulco, 0,09% para a irrigação por gotejamento e 0,06% para a irrigação por inundação.

Nas quatro propriedades onde foram instaladas as parcelas experimentais, o método de irrigação utilizado é a aspersão convencional. Em uma das propriedades, a P1, além da aspersão convencional, o proprietário faz uso de canhões hidráulicos em alguns de seus talhões.

Na propriedade P1, localizada na sub-bacia do Capão Comprido, o sistema de captação de água, para a alimentação do sistema de irrigação, é efetuado de um reservatório retangular, revestido de cimento. O conjunto motobomba utilizado é da WEG, cuja bomba de água é centrífuga, com o motor elétrico de 15C.V.. A tubulação de sucção é de 4" ($10 \times 10^{-2}\text{m}$), enquanto que a tubulação de recalque é de 3" ($7,5 \times 10^{-2}\text{m}$). Mesmo dispondo de uma bomba de água com tal potência, quando a irrigação é feita em um talhão onde os canhões hidráulicos são utilizados, eles não são operados ao mesmo tempo, e sim, de forma individual. Nessa propriedade o suprimento de água para o reservatório é obtido pelo sistema do condomínio, o qual fornece água a algumas propriedades mediante o pagamento de uma taxa mensal.

Na propriedade P2, localizada na sub-bacia do Capão Comprido, o sistema de captação de água, para a alimentação do sistema de irrigação, é efetuado diretamente do córrego do Capão Comprido. O conjunto motobomba utilizado é da WEG, cuja bomba é centrífuga, com motor elétrico de 10C.V.. Tanto a tubulação de sucção quanto a tubulação de recalque são de 3" ($7,5 \times 10^{-2}\text{m}$).

Na propriedade P3, localizada na sub-bacia do Rodeador, o sistema de captação de água, para a alimentação do sistema de irrigação, é efetuado de um reservatório não revestido. O conjunto motobomba utilizado é da WEG, cuja bomba é centrífuga, com motor elétrico de 15C.V.. A tubulação de sucção é de 4" ($10 \times 10^{-2}\text{m}$), enquanto que a tubulação de recalque é de 3" ($7,5 \times 10^{-2}\text{m}$). Nessa propriedade, o suprimento de água para o reservatório é obtido tanto pelo sistema do condomínio, como por meio de poço artesiano.

Na propriedade P4, localizada na sub-bacia do Rodeador, o sistema de captação de água, para a alimentação do sistema de irrigação, é efetuado de um reservatório revestido com lona plástica. O conjunto motobomba utilizado é da WEG, cuja bomba é centrífuga, com motor elétrico de 7,5C.V.. A tubulação de sucção é de 4" ($10 \times 10^{-2}\text{m}$), enquanto que a tubulação de recalque é de 3" ($7,5 \times 10^{-2}\text{m}$). Nessa propriedade o suprimento de água para o reservatório é obtido por meio de dois poços artesianos.

7 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1 - SOLO

7.1.1 - Granulometria média do solo e massa específica do solo

A granulometria média do solo e a massa específica do solo foram determinadas para os perfis a 0,30, 0,50, 0,70, 0,90 e 1,5m do solo, nas quatro propriedades. Os ensaios foram efetuados de acordo com a NBR 7181 e a NBR 6458.

O ensaio para a determinação da granulometria média do solo foi dividido em duas etapas: a primeira, o peneiramento; e a segunda, a sedimentação. Na etapa da sedimentação, para melhorar a dispersão dos elementos do solo, foi utilizado um desfloculante (hexametáfosfato de sódio). Nas Figuras 7.1, 7.2, 7.3 e 7.4 são apresentadas as curvas granulométricas para as propriedades P1, P2, P3 e P4, nos perfis relacionados, sendo os limites que separam os tamanhos das partículas do solo estabelecidos pela NBR 6502 (Rochas e Solos).

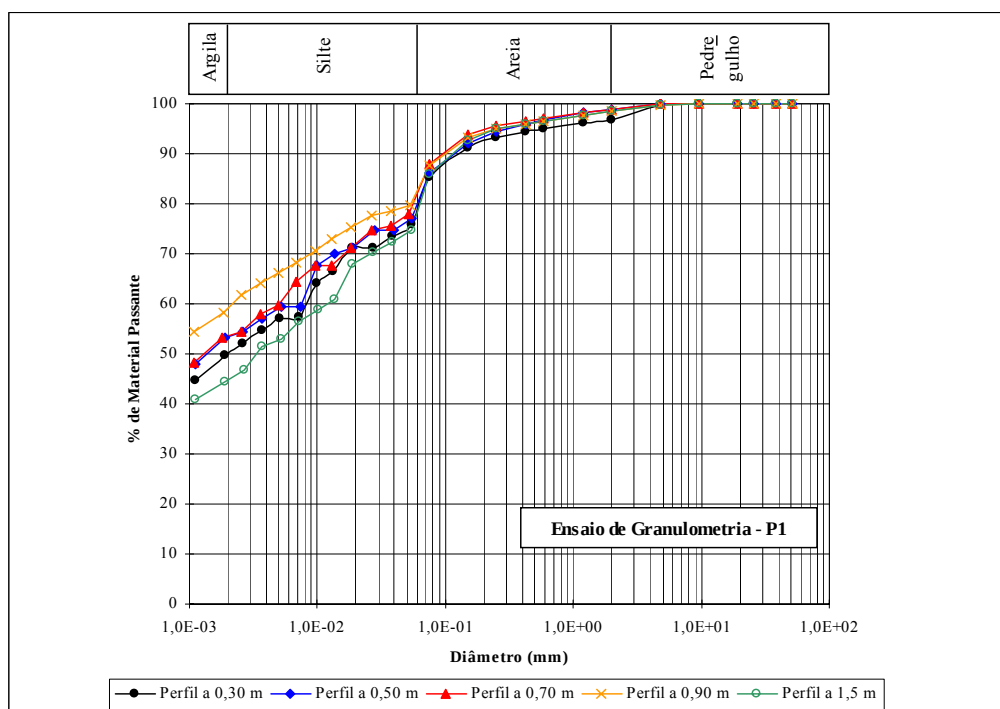


Figura 7.1 – Granulometria média do solo, propriedade P1.

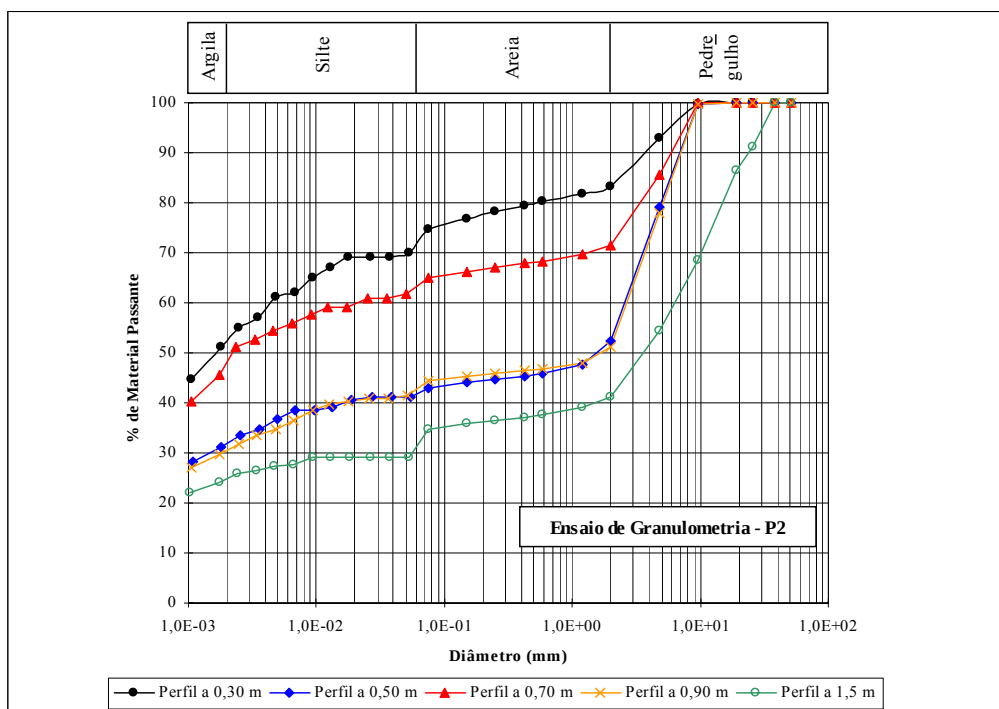


Figura 7.2 – Granulometria média do solo, propriedade P2.

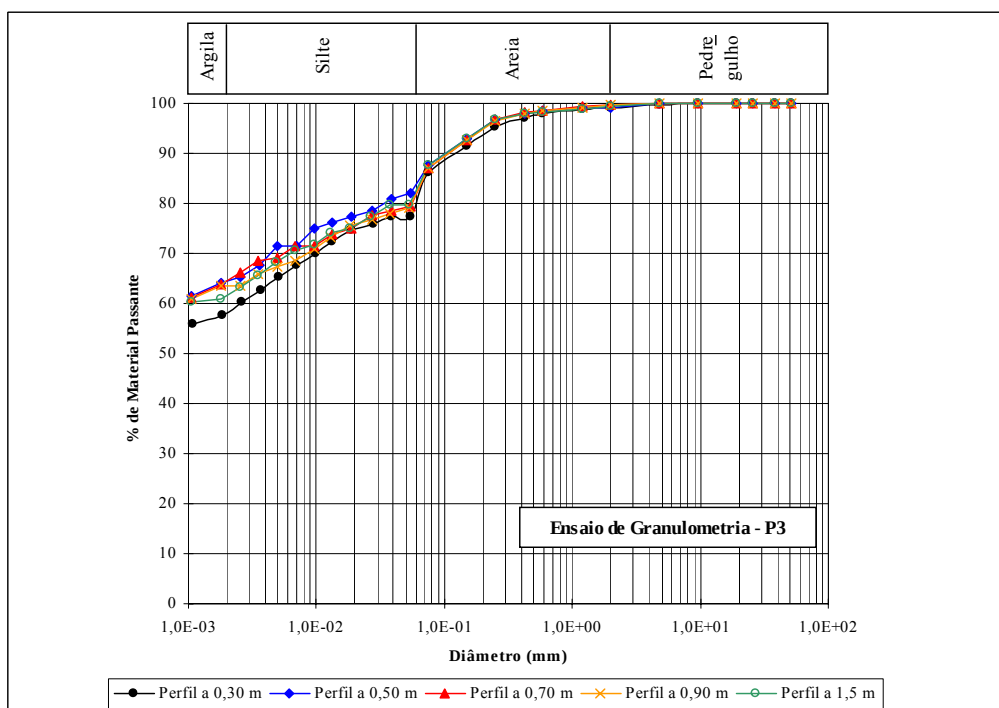


Figura 7.3 – Granulometria média do solo, propriedade P3.

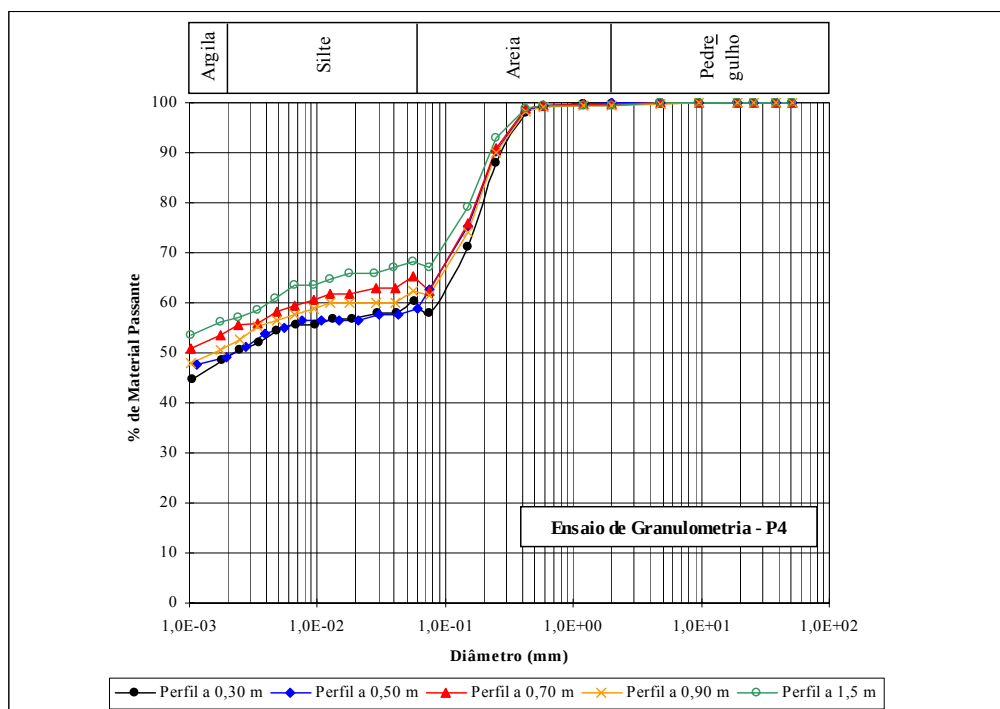


Figura 7.4 – Granulometria média do solo, propriedade P4.

Os perfis do solo de cada propriedade foram classificados de acordo com o diagrama textural dos solos (Figura 3.5). Na Tabela 7.1 essa classificação é apresentada.

Tabela 7.1 – Classificação dos perfis dos solos de cada propriedade.

P1		P2	
Perfil (m)	Classificação do Solo	Perfil (m)	Classificação do Solo
0,30	Argiloso	0,30	Argiloso
0,50	Argiloso	0,50	Franco Argiloso Arenoso
0,70	Argiloso	0,70	Argiloso
0,90	Argiloso	0,90	Franco Argiloso Arenoso
1,5	Argiloso	1,5	Franco

P3		P4	
Perfil (m)	Classificação do Solo	Perfil (m)	Classificação do Solo
0,30	Argiloso	0,30	Argiloso
0,50	Muito Argiloso	0,50	Argiloso
0,70	Muito Argiloso	0,70	Argiloso
0,90	Muito Argiloso	0,90	Argiloso
1,5	Muito Argiloso	1,5	Argiloso

No ensaio granulométrico dos perfis do solo da propriedade P2 foi constatado um erro no balanço de massa do material constituinte. Esse erro provavelmente ocorreu durante a fase de peneiramento, em que, por algum descuido, pode ter ocorrido a perda de material, ou mesmo, o material pode não ter sido completamente retirado das peneiras; podendo ser uma das causas da grande variação granulométrica entre os perfis do solo.

Tabela 7.2 – Massa específica para os cinco perfis do solo de cada propriedade.

Perfil do Solo (m)	Massa Específica do Solo (g/cm ³)			
	P1	P2	P3	P4
0,30	2,76	2,81	2,68	2,62
0,50	2,72	2,78	2,69	2,64
0,70	2,81	2,83	2,72	2,61
0,90	2,71	2,88	2,75	2,64
1,5	2,75	2,89	2,75	2,58

Na Tabela 7.2 é observado que os valores da massa específica são bem uniformes nos diversos perfis nas propriedades, e que o manejo do solo não promove, em decorrência do processo de lixiviação de partículas menores, aumento significativo da massa específica nos perfis mais profundos, em razão do solo ser argiloso. Nas propriedades P2 e P3, um pequeno aumento no valor dessa propriedade física com a profundidade foi observado.

7.1.2 - Curva de retenção de água no solo

A curva de retenção de água no solo foi determinada para os mesmos perfis relacionados no item 7.1.1. Para a realização desse ensaio foram coletadas amostras indeformadas, procurando conservar a estrutura física do solo.

Para ajustar uma curva em relação aos pontos levantados experimentalmente foi utilizada a equação de van Genuchten (Equação 5.1). Nessa equação, os valores das variáveis θ_r , α e n_G foram estimados simultaneamente pela técnica dos mínimos quadrados por meio de planilha eletrônica. Nas Figuras 7.5, 7.6, 7.7 e 7.8 os gráficos da curva de retenção, para os cinco perfis de cada uma das quatro propriedades, são apresentados, com os símbolos sendo os pontos experimentais.

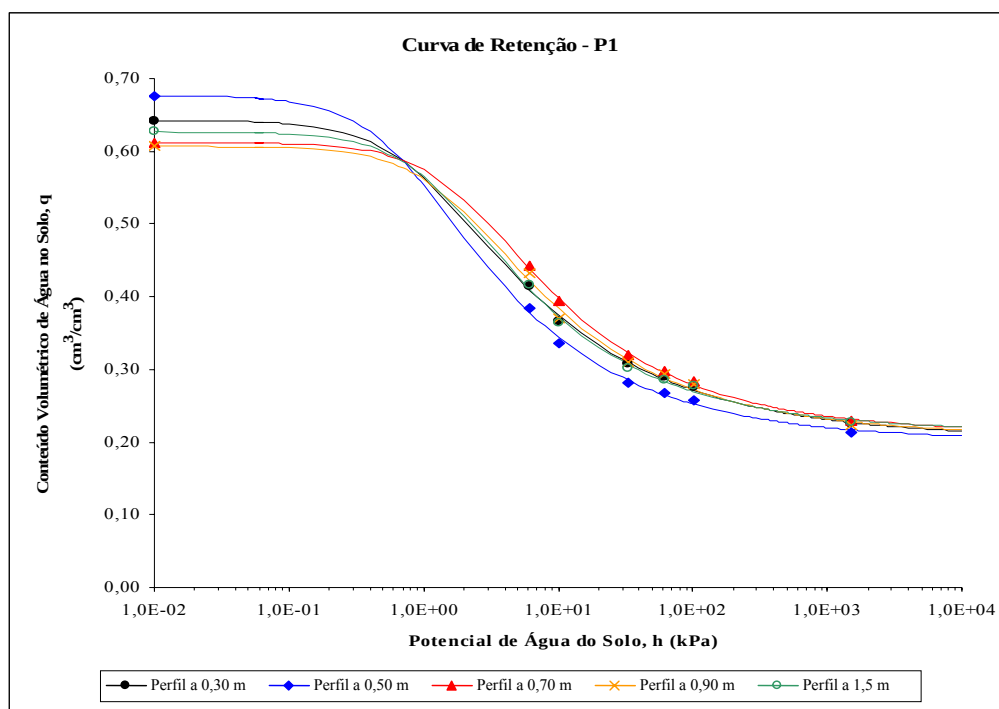


Figura 7.5 – Curva de retenção de água no solo, propriedade P1.

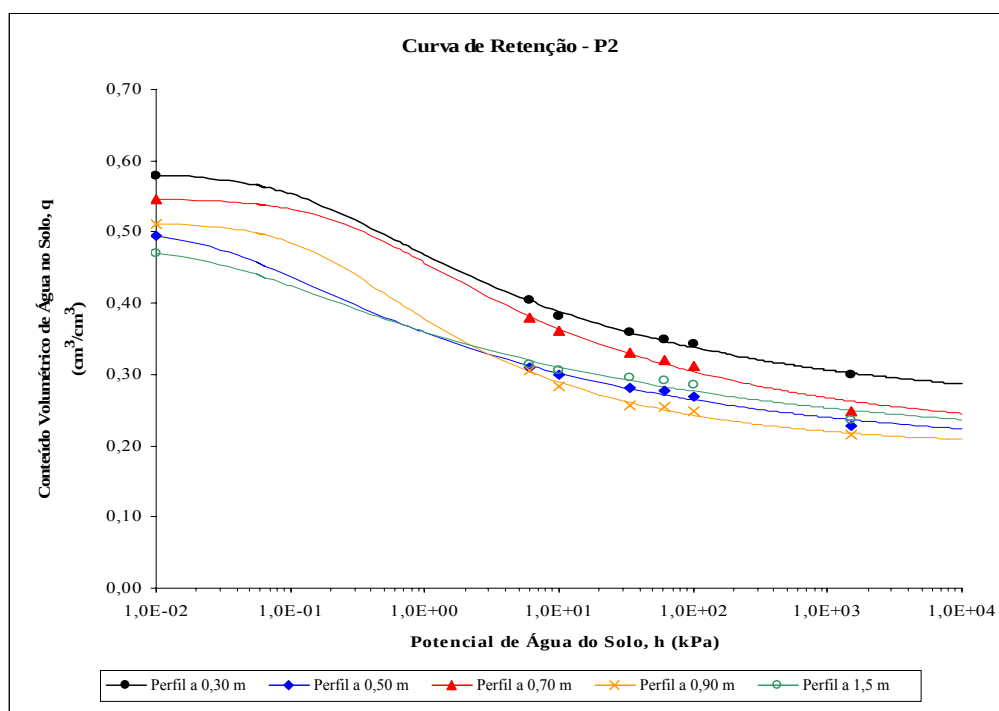


Figura 7.6 – Curva de retenção de água no solo, propriedade P2.

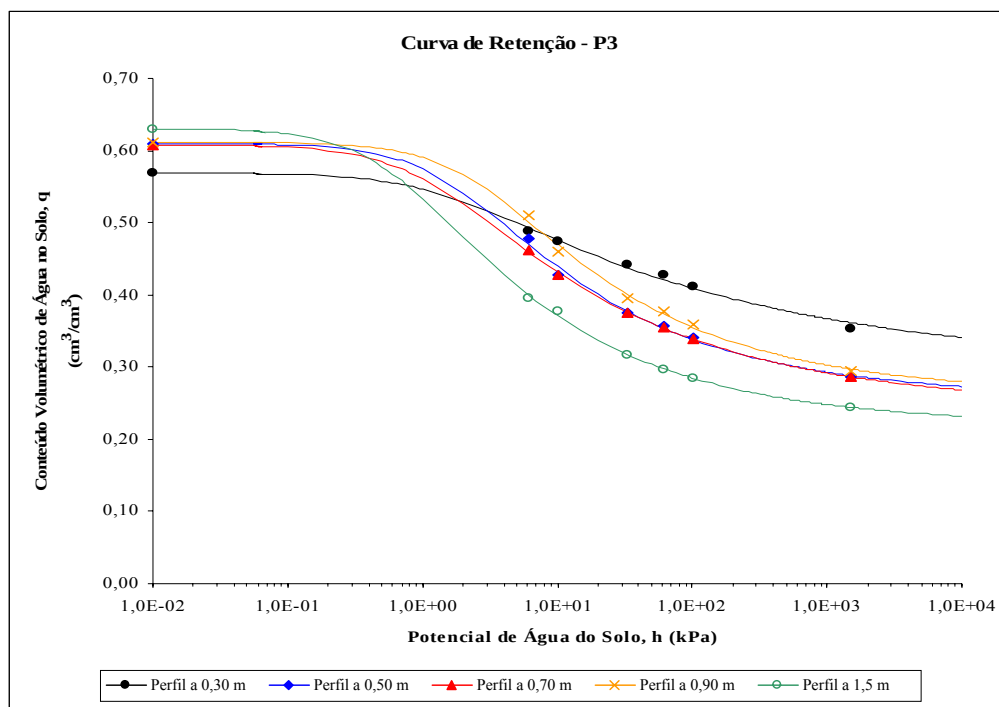


Figura 7.7 – Curva de retenção de água no solo, propriedade P3.

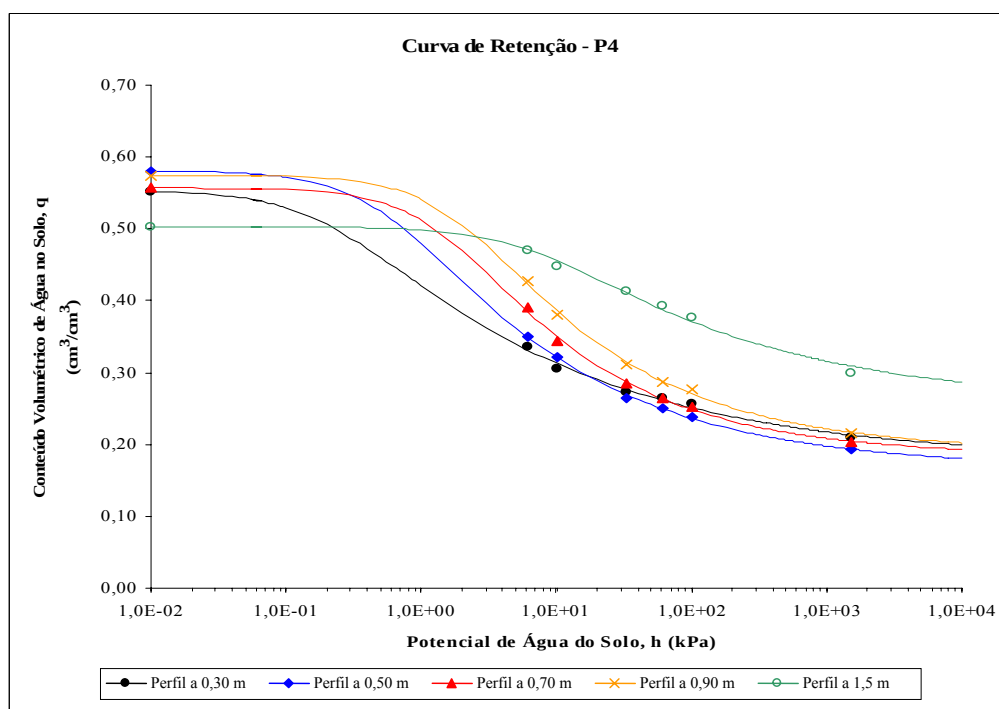


Figura 7.8 – Curva de retenção de água no solo, propriedade P4.

Embora os perfis do solo para as propriedades P1, P3 e P4 tenham sido semelhantes na classificação granulométrica, as curvas de retenção dos perfis foram diferentes. Essa diferença pode ser atribuída ao fato de que a curva de retenção não depende apenas da textura do solo, mas também da estrutura do mesmo.

Na realização desse ensaio outras propriedades físicas do solo foram estimadas: massa específica aparente, capacidade de campo, ponto de murcha permanente, porosidade, microporosidade e macroporosidade. Na Tabela 7.3, a título ilustrativo, esses valores, para os cinco perfis do solo da propriedade P3, são apresentados.

Tabela 7.3 – Parâmetros obtidos no ensaio da curva de retenção, propriedade P3.

Perfil do Solo (m)	Massa Específica Aparente (g/cm ³)	Capacidade de Campo (%)	Ponto de Murcha (%)	Porosidade (%)	Microporosidade (%)	Macroporosidade (%)
0,30	1,0	47	34	55	47	8,0
0,50	0,92	52	31	66	52	14
0,70	0,92	50	31	66	50	16
0,90	0,95	54	31	64	54	10
1,5	0,82	48	30	77	48	29

7.1.3 - Coeficiente de permeabilidade

7.1.3.1 - Coeficiente de permeabilidade do solo saturado

O ensaio da determinação do coeficiente de permeabilidade do solo saturado foi realizado com as mesmas amostras indeformadas que foram utilizadas no ensaio da curva de retenção de água no solo.

O método empregado para a determinação desse coeficiente em cada perfil do solo, de cada propriedade, foi o permeâmetro de carga constante.

Na Tabela 7.4 os valores dos coeficientes de permeabilidade do solo saturado, para cada perfil, de cada propriedade, são apresentados.

Tabela 7.4 – Coeficiente de permeabilidade do solo saturado.

Coeficiente de permeabilidade do solo saturado (mm/h)				
Perfil do Solo (m)	P1	P2	P3	P4
0,30	339	1143	0,17	226
0,50	491	1308	68	302
0,70	156	113	51	116
0,90	205	845	29	96
1,5	237	2714	340	2,2

Na Tabela 7.4 as amostras retiradas no perfil a 0,30m, para propriedade P3, e no perfil a 1,5m, para a propriedade P4, aparecem com valores muito diferentes em relação aos outros perfis dessas duas propriedades; supõe-se que o principal fator relacionado a essa discrepância seja a compactação das amostras do solo durante a coleta, em função do trado de amostra indeformada (Figura 5.3) não apresentar uma folga entre a base do trado e a parte superior do amostrador. Assim, qualquer descuido na hora da coleta da amostra do solo pode conduzir a sua compactação. A grande diferença observada entre os valores obtidos para a propriedade P2 e para as outras propriedades pode ser atribuída à granulometria do solo, que na propriedade P2 apresenta uma maior porcentagem de pedregulho no solo, conforme é mostrado na Figura 7.2. Com relação à variação dos valores, ao longo dos perfis de cada propriedade, verifica-se que nas propriedades P1 e P4 os maiores valores do coeficiente de permeabilidade ocorrem nos dois perfis mais rasos (0,30 e 0,50m), provavelmente decorrentes do manejo do solo nesses dois perfis, proporcionando uma maior quebra da estrutura do solo. Nas propriedades P2 e P3, essa tendência não é confirmada, pois os maiores valores estão nos perfis mais profundos. Para a propriedade P2 constatou-se, em observações de campo, que no perfil a 1,5m, os tamanhos dos pedregulhos são superiores aos dos outros perfis, justificando o maior valor. Para a propriedade P3, não há, a princípio, uma causa justificável. Para a mesma propriedade P3, observa-se que os valores obtidos, com exceção para o perfil a 1,5m, são menores que os valores obtidos para as propriedades P1 e P4. A causa é identificada na classificação do solo (Tabela 7.1), em que se observa que o solo é classificado como muito argiloso ao longo dos perfis, com exceção para o perfil a 0,30 m, que é classificado como argiloso.

7.1.3.2 - Coeficiente de permeabilidade do solo em função de θ

No caso deste trabalho o coeficiente de permeabilidade utilizado não foi o do solo saturado, e sim o do solo em função de θ . No caso, foi adotado para o cálculo de $k(\theta)$ a equação derivada por Mualem (Equação 5.3).

7.2 - MONITORAMENTO DO FLUXO DE ÁGUA NA ZONA NÃO SATURADA DO SOLO

O monitoramento do fluxo de água na zona não saturada do solo foi realizado por meio de determinações do teor de umidade do solo, durante campanhas intensivas. Para esse fim foram utilizados dois equipamentos, o tensiômetro e o umidímetro de bloco de gesso.

7.2.1 - Tensiômetros

Dois tipos de tensiômetros foram empregados na fase experimental deste trabalho, os tensiômetros com manômetro de vácuo e os tensiômetros com manômetro de mercúrio. A partir da associação da tensão de sucção obtida nesse equipamento com a curva de retenção de água no solo, foi determinado o teor de umidade do solo. Nas Parcelas A, das propriedades P2 e P4, os tensiômetros foram instalados nas profundidades a 0,50, 0,70 e 0,90m. Nas Parcelas A, das propriedades P1 e P3, os tensiômetros foram instalados nas profundidades a 0,50, 0,90 e 1,5m. Nas Parcelas B, de todas as quatro propriedades, os tensiômetros foram instalados nas profundidades a 0,30, 0,50 e 0,90m.

Pela relação entre as tensões de sucção obtidas nos tensiômetros e as cargas potencial, tomando a superfície do solo como referência, foram obtidas as tensões totais de água no solo para cada campanha intensiva. Nas Figuras 7.9, 7.10, 7.11 e 7.12 esses gráficos são apresentados para todas as parcelas experimentais. As datas em que as lâminas de irrigação foram aplicadas, representam somente as datas das campanhas intensivas, e não a todos os eventos de irrigação realizados durante a fase experimental deste trabalho. Nessas mesmas figuras, a lâmina de irrigação já é a lâmina de água que atinge o solo, tendo sido descontada a interceptação.

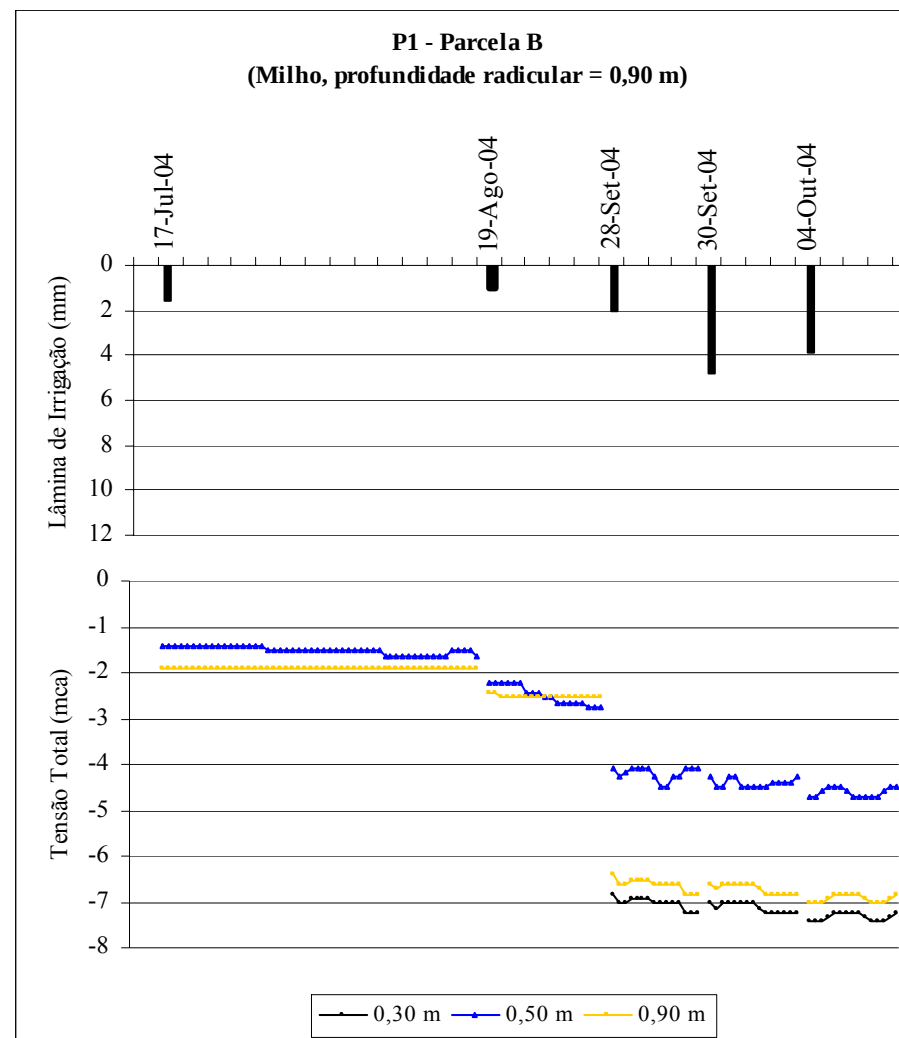
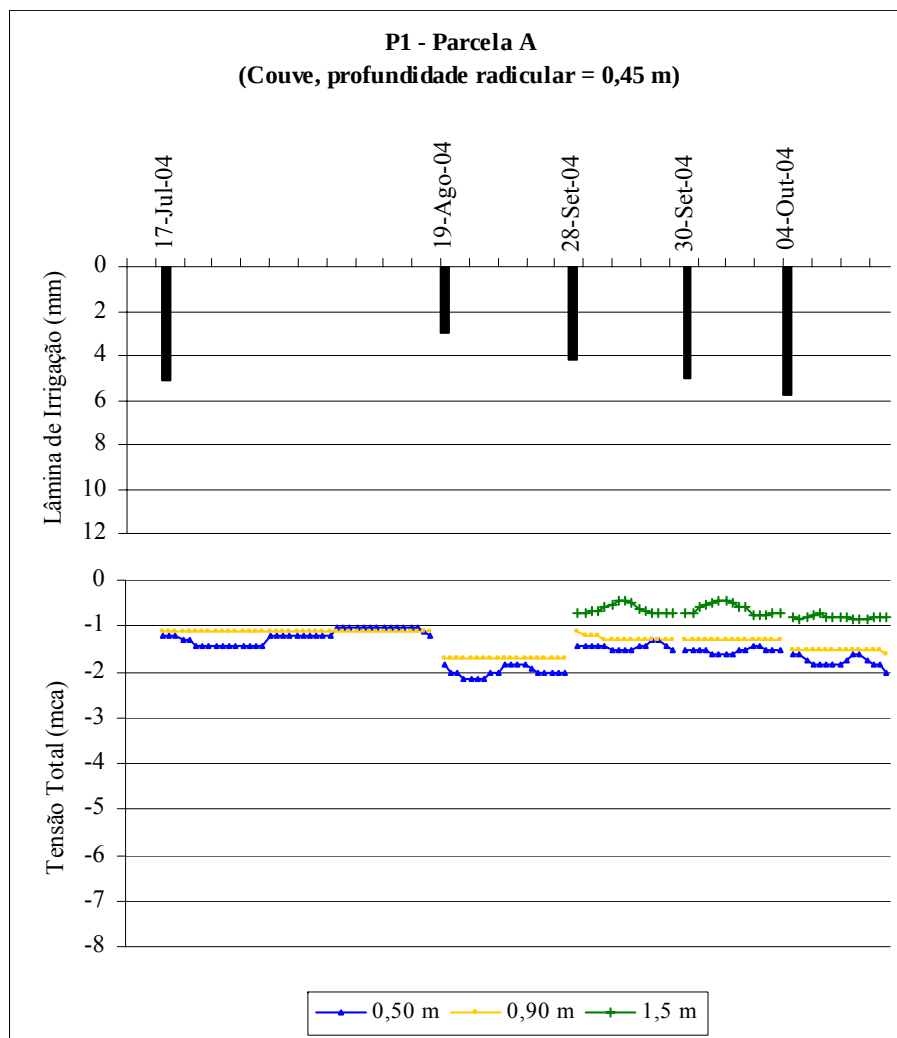


Figura 7.9 – Monitoramento da frente de umidade no solo, propriedade P1.

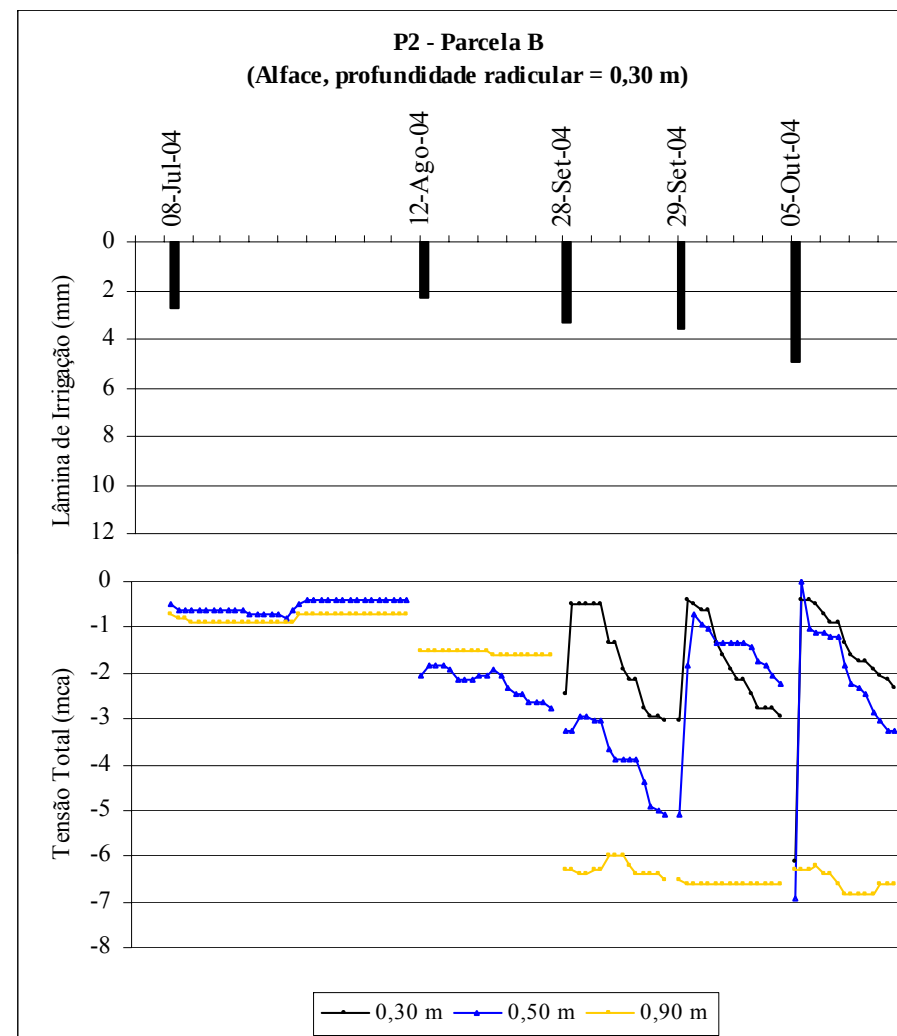
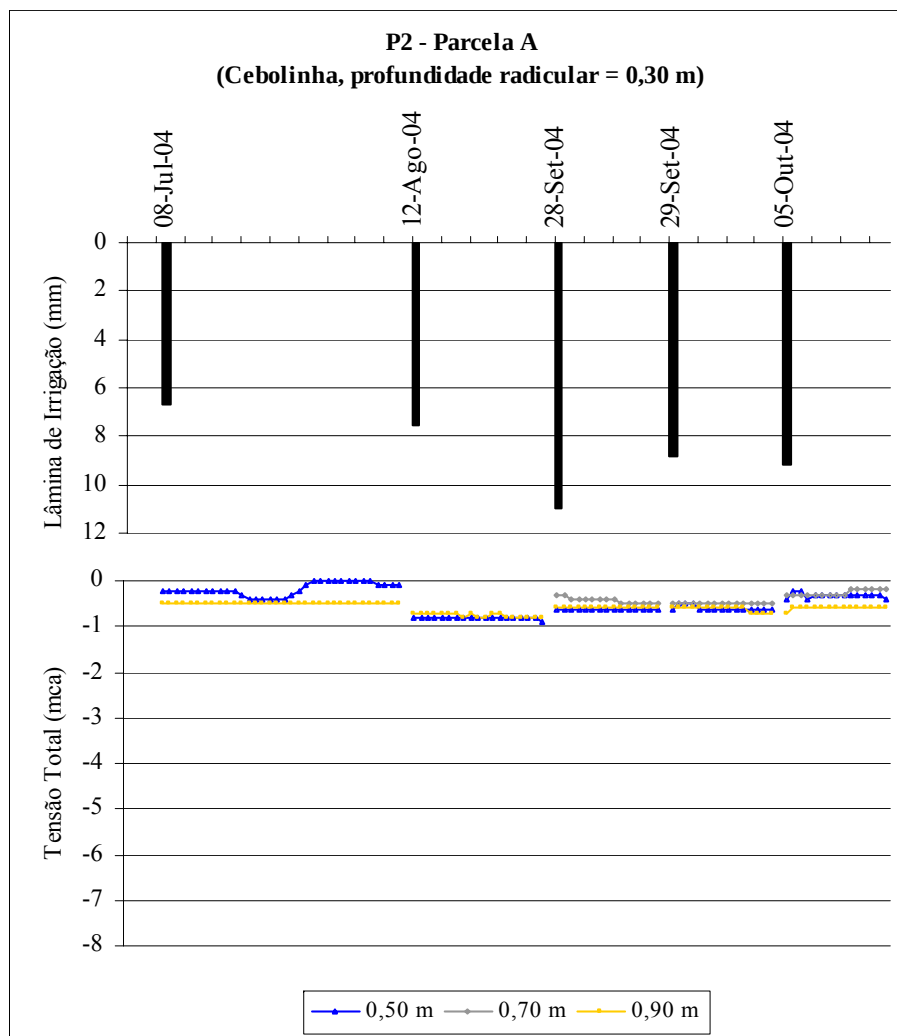


Figura 7.10 – Monitoramento da frente de umidade no solo, propriedade P2.

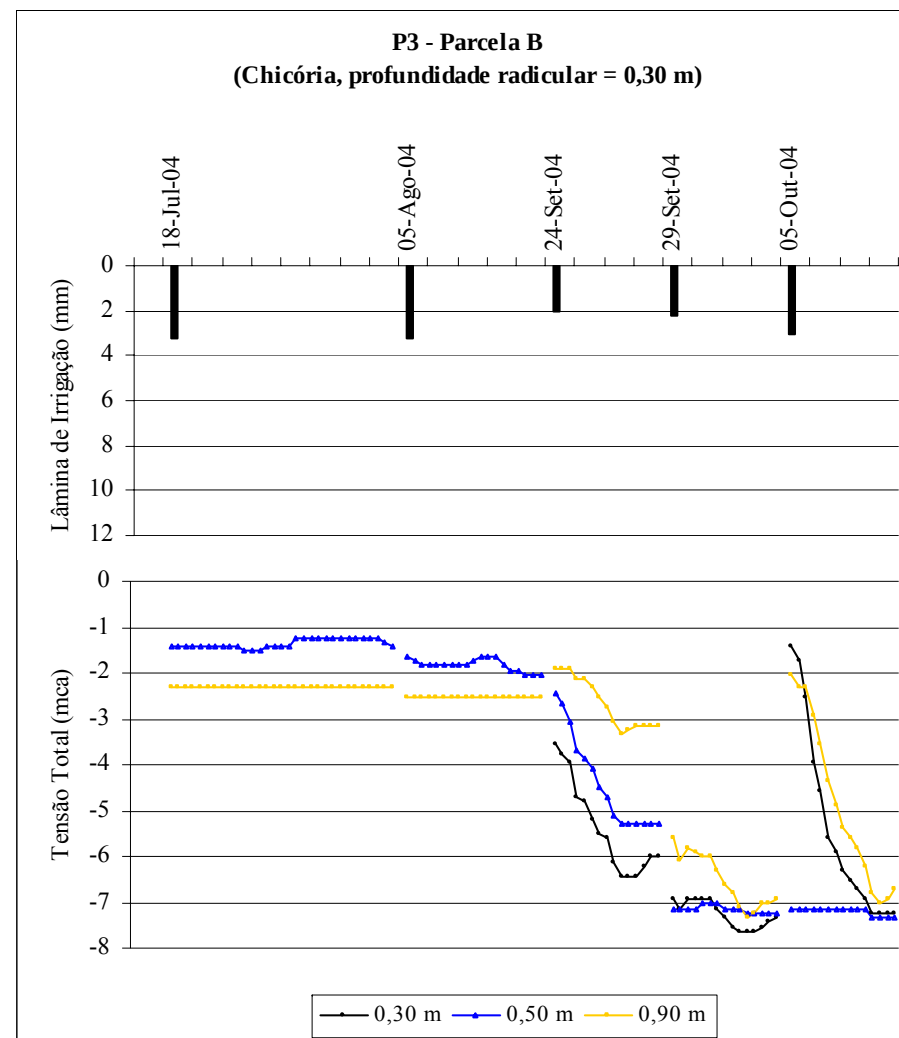
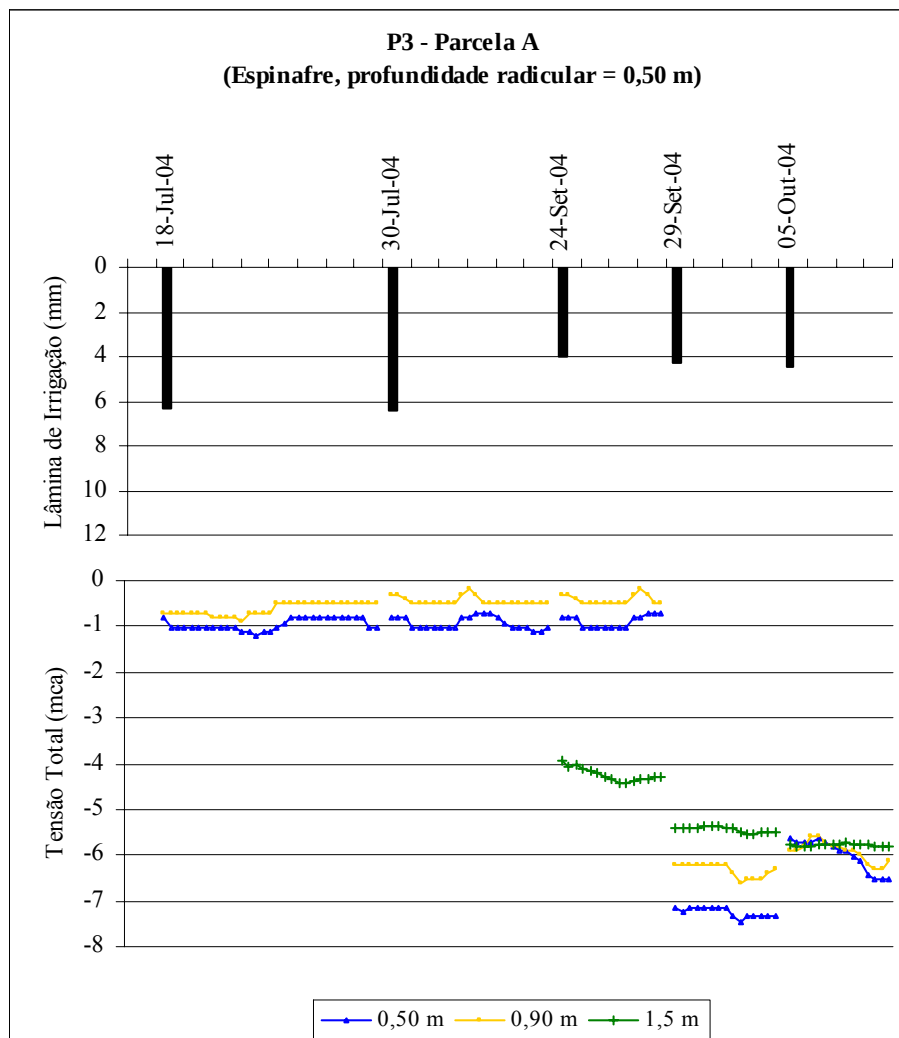


Figura 7.11 – Monitoramento da frente de umidade no solo, propriedade P3.

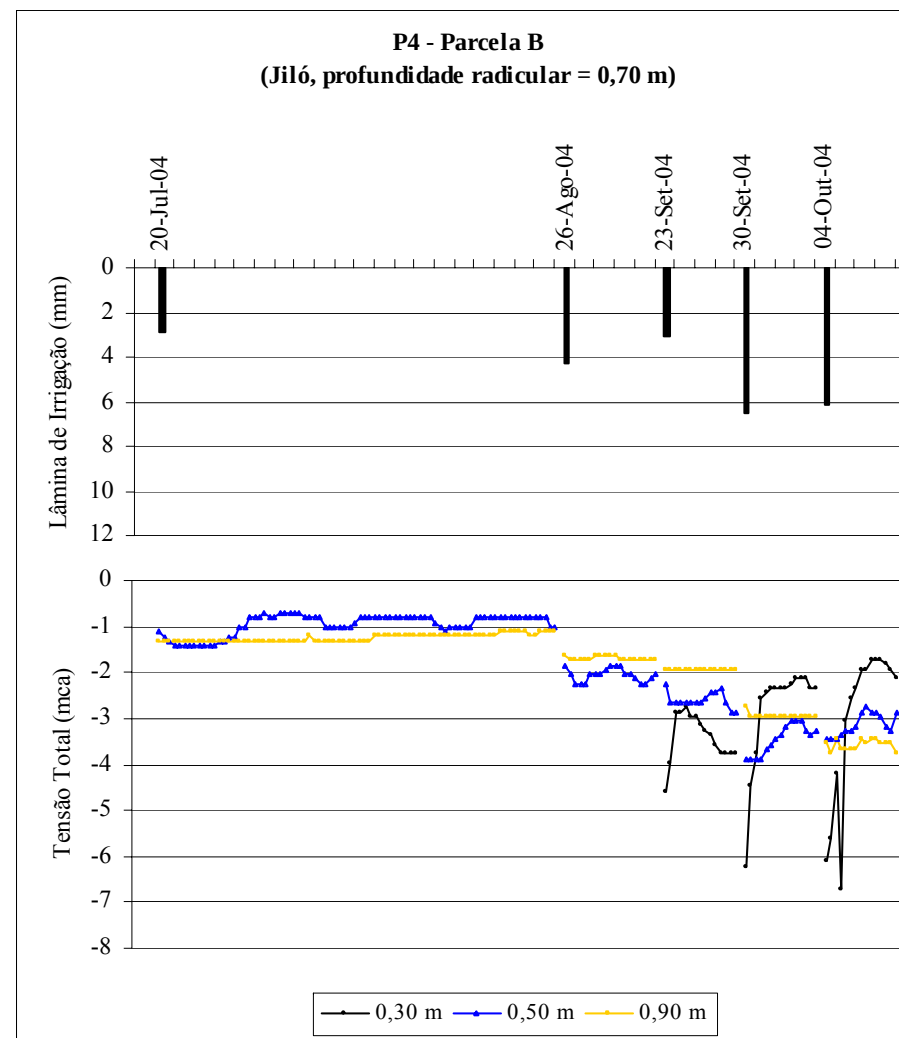
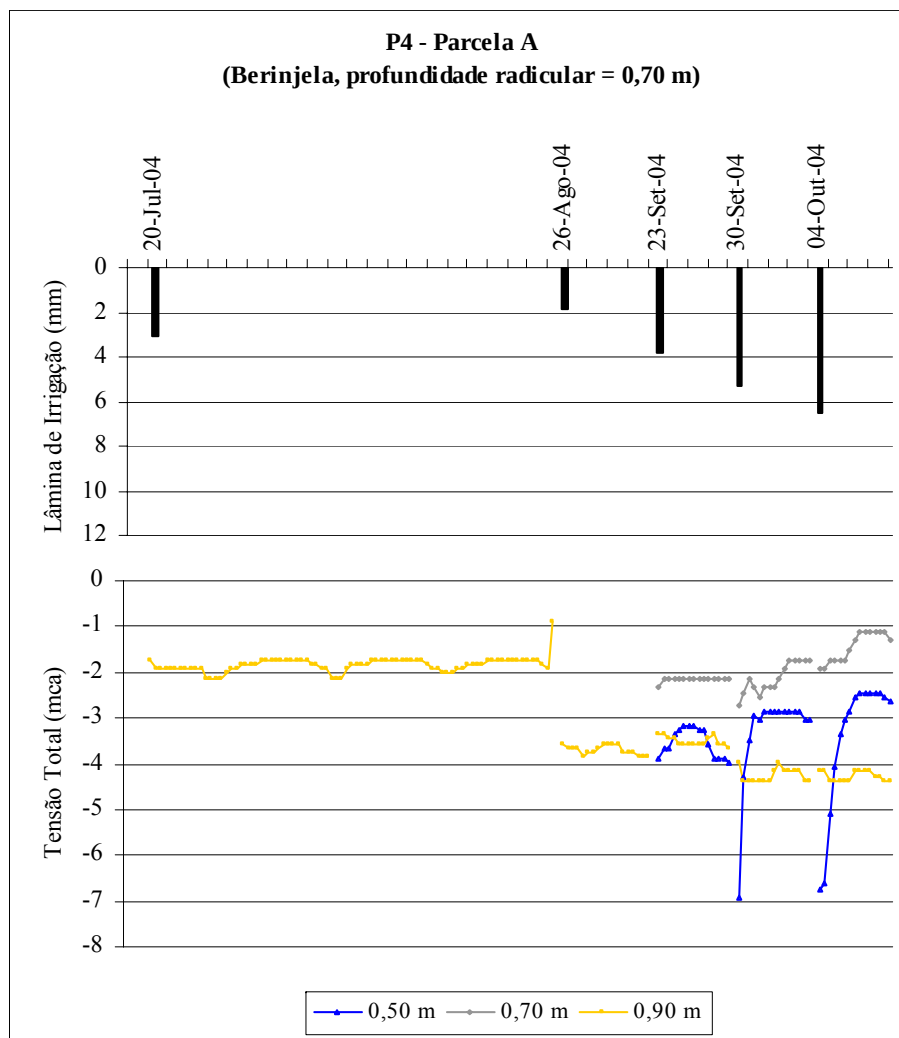


Figura 7.12 – Monitoramento da frente de umidade no solo, propriedade P4.

Em 10 das 40 campanhas intensivas realizadas, pode ter ocorrido a percolação, sendo observada pela variação da tensão total de água do solo nos perfis. Na propriedade P1, Parcela B, 1º campanha, o fluxo de água no sentido descendente ficou restrito entre esses dois perfis, não sendo considerado percolação, pois não houve fluxo abaixo da profundidade radicular (0,90m). Na propriedade P4, Parcela A, na 3º, 4º e 5º campanhas, os tensiômetros a 0,50 e 0,70m registraram variação da leitura, porém não houve o fluxo no sentido descendente entre esses dois perfis pois a tensão total a 0,70m era maior do que a tensão total a 0,50m. Na mesma propriedade e parcela, dentro do perfil do solo até 0,50m pode ter ocorrido o fluxo de água no sentido descendente, no entanto, não sendo considerado percolação, pois a profundidade radicular da cultura é de 0,70m, em média; a variação das leituras a 0,70m pode ter sido ocasionada pela umidade remanescente no solo de irrigações anteriores.

7.2.2 - Umidímetro de bloco de gesso

Os umidímetros de bloco de gesso foram instalados nas profundidades a 0,10, 0,20, 0,30, 0,40, 0,50, 0,70, 0,90, 1,5 e 2,0m, em todas as parcelas experimentais. A tentativa de calibrar os mesmos foi efetuada em relação ao teor de umidade do solo. Para essa tentativa de calibração foram coletadas amostras de solo deformadas, durante a segunda campanha intensiva, e determinado o teor de umidade dessas amostras, pelo método padrão de estufa. Porém, em razão de um comportamento inesperado, o qual será abordado em seguida, a calibração desse sensor não foi concluída, utilizando-se assim, a curva de calibração fornecida pelo fabricante (Figura 5.10).

É oportuno ressaltar neste item que após a primeira campanha intensiva foi levantada a hipótese de que o aparelho de leitura pode sofrer influência da temperatura e, dessa forma, as leituras nos umidímetros de bloco de gesso não variarem somente com o teor de umidade do solo, mas também, com a temperatura do aparelho. Para verificar essa hipótese, nas campanhas intensivas subseqüentes, o aparelho de leitura foi acondicionado em caixa de isopor. Apenas no momento das leituras, o mesmo era retirado da caixa.

Em quase todas as campanhas intensivas, o comportamento das leituras obtidas nos umidímetros de bloco de gesso comparado com o das leituras obtidas nos tensiômetros, para as mesmas profundidades, foi similar. Nos casos em que essa semelhança não

ocorreu, alguns fatores podem ter interferido: solo próximo da saturação, que era o esperado, pois os umidímetros de bloco de gesso funcionam melhor quando o teor de umidade do solo é baixo; e solo muito seco, que pode ocasionar a contração da massa pastosa, utilizada durante a instalação do sensor, e seu descolamento do umidímetro do bloco de gesso, fazendo-o perder o contato com o solo. Para alguns poucos casos, não houve uma explicação para essa diferença.

Nas Figuras 7.13 e 7.14 são apresentadas duas campanhas intensivas em que os valores obtidos com os tensiômetros e com os umidímetros são tão diferentes que os valores dos umidímetros não se encontram no gráfico. Na Figura 7.14, os mesmos gráficos são apresentados, porém em escala ampliada.

Na Figura 7.15 são apresentadas duas campanhas em que o comportamento entre as leituras obtidas nos umidímetros e nos tensiômetros foi semelhante. Observa-se que mesmo com sucções médias (em torno de $-3,0\text{mca}$), como em sucções baixas (em torno de $-6,0\text{mca}$) o comportamento se manteve parecido. Na Figura 7.16 são apresentadas duas campanhas em que se observa que, para sucções próximas de zero o comportamento dos dois equipamentos são diferentes.

Nas Figuras 7.13, 7.14, 7.15 e 7.16, a lâmina de irrigação já é a lâmina de água que atinge o solo, tendo sido descontada a interceptação.

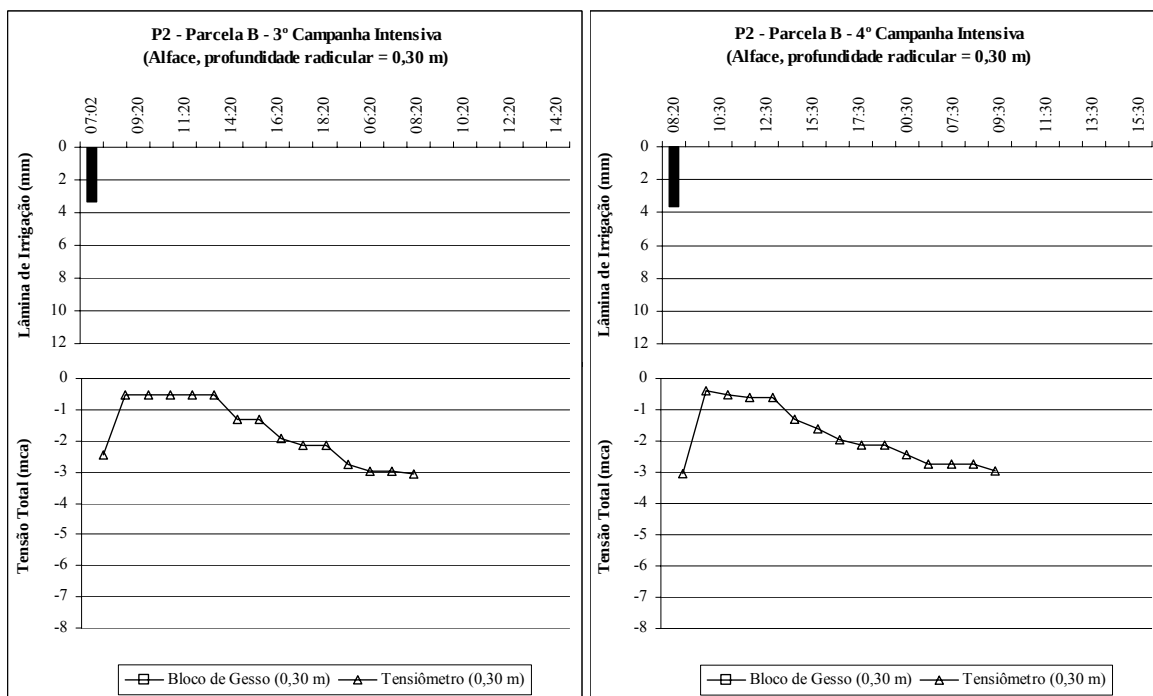


Figura 7.13 – Leituras umidímetro versus leituras tensiômetro, propriedade P2, Parcela B, 3º e 4º campanhas intensivas.

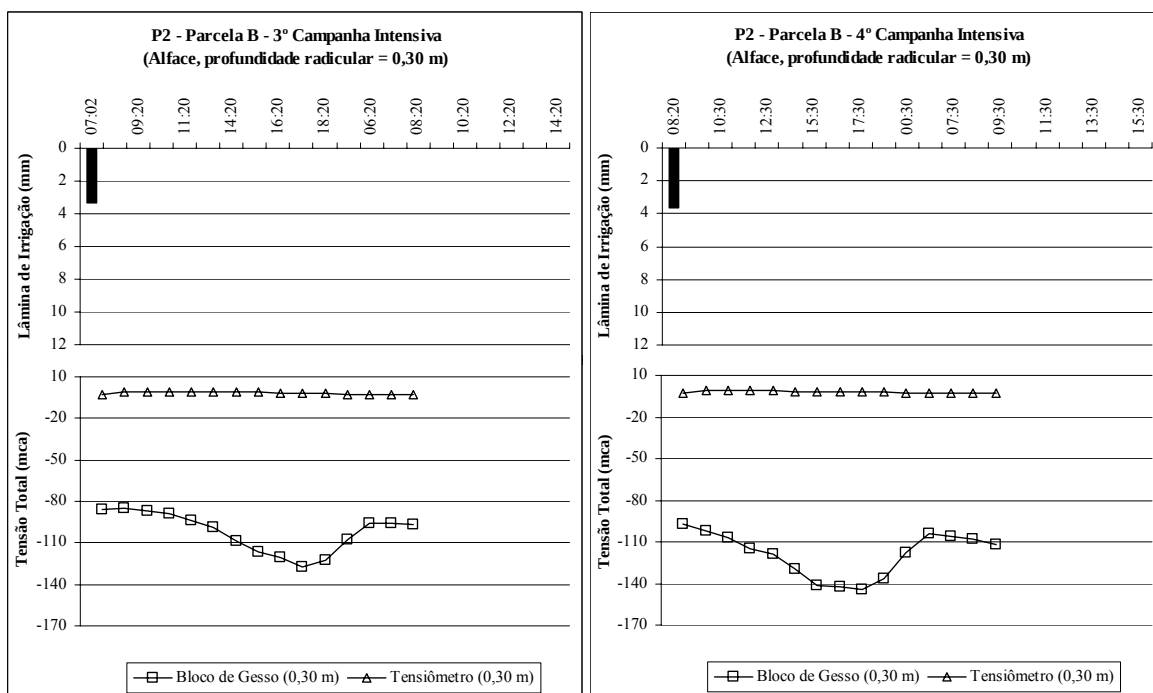


Figura 7.14 – Leituras umidímetro versus leituras tensiômetro, propriedade P2, Parcela B, 3º e 4º campanhas intensivas.

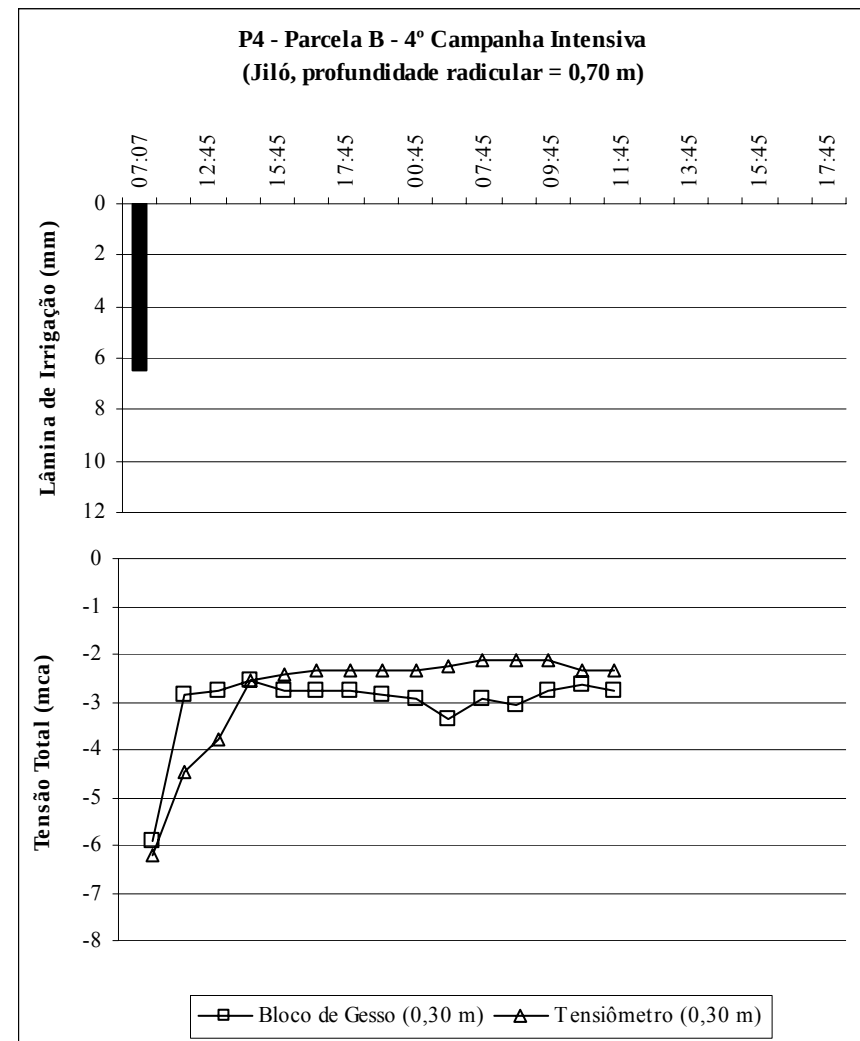
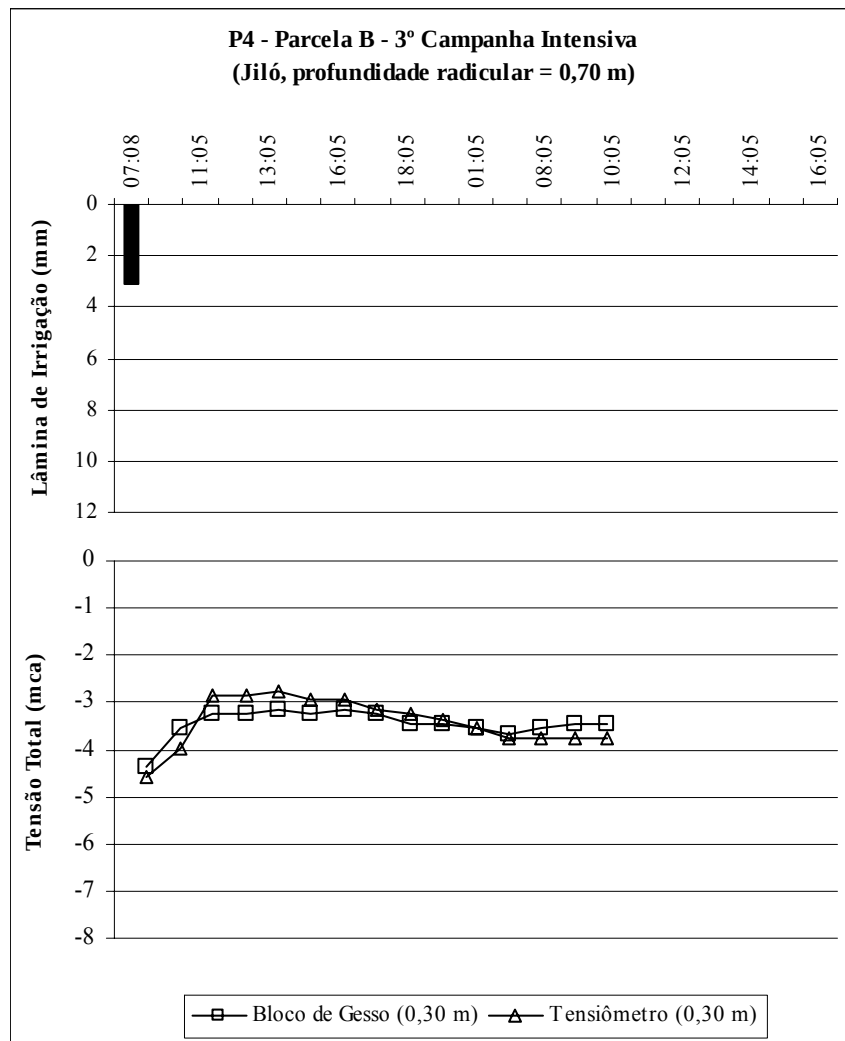


Figura 7.15 – Leituras umidímetro versus leituras tensiômetro, propriedade P4, Parcela B, 3º e 4º campanhas intensivas.

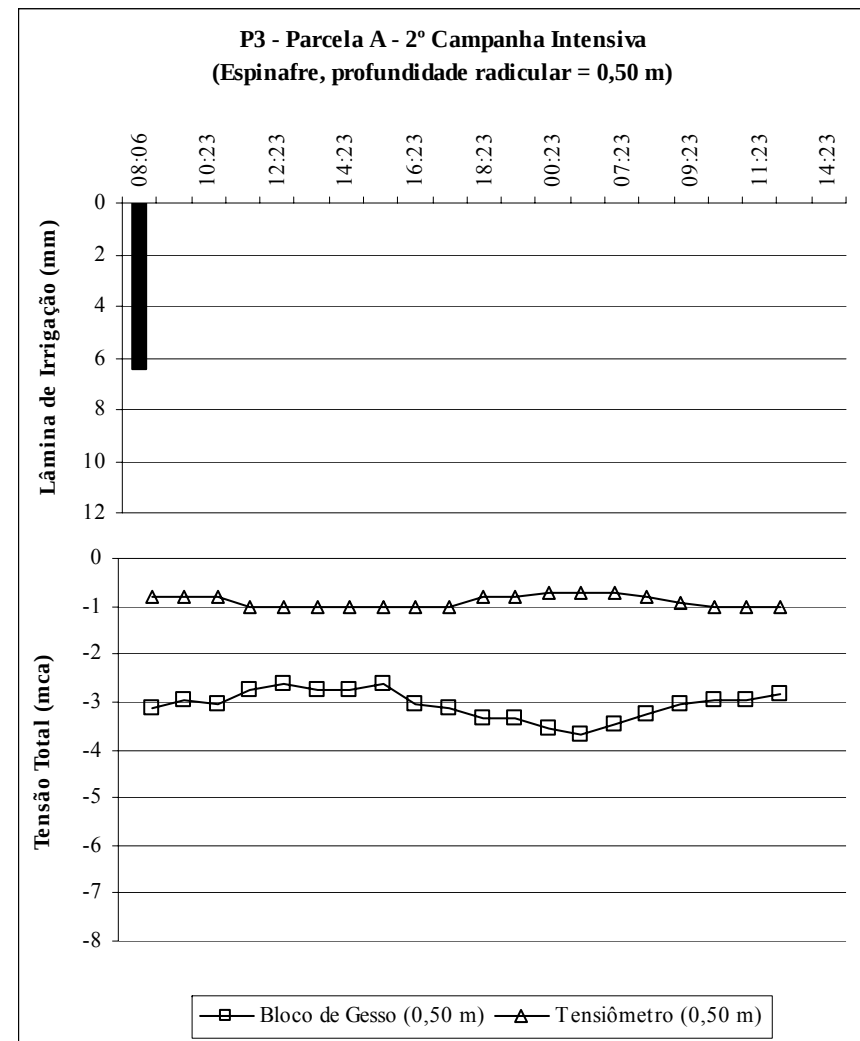
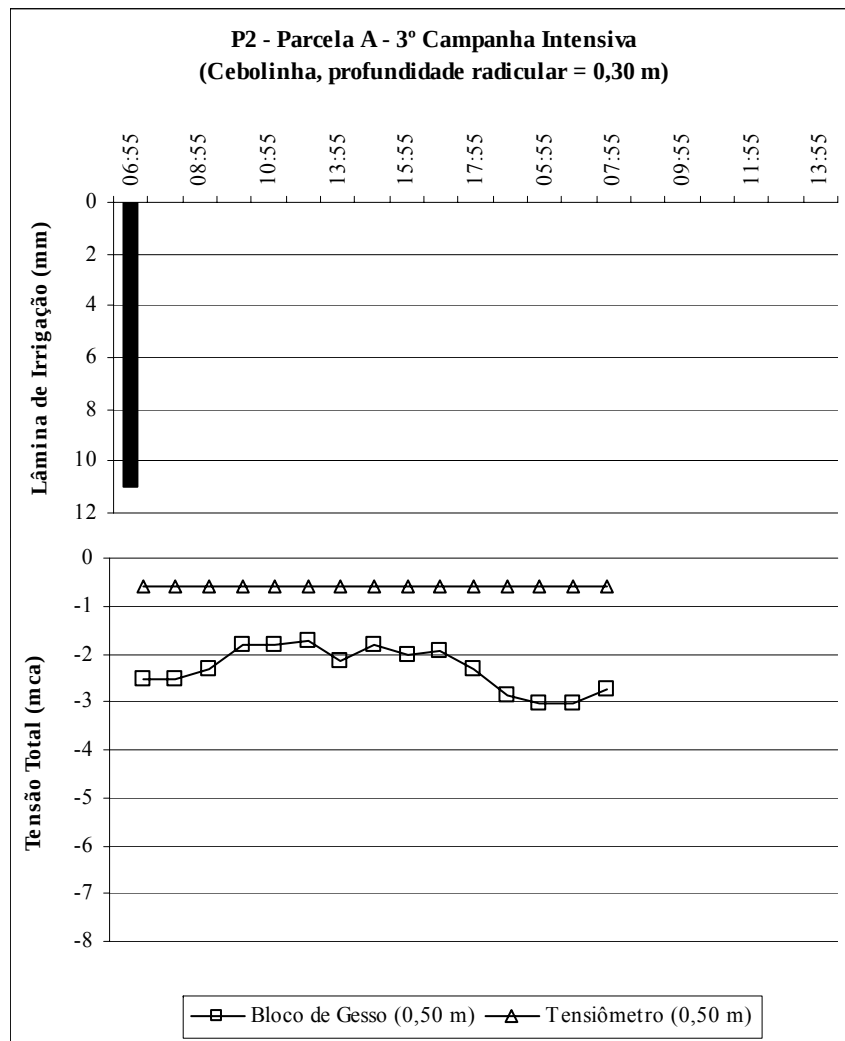


Figura 7.16 - Leituras umidímetro versus leituras tensiômetro: propriedade P2, Parcela A, 3º campanha intensiva; e propriedade P3, Parcela A, 2º campanha intensiva.

Como destacado no início deste item, a calibração dos umidímetros de bloco de gesso não foi concluída em função de um comportamento inesperado por esse sensor. Esse comportamento é apresentado na figura a seguir:

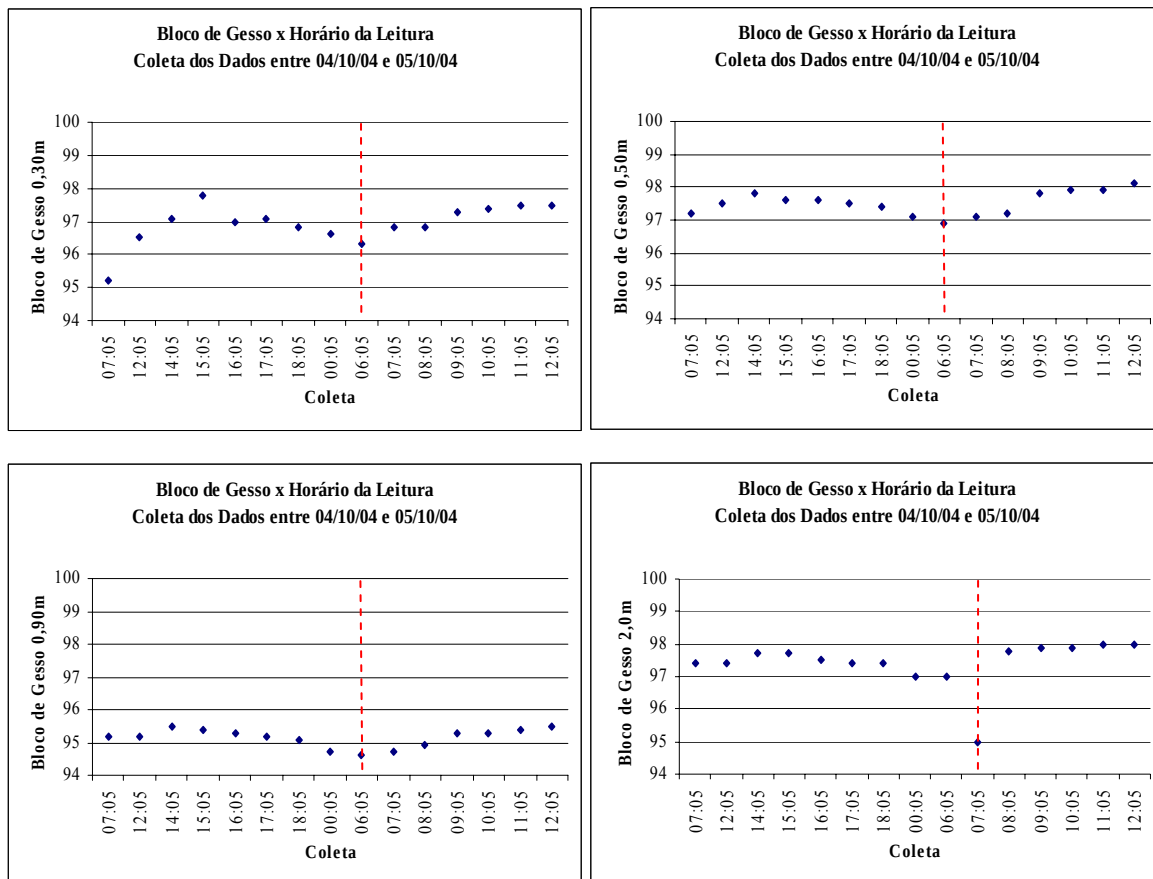


Figura 7.17 – Comportamento dos umidímetros de bloco de gesso durante a 5ª campanha intensiva de monitoramento do fluxo de água na zona não saturada do solo, propriedade P4, Parcela B.

Observa-se a partir das leituras nos umidímetros de bloco de gesso uma variação dessas leituras ao longo do dia sem que ocorra nenhuma entrada no sistema (evento de precipitação ou irrigação). Na Figura 7.17 é observado que antes das linhas pontilhadas, os gráficos têm um trecho ascendente, no começo da campanha, logo após a irrigação (ocorrida entre as 08h24min até 11h21min do dia 04/10/2004), e um trecho descendente em seguida. Esse comportamento era o esperado para esse sensor, pois como seu princípio de funcionamento é a condutividade elétrica, quanto maior o teor de umidade do solo, maior será a sua leitura. Depois da linha pontilhada o gráfico começa a ter um comportamento ascendente, fugindo ao esperado, uma vez que não ocorreu nenhum evento de precipitação, nem de irrigação no dia 05/10/2004.

A causa, a princípio, para esse comportamento não esperado do sensor, foi atribuída à temperatura. A partir da segunda campanha intensiva começou-se, então, a ser monitorada a temperatura do solo, buscando, dessa forma, com que as leituras obtidas nos umidímetros de bloco de gesso pudessem ser corrigidas em função da temperatura do solo. Posteriormente, ao término da fase experimental deste trabalho, analisando os dados obtidos, foi descartada a hipótese da temperatura do solo ser a responsável por esse comportamento. Isso fica claro, quando, por exemplo, as leituras obtidas no umidímetro de bloco de gesso na propriedade P3, Parcela A, no perfil a 0,90m, durante a 2ª campanha intensiva são analisadas (Tabela 7.5).

Na Tabela 7.5 as temperaturas do solo para o perfil a 0,90m não são apresentadas de forma contínua. Essa não continuidade é devido ao monitoramento da temperatura do solo ter sido efetuado em duas profundidades distintas, 0,50 e 0,90m. Logo, o termômetro era intercalado nessas duas profundidades. Na mesma tabela, a partir da 14ª coleta, observa-se que as leituras efetuadas nos umidímetros de bloco de gesso começam a ter um comportamento ascendente, que não é acompanhada pela elevação da temperatura do solo. Sendo assim, a mesma não é a causa do comportamento não esperado dos umidímetros de bloco de gesso.

Tabela 7.5 – Leituras obtidas no umidímetro de bloco de gesso na propriedade P3, Parcela A, no perfil a 0,90m, durante a 2ª campanha intensiva.

	Hora	Leitura	Tempe ratura (°C)		Hora	Leitura	Tempe ratura (°C)
1º	08:06	96,6		13º	00:23	95,9	
2º	09:23	97,1		14º	06:23	95,8	19,2
3º	10:23	96,9	19,1	15º	07:23	96,2	
4º	11:23	97,4		16º	08:23	96,5	19,2
5º	12:23	97,6	19,1	17º	09:23	96,9	
6º	13:23	97,5		18º	10:23	97,0	19,2
7º	14:23	97,6	19,1	19º	11:23	97,2	
8º	15:23	97,7		20º	12:23	97,3	
9º	16:23	96,9	19,2	21º	14:23	97,5	19,2
10º	17:23	96,8		22º	15:23	97,1	
11º	18:23	96,4	19,2	23º	16:23	97,0	
12º	19:23	96,3					

Uma outra tentativa de verificar a influência da temperatura nas leituras obtidas nos umidímetros de bloco de gesso foi por meio da simulação de algumas situações, em laboratório, com os umidímetros: (1) variação da temperatura da amostra do solo com o sensor; (2) variação da temperatura do aparelho de leitura do bloco de gesso; e (3) variação da temperatura do fio condutor do bloco de gesso. Na Figura 7.18 os gráficos para os dois primeiros testes são mostrados. No gráfico superior dessa figura pode ser destacado que um aumento de $\pm 488\%$ na temperatura do conjunto solo mais bloco de gesso promove um aumento na leitura obtida no umidímetro de bloco de gesso na ordem de $\pm 1,6\%$. Conseqüentemente, a influência da temperatura do solo nas leituras obtidas nos umidímetros de blocos de gesso é mínima, podendo ser desprezada. Para o gráfico inferior da mesma figura, só foram constatadas grandes variações nas leituras do umidímetro de bloco de gesso quando a temperatura do aparelho de leitura esteve superior a 50°C . Dessa forma, a afirmação descrita anteriormente, de que o aparelho de leitura dos blocos de gesso sofre influência da temperatura não é confirmada para temperaturas abaixo de 50°C , tendo sido desnecessário o acondicionamento do aparelho de leitura em caixa de isopor, uma vez que as temperaturas em campo não atingem tal limite.

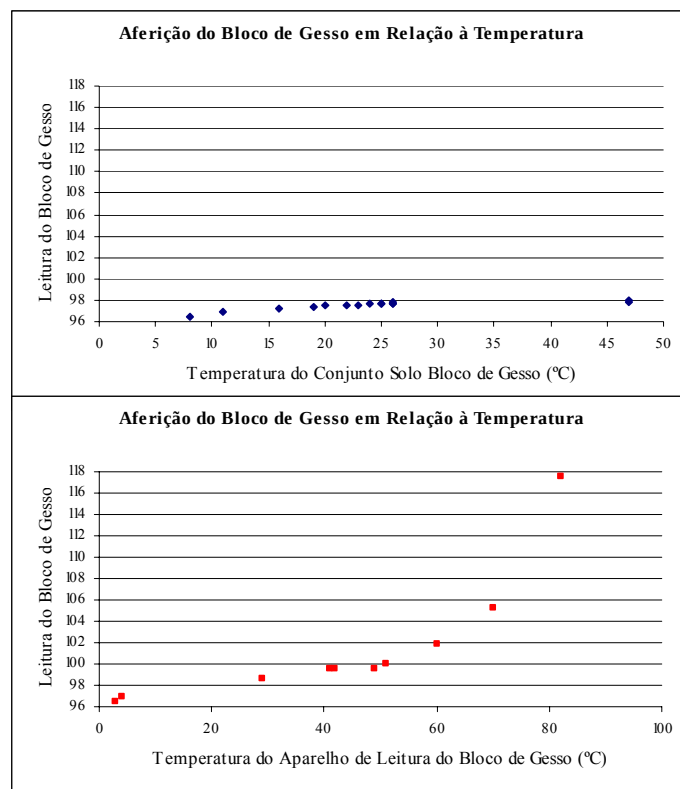


Figura 7.18 – Influência da temperatura nas leituras obtidas com os umidímetros de bloco de gesso em laboratório, variando a temperatura do bloco e a temperatura do aparelho de leitura.

O gráfico para a variação de temperatura do fio condutor do bloco de gesso não foi apresentado pois não houve variação nas leituras obtidas nesse sensor com o aumento da temperatura do fio.

Uma outra hipótese possível para esse comportamento inesperado dos umidímetros de bloco de gesso pode ser a variação da pressão atmosférica ao longo do dia, mas essa hipótese não foi comprovada por meio de ensaios.

Os umidímetros de bloco de gesso se mostraram uma ferramenta simples, de baixo custo, e com uma precisão, comparada com os tensiômetros, relativamente boa. A exceção é para condições próximas à saturação, que nesse caso, os tensiômetros são a melhor escolha. Neste trabalho, como para o balanço hídrico foram utilizados apenas os dados dos tensiômetros, pois as tensões obtidas com esse sensor foram suficientes para o tipo de análise realizado.

7.3 - BALANÇO HÍDRICO

Os resultados do balanço hídrico serão apresentados em duas partes, quais sejam:

- 1) Parâmetros necessários para o balanço hídrico: vazões das bombas hidráulicas e dos aspersores, lâmina de água interceptada, lâmina de água evapotranspirada (evapotranspiração real da cultura) e modelagem matemática do fluxo de água na zona não saturada do solo; e
- 2) Cálculo das perdas hídricas: perda hídrica no sistema de irrigação, perda hídrica nas parcelas experimentais e perda hídrica total.

7.3.1 - Parâmetros necessários para a determinação do balanço hídrico

7.3.1.1 - Vazões reais das bombas hidráulicas determinadas pelo bombeamento de um volume de água conhecido

As medições das vazões reais das bombas hidráulicas (Tabela 7.6) foram realizadas com o auxílio de uma caixa de água de 500L. A conversão do nível de água restante na caixa, após cada ensaio, em volume de água, foi efetuada por meio da calibração da mesma. Na

figura a seguir os pontos experimentais da curva de calibração da caixa de água são apresentados.

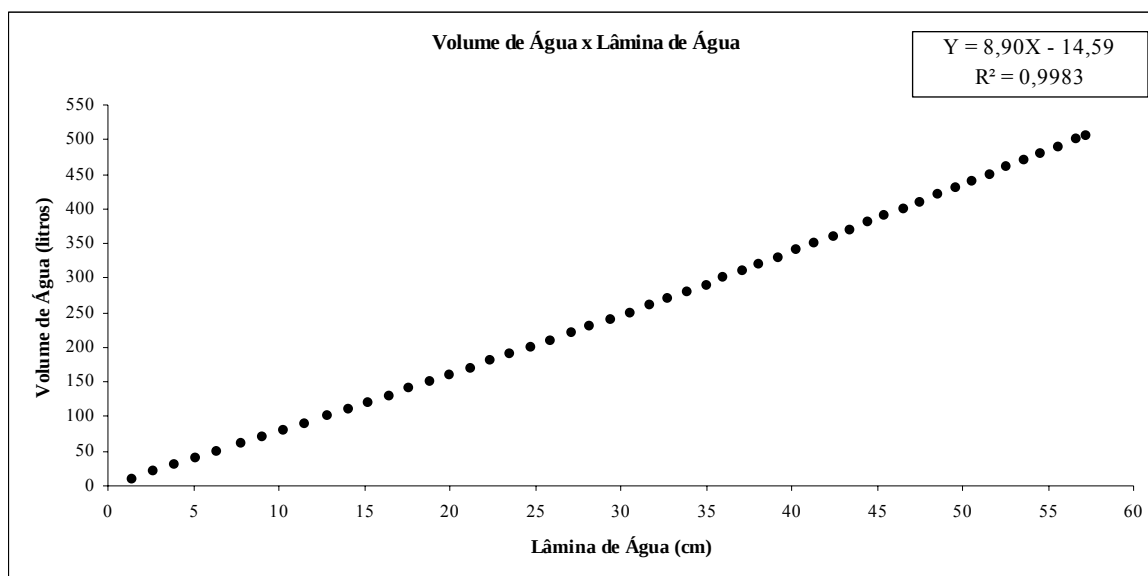


Figura 7.19 – Curva de calibração da caixa de água.

Para a conversão da vazão real das bombas hidráulicas em lâmina real de água por unidade de tempo (Tabela 7.6), as vazões foram divididas pelas respectivas áreas das parcelas experimentais, áreas essas apresentadas na Tabela 5.3.

As vazões reais das bombas hidráulicas conforme mostradas na Tabela 7.6 são diferentes tanto entre os CH, da propriedade P1, Parcela B, como entre as linhas dos aspersores, das demais propriedades e parcelas, com exceção para as parcelas da propriedade P3. A diferença entre as vazões reais das bombas pode ser atribuída principalmente ao desnível entre as mesmas (Tabela 7.7), fazendo com que, para uma mesma potência dos motores elétricos dessas bombas, uma altura manométrica maior seja vencida e, conseqüentemente, uma menor vazão seja bombeada. Para a propriedade P3, os valores das vazões reais são iguais, pois para cada evento de irrigação, as três linhas funcionam ao mesmo tempo. Dessa forma, os valores apresentados na Tabela 7.6, para as Linhas 1 e 2, Parcela A, e para a Linha 1, Parcela B, são valores médios da vazão real bombeada.

Tabela 7.6 – Vazão real das bombas hidráulicas (lâmina real de água por unidade de tempo) utilizadas nos sistemas de irrigação [Dados da tabela expressos em m³/h (mm/h)].

	Parcela A		Parcela B			
P1	Linha 1	Linha 2	CH1	CH2	CH3	CH4
	32 (9,4)	28 (8,2)	14 (8,6)	14 (8,6)	26 (16)	25 (15)
	Parcela A		Parcela B			
P2	Linha 1	Linha 2	Linha 1			
	33 (18)	29 (15)	26 (28)			
	Parcela A		Parcela B			
P3	Linha 1	Linha 2	Linha 1			
	17 (8,7)	17 (8,7)	17 (8,7)			
	Parcela A		Parcela B			
P4	Linha 1	Linha 2	Linha 1	Linha 2		
	24 (18)	30 (22)	25 (12)	24 (12)		

CH – canhão hidráulico.

Tabela 7.7 – Diferença de nível entre as bombas hidráulicas e as parcelas experimentais (Dados da tabela expressos em m).

	P1	P2	P3	P4
Parcela A	12	5,3	-1,4	2,4
Parcela B	12	9,6	-2,8	1,7

Na Tabela 7.7 os valores das diferenças de níveis, para as Parcelas A e B, propriedade P3, são negativos pois as parcelas experimentais estavam localizadas abaixo do nível da bomba.

7.3.1.2 - Vazões estimadas das bombas hidráulicas determinadas por medições da corrente elétrica de alimentação dos seus motores elétricos

Para a realização desse ensaio foram utilizados um alicate amperimétrico e um nível a laser. A conversão da corrente elétrica medida, em potência do motor elétrico, foi efetuada

por meio da Equação 3.6 (equação da potência do motor elétrico trifásico). Já a conversão da potência do motor elétrico, em vazão estimada das bombas hidráulicas, foi realizada a partir da Equação 3.7 (equação da potência do motor elétrico em função da vazão da bomba hidráulica). As vazões estimadas das bombas hidráulicas (Tabelas 7.8 e 7.9) foram determinadas tanto com a potência do motor elétrico calculada, como com a potência do motor elétrico fornecida pelo fabricante. O emprego da potência do motor elétrico fornecida pelo fabricante teve o intuito de verificar o erro cometido, caso a estimação da vazão seja feita com esse valor.

Para a conversão da vazão estimada das bombas hidráulicas em lâmina estimada de água por unidade de tempo, as vazões estimadas foram divididas pelas respectivas áreas das parcelas experimentais, áreas essas apresentadas na Tabela 5.3.

Tabela 7.8 – Vazão estimada das bombas hidráulicas (lâmina estimada de água por unidade de tempo), determinada por meio da potência dos motores elétricos calculada [Dados da tabela expressos em m³/h (mm/h)].

	Parcela A		Parcela B			
P1	Linha 1	Linha 2	CH1	CH2	CH3	CH4
	32 (9,4)	31 (9,1)	28 (17)	26 (16)	28 (17)	26 (16)
	Parcela A		Parcela B			
P2	Linha 1	Linha 2	Linha 1			
	35 (19)	33 (18)	27 (29)			
	Parcela A		Parcela B			
P3	Linha 1	Linha 2	Linha 1			
	13 (6,7)	13 (6,7)	13 (6,7)			
	Parcela A		Parcela B			
P4	Linha 1	Linha 2	Linha 1	Linha 2		
	37 (27)	34 (25)	40 (20)	37 (18)		

CH – canhão hidráulico.

Comparando os resultados obtidos no item 7.3.1.1, Tabela 7.6, com os resultados obtidos neste item, Tabela 7.8, observa-se que o método para a determinação da vazão estimada das bombas hidráulicas apresentou bons resultados em relação aos dados da propriedade P1 (com exceção para os CH1 e CH2) e em relação aos dados da propriedade P2. Entretanto, os resultados em relação aos dados das propriedades P3 e P4 foram ruins. Para as propriedades P1 (com exceção do CH1 e CH2) e P2, a maior diferença encontrada entre a vazão da bomba hidráulica determinada volumetricamente e a vazão da bomba hidráulica determinada por medição da corrente elétrica de alimentação de seu motor elétrico foi da ordem de 11% (propriedade P1, Parcela A, Linha 2). Para as propriedades P3 e P4 essa diferença atingiu 60% (propriedade P4, Parcela B, Linha 1). Uma das justificativas para explicar o comportamento diferenciado da vazão da bomba hidráulica para os CH1 e CH2 é que, durante a realização dos dois ensaios, tendo sido os mesmos efetuados em datas distintas, os canhões hidráulicos utilizados nesses dois pontos foram diferentes, o que invalidou a comparação. Em todas as propriedades, as vazões estimadas das bombas hidráulicas foram maiores do que as vazões reais das bombas hidráulicas, verificando-se, assim, que no método para a determinação das vazões das bombas hidráulicas por medição da corrente elétrica de alimentação de seus motores elétricos o valor do rendimento assumido não foi bom.

A diferença entre os resultados obtidos fica ainda maior quando a potência elétrica utilizada é a fornecida pelo fabricante. No caso da propriedade P1, Parcela A, Linha 2, a diferença vai para 68%. Para a propriedade P4, Parcela B, Linha 1, a diferença vai para 84%.

O valor do $\cos \varphi$ utilizado na Equação 3.6 para o cálculo da potência do motor elétrico de todas as propriedades foi igual a 0,90. A necessidade de se utilizar um valor único do $\cos \varphi$ foi comentada no item 5.4.1.2. Embora o valor dessa variável tenha sido o mesmo para todos os cálculos da potência dos motores elétricos, não pode ser atribuída a ele a baixa precisão do método nos valores obtidos para as propriedades P3 e P4 descrito neste item. Essa afirmação é comprovada quando as vazões das bombas hidráulicas foram determinadas para valores do $\cos \varphi$ entre 0,80 e 1,0. A variação de $\pm 0,10$ nos valores do $\cos \varphi$ promoveu uma variação máxima de 7,9% na vazão da bomba hidráulica

(propriedade P4, Parcela B, Linha 1), quando foi utilizado o valor de 0,80 para $\cos \varphi$. Nessa situação a vazão estimada teve seu valor reduzido.

Tabela 7.9 – Vazão estimada das bombas hidráulicas, determinada por meio da potência nominal do motor elétrico (Dados da tabela expressos em m^3/h).

	Parcela A		Parcela B			
P1	Linha 1	Linha 2	CH1	CH2	CH3	CH4
	48	47	44	40	44	40

	Parcela A		Parcela B	
P2	Linha 1	Linha 2	Linha 1	
	49	48	41	

	Parcela A		Parcela B	
P3	Linha 1	Linha 2	Linha 1	
	18	18	18	

	Parcela A		Parcela B	
P4	Linha 1	Linha 2	Linha 1	Linha 2
	43	40	46	43

CH – canhão hidráulico.

Comparando os resultados das Tabelas 7.8 e 7.9 verifica-se que, quando a vazão estimada é determinada por meio da potência nominal do motor elétrico, os valores da vazão são superestimados, em média, na ordem de 40%.

Para aferir o uso da fórmula de Hazen-Williams, utilizada para o cálculo da perda de carga na tubulação de 2" (do início da linha secundária até o primeiro aspersor ou canhão hidráulico de todas as propriedades), foi utilizada, nesse trecho, da propriedade P1, Parcela B, CH4, a fórmula universal. A diferença entre a vazão estimada, utilizando a fórmula de Hazen-Williams, comparado com a vazão estimada utilizando a fórmula universal, foi de 3,6%. Assim, nesse pequeno comprimento de tubulação, a fórmula de Hazen-Williams não promoveu grandes alterações no valor da vazão, tendo sido a mesma aumentada em $0,94\text{m}^3/\text{h}$ quando a fórmula utilizada foi a universal.

Como descrito no item 5.4.1.2 na propriedade P1, as vazões estimadas das bombas hidráulicas também foram determinadas com as perdas de carga sendo obtidas pela diferença entre a pressão medida na bomba e a pressão medida no último ponto (aspersor ou canhão hidráulico) da linha de irrigação, vazões essas apresentados na tabela a seguir:

Tabela 7.10 – Vazão estimada das bombas hidráulicas determinada pela potência do motor elétrico calculada, utilizando a perda de carga medida
(Dados da tabela expressos em m³/h).

	Parcela A		Parcela B			
P1	Linha 1	Linha 2	CH1	CH2	CH3	CH4
	22	21	31	32	23	21

CH – canhão hidráulico.

Na Tabela 7.10 nota-se que somente as vazões para a Parcela A, Linhas 1 e 2 tiveram seus valores bem distintos dos resultados da Tabela 7.9. A causa mais provável para essa grande diferença são os vazamentos que ocorrem nas linhas dos aspersores, fazendo com que os valores obtidos de pressão no último ponto (último aspersor) sejam subestimados. Para os CH1 e CH2 as vazões foram maiores e para os CH3 e CH4 as vazões foram menores. Essa diferença é atribuída aos ensaios terem sido efetuados em datas distintas e, assim, os canhões hidráulicos utilizados terem sido diferentes entre cada ponto (CH1, CH2, CH3 e CH4), invalidando a comparação.

7.3.1.3 - Vazões dos aspersores e canhões hidráulicos medidas de forma direta (vazão aspergida)

A determinação direta da vazão dos aspersores e canhões hidráulicos (Tabela 7.11) foi conduzida por meio de ensaios volumétricos.

Os valores das vazões dos CH, Parcela B, propriedade P1 não são apresentados na Tabela 7.11 pelas vazões não terem sido determinadas em campo, em função da alta pressão com a qual os CH trabalham, impossibilitando, dessa forma, com que as curvas utilizadas para direcionar o jato de água para dentro do recipiente de volume conhecido, fossem colocadas nos bocais dos mesmos.

Para a conversão da vazão média aspergida em lâmina de água aspergida por unidade de tempo (Tabela 7.11), por linha de aspersores, as vazões médias aspergidas foram multiplicadas pelo número de aspersores presentes em cada linha, de cada parcela experimental, sendo o resultado dividido pelas respectivas áreas das parcelas experimentais (Tabela 5.3).

O número de aspersores por linha, em cada propriedade, é de 11 aspersores na propriedade P1, de 7 aspersores na propriedade P2, de 5 aspersores na propriedade P3 e de 8 aspersores na propriedade P4.

Tabela 7.11 – Vazão média dos aspersores (vazão média dos aspersores expressa em lâmina de água aspergida por unidade de tempo, por linha de aspersores) [Dados da tabela expressos em m³/h (mm/h)].

	Parcela A				Parcela B			
P1	ASP 1	ASP 2	ASP 3	ASP 4	CH 1	CH 2	CH 3	CH 4
	2,7	2,5	2,7	2,6	—	—	—	—
Média	2,6 (8,4)				—			

	Parcela A				Parcela B			
P2	ASP 1	ASP 2	ASP 3	ASP 4	ASP 1	ASP 2	ASP 3	ASP 4
	3,2	4,5	3,2	4,5	2,5	3,0	—	—
Média	3,8 (14)				2,8 (21)			

	Parcela A				Parcela B			
P3	ASP 1	ASP 2	ASP 3	ASP 4	ASP 1	ASP 2	ASP 3	ASP 4
	2,4	2,6	2,1	2,0	2,2	3,4	—	—
Média	2,3 (13)				2,8 (6,6)			

	Parcela A				Parcela B			
P4	ASP 1	ASP 2	ASP 3	ASP 4	ASP 1	ASP 2	ASP 3	ASP 4
	2,6	2,8	2,5	2,5	2,5	2,4	2,8	2,6
Média	2,6 (15)				2,6 (10)			

ASP – aspersor; e CH – canhão hidráulico

Verifica-se na Tabela 7.11 que a vazão média dos aspersores, Parcela A, propriedade P2 é da ordem de 36% maior que a vazão média dos aspersores, Parcela B, da mesma propriedade. Essa diferença ocorre devido à diferença de nível entre as parcelas, que nesse caso é igual a 4,3m.

7.3.1.4 - Vazões dos aspersores e canhões hidráulicos, medidas de forma indireta por meio do ensaio da uniformidade de aplicação da água (vazão efetiva aplicada)

Para o levantamento da uniformidade de aplicação da água pelos aspersores, foram distribuídos pluviômetros entre as áreas de influência dos aspersores e canhões hidráulicos que contribuíam com cada parcela experimental. Esses pluviômetros foram distribuídos em malhas regulares. Na tabela a seguir são apresentados os valores da lâmina de água efetiva por unidade de tempo, por linha de aspersores e por canhão hidráulico:

Tabela 7.12 – Lâmina de água efetiva por unidade de tempo, por linha de aspersores e por canhão hidráulico (Dados da tabela expressos em mm/h).

	Parcela A		Parcela B			
P1	Linha 1	Linha 2	CH 1	CH2	CH 3	CH 4
Média	6,7		6,7			

	Parcela A		Parcela B	
P2	Linha 1	Linha 2	Linha 1	Linha 2
Média	12		9,1	—

	Parcela A		Parcela B	
P3	Linha 1	Linha 2	Linha 1	Linha 2
Média	28		14	—

	Parcela A		Parcela B	
P4	Linha 1	Linha 2	Linha 1	Linha 2
Média	8,3		7,9	

Na Tabela 7.12 os dados, com exceção dos da propriedade P3, são todos menores que os apresentados na Tabela 7.11 [vazão média dos aspersores (vazão média dos aspersores expressa em lâmina de água aspergida por unidade de tempo, por linha de aspersores)]. Essa diferença é atribuída às perdas ocorridas por espalhamento e por evaporação da água aplicada pelos aspersores. Comparando os valores da lâmina real de água captada por unidade de tempo (Tabela 7.6) com os valores da lâmina de água efetiva por unidade de tempo (Tabela 7.12), para a propriedade P3, é observado que os valores obtidos nesse ensaio são maiores, ocasionado por algum erro na execução desse ensaio.

7.3.1.5 - Interceptação

A interceptação da superfície dos vegetais foi calculada por meio da equação de Horton (Equação 3.1). Os parâmetros da equação (parâmetros a_i , b_i e n_i) utilizados neste trabalho foram os apresentados por Tucci (2001), para pequenas culturas, para forrageiras, para milho e para pomar “*beech*” [árvores de casca lisa cinzenta e madeira dura (aproximação para as culturas da berinjela e jiló)], valores esses apresentados no item 5.4.1.5. A precipitação na equação de Horton (Equação 3.1) foi considerada com sendo a lâmina de água efetiva aplicada em cada evento de irrigação, nos dias das campanhas intensivas de monitoramento do fluxo de água na zona não saturada do solo.

Pelo produto entre a lâmina de água efetiva por unidade de tempo e a duração de cada evento de irrigação foi obtida a lâmina de água efetiva que atinge a parcela experimental. Na Tabela 7.13 são apresentadas a duração da irrigação, a lâmina de água efetiva e a interceptação ocorridas durante cada campanha intensiva de monitoramento do fluxo de água na zona não saturada do solo.

Tabela 7.13 – Interceptação da superfície dos vegetais, para cada evento de irrigação, ocorrida em cada campanha intensiva de monitoramento do fluxo de água na zona não saturada do solo: Duração de cada evento de irrigação (T); Lâmina de água efetiva aplicada em cada evento de irrigação (H_A); e Interceptação ocorrida em cada evento de irrigação (H_I).

Propriedades / Campanhas	P1						P2					
	Parcela A			Parcela B			Parcela A			Parcela B		
	T (h)	H_A (mm)	H_I (mm)	T (h)	H_A^* (mm)	H_I^* (mm)	T (h)	H_A (mm)	H_I (mm)	T (h)	H_A (mm)	H_I (mm)
1º	0,85	5,7	0,56	0,48	1,6	0,00	0,58	7,0	0,31	0,15	2,7	0,02
2º	0,50	3,4	0,43	0,50	1,7	0,70	0,65	7,8	0,33	0,15	2,7	0,43
3º	0,70	4,7	0,50	0,82	2,7	0,70	0,90	11	0,40	0,21	3,8	0,52
4º	0,83	5,6	0,56	1,6	5,5	0,70	0,77	9,2	0,36	0,23	4,1	0,54
5º	0,95	6,4	0,61	1,4	4,6	0,70	0,80	9,6	0,37	0,31	5,6	0,67

Propriedades / Campanhas	P3						P4					
	Parcela A			Parcela B			Parcela A			Parcela B		
	T (h)	H_A (mm)	H_I (mm)	T (h)	H_A (mm)	H_I (mm)	T (h)	H_A^* (mm)	H_I^* (mm)	T (h)	H_A^* (mm)	H_I^* (mm)
1º	0,48	6,3	0,02	0,48	3,2	0,02	0,50	4,2	1,1	0,50	4,0	1,1
2º	0,50	6,5	0,08	0,50	3,3	0,07	0,33	2,7	0,8	0,70	5,6	1,3
3º	0,40	5,2	0,68	0,40	2,6	0,42	0,60	5,1	1,3	0,53	4,2	1,1
4º	0,43	5,6	0,72	0,43	2,9	0,44	0,83	6,9	1,6	1,1	8,4	1,9
5º	0,45	5,9	0,74	0,45	3,0	0,02	1,0	8,3	1,8	1,0	7,8	1,7

* Valores convertidos para base diária, pois diferentemente das outras propriedades, na propriedade P1, Parcela B, o turno de rega é de 48 horas e na propriedade P4, Parcelas A e B, os turnos de rega são de 72 horas.

Na Tabela 7.13 observa-se que os valores de interceptação para as propriedades P1, Parcela B, 1º campanha; P2, Parcela B, 1º campanha; P3, Parcela A, 1º e 2º campanhas; P3, Parcela B, 1º, 2º e 5º campanhas são valores baixos quando comparados com os demais resultados, pois as culturas estavam na fase inicial de desenvolvimento.

7.3.1.6 - Evapotranspiração real da cultura

No cálculo da evapotranspiração real da cultura foram utilizados os valores do coeficiente de cultura (K_c) apresentados em Allen *et al.* (1998). Esses valores foram obtidos para clima semi-úmido, e para o estudo de caso foram corrigidos por um fator, que é função da altura das culturas e da velocidade do vento a 2,0m de altura, para clima semi-árido, que é o clima, apresentado em Allen *et al.* (1998), com características mais próximas do clima do cerrado. Nos casos em que o teor de umidade do solo não estava na capacidade de campo, nas campanhas intensivas de monitoramento do fluxo de água na zona não saturada do solo, houve a necessidade de se utilizar o coeficiente de estresse (K_s). Esse coeficiente, que é função do teor de umidade do solo, foi determinado por meio da Equação 5.7 (equação do coeficiente de estresse). Nessa equação, os teores de umidade na capacidade de campo e no ponto de murcha foram tomados para os perfis correspondentes à zona radicular das culturas em cada parcela experimental. O teor de umidade utilizado foi o valor médio ocorrido durante as campanhas intensivas de monitoramento do fluxo de água na zona não saturada do solo, para os perfis relacionados à zona radicular das culturas. Já os valores da evapotranspiração de referência utilizados foram os obtidos pela EMBRAPA/CPAC-DF na sua Estação Principal. Como a fase experimental deste trabalho foi desenvolvida no período da seca, quando a nebulosidade é baixa, os valores determinados nessa estação devem ser muito semelhantes aos que seriam obtidos com dados da bacia. Medeiros (2002) apresenta de forma bem sucinta o algoritmo de Allen *et al.* (1998) para o cálculo da evapotranspiração de referência por meio da equação da FAO Penman-Monteith.

Na estação meteorológica automática localizada na bacia do Descoberto foram coletados valores da velocidade do vento a 10m da superfície do solo, para os dias em que as campanhas intensivas de monitoramento do fluxo de água na zona não saturada do solo foram realizadas. Esses valores foram corrigidos para a altura de 2,0m em relação à superfície do solo, por meio do fator de 0,748, obtido em Allen *et al.* (1998). Os valores da velocidade do vento a 2,0m de altura foram utilizados na correção de K_c médio para clima semi-árido.

Na Tabela 7.14 são apresentados os valores da evapotranspiração de referência (ETo) e da evapotranspiração real da cultura ($ETrc$), obtido pelo produto entre a ETo , K_c e K_s , para cada campanha intensiva de monitoramento do fluxo de água na zona não saturada do solo.

Tabela 7.14 – *ETo* e *ETrc* para cada campanha intensiva de monitoramento do fluxo de água na zona não saturada do solo, em cada propriedade (Dados da tabela expressos em mm).

Propriedades / Campanhas	P1				P2			
	Parcela A		Parcela B		Parcela A		Parcela B	
	<i>ETo</i>	<i>ETrc</i>	<i>ETo*</i>	<i>ETrc*</i>	<i>ETo</i>	<i>ETrc</i>	<i>ETo</i>	<i>ETrc</i>
1º	4,3	3,7	4,3	1,1	3,4	3,7	3,4	2,4
2º	5,1	3,4	5,3	4,7	5,3	5,7	5,3	5,3
3º	6,5	5,2	6,0	3,8	6,5	7,2	6,5	6,5
4º	7,4	5,6	7,0	4,4	5,6	6,1	5,6	5,5
5º	5,2	3,6	4,7	2,9	4,2	4,6	4,2	4,1

Propriedades / Campanhas	P3				P4			
	Parcela A		Parcela B		Parcela A		Parcela B	
	<i>ETo</i>	<i>ETrc</i>	<i>ETo</i>	<i>ETrc</i>	<i>ETo*</i>	<i>ETrc*</i>	<i>ETo*</i>	<i>ETrc*</i>
1º	4,3	2,9	4,3	2,6	3,6	4,0	3,6	4,0
2º	3,9	2,6	3,0	1,7	5,4	4,2	5,4	6,2
3º	6,4	6,2	6,4	5,3	6,7	5,3	6,7	7,4
4º	5,6	2,6	5,6	2,7	6,8	5,5	6,8	5,9
5º	4,2	2,2	4,2	1,4	5,4	5,7	5,4	4,1

* Valores expressos em base diária, pois diferentemente das outras propriedades, na propriedade P1, Parcela B, o turno de rega é de 48 horas e na propriedade P4, Parcelas A e B, os turnos de rega são de 72 horas.

No apêndice D são apresentadas as tabelas de cálculo do *Kc* e do *Ks* para todas as propriedades e campanhas intensivas de monitoramento do fluxo de água na zona não saturada do solo. No apêndice E são apresentados os dados diários da evapotranspiração de referência para Brasília em 2004. Esses valores foram fornecidos pela EMBRAPA/CPAC-DF.

Na Tabela 7.14 alguns valores da *ETrc* são maiores do que o da *ETo*, e isso se deve: ao *Kc*, que nesses casos é maior do que 1,0; e ao *Ks*, que nesses casos tem valores próximos a 1,0. Para as propriedades P2, Parcelas A e B, e P4, Parcela A, 1º campanha, e Parcela B, 1º e 2º campanhas, os valores de *Ks* foram iguais a 1,0, pois diferentemente das outras propriedades, o teor de umidade do solo estava acima do teor de umidade da capacidade de campo.

7.3.1.7 - Modelagem matemática do fluxo de água na zona não saturada do solo

Para a modelagem matemática do fluxo de água na zona não saturada do solo foi utilizado o programa SSFLO, adaptado por Campos (1998). A opção de cálculo escolhida, por ter sido a melhor opção encontrada por Campos (1998), foi a do modelo de Neuman, com matriz de armazenamento na forma aglutinada, integração por quadratura de Gauss e cálculo do coeficiente de capacidade (C) pela declividade da corda.

As condições iniciais utilizadas no programa SSFLO foram os valores da tensão de sucção obtidos nos tensiômetros antes da irrigação ter ocorrido, em cada campanha intensiva. As condições de contorno foram condições de fluxo conhecido na superfície superior da malha, com o valor de q correspondente à lâmina de água que atinge o solo (lâmina de água efetiva – interceptação), aplicada em cada campanha intensiva e, no contorno inferior, os valores da tensão de sucção obtidos nos tensiômetros, como condições de carga conhecida. Nas laterais, o fluxo foi assumido como nulo. Os parâmetros do solo utilizados no programa SSFLO foram levantados para todas as propriedades, por meio de ensaios laboratoriais.

Outros parâmetros, como o número de ponto de Gauss, igual a 7,0; o número máximo de iterações, igual a $1,0 \times 10^5$; o passo de tempo mínimo permitido, igual a $1,0 \times 10^{-7}$; o número máximo de reduções, igual a 20; a tolerância no erro do potencial matricial entre iterações, igual a $1,0 \times 10^{-4}$; e o número máximo de iterações permitido para cada passo de tempo, igual a 6,0 foram assumidos como sendo os utilizados por Campos (1998), no teste do algoritmo para o caso do experimento de Elmaloglou (1980, *apud* Campos, 1998).

Nas simulações efetuadas para cada campanha intensiva de monitoramento do fluxo de água na zona não saturada do solo, para cada parcela experimental, foi constatada que, quando as tensões de sucção registradas nos tensiômetros nas condições iniciais apresentavam valores inferiores a -5,1mca, o programa não convergia.

Os resultados dessa simulação não são apresentados pois, ao término da mesma, foi constatado que no programa adaptado por Campos (1998) foi retirado um subprograma do programa original, escrito por Koide (1990). Esse subprograma permitia a variação do fluxo no contorno. Assim, na simulação realizada, o fluxo no contorno foi mantido

constante ao longo dos incrementos de tempo durante as simulações, o que não representa o caso estudado.

Para estimar a lâmina de água percolada, foi utilizada a equação de Darcy adaptada para a velocidade aparente do fluxo de água na zona não saturada do solo (Equação 3.16). O valor do coeficiente de permeabilidade em função do teor de umidade do solo foi obtido pela média desses coeficientes entre cada perfil. Na Tabela 7.15 são apresentados os valores da lâmina de água que atinge o solo (lâmina de água efetiva – interceptação) e da lâmina de água percolada nas profundidades abaixo da zona radicular (Tabela 5.2) para cada parcela experimental (na 1ª e 2ª campanha, entre os perfis a 0,50 e 0,90m e nas demais campanhas: entre os perfis a 0,30 e 0,50m, para as propriedades P1, P2 e P3; e entre os perfis a 0,50 e 0,90m, para a propriedade P4), em cada campanha intensiva. Nessa tabela existem dois valores de lâmina de água percolada que são maiores do que a lâmina de água que atinge o solo. Essa diferença pode ser atribuída a vários erros, tais como: uso de um valor médio do coeficiente de permeabilidade do solo para cada perfil; obtenção de valores da umidade residual e de saturação do solo pela técnica dos mínimos quadrados; imprecisão de leitura da tensão de sucção nos tensiômetros; e uso de amostras indeformadas do solo supostamente compactadas. Outra hipótese é a da contribuição da água armazenada no solo no período da chuva.

Na Figura 7.20 são apresentados dois gráficos relacionando o $k(\theta)$, a tensão de sucção do tensiômetro e o θ para duas propriedades onde ocorreram a percolação. Nela verifica-se que, à medida que o teor de umidade do solo aumenta, o $k(\theta)$ e a tensão de sucção aumentam, sendo os mesmos diretamente proporcionais ao teor de umidade do solo.

Para a propriedade P4, embora os valores estejam expressos em base diária, pode-se observar, baseado na percolação ocorrida na Parcela B, não se preocupando com valores, que nos meses próximos ao fim do período chuvoso (junho e julho), a lâmina de água aplicada a cada 72 horas (turno de rega) gera perdas por percolação, essas perdas porém não podem ser entendidas como um manejo inadequado de irrigação, pois, por outro lado, a lâmina de água interceptada diminui em 50%, na média. Uma análise comparativa, de qual manejo é o melhor, não é possível de ser contemplada neste trabalho, pois não

existem, para o manejo diário, dados reais do monitoramento do fluxo de água na zona não saturada do solo para essa propriedade.

Tabela 7.15 – Lâmina de água que atinge o solo (H_{AS}) e lâmina de água percolada (H_P).

Propriedades / Campanhas	P1				P2			
	Parcela A		Parcela B		Parcela A		Parcela B	
	H_{AS} (mm)	H_P (mm)	H_{AS} (mm)	H_P (mm)	H_{AS} (mm)	H_P (mm)	H_{AS} (mm)	H_P (mm)
1º	5,1	6,1	1,6	—	6,7	3,7	2,7	1,9
2º	3,0	—	1,0	—	7,5	—	2,3	—
3º	4,2	—	2,0	—	11	—	3,3	1,2
4º	5,0	—	4,8	—	8,8	—	3,6	0,70
5º	5,8	—	3,9	—	9,2	—	4,9	0,20

Propriedades / Campanhas	P3				P4			
	Parcela A		Parcela B		Parcela A		Parcela B	
	H_{AS} (mm)	H_P (mm)	H_{AS} (mm)	H_P (mm)	H_{AS} (mm)	H_P (mm)	H_{AS} (mm)	H_P (mm)
1º	6,3	—	3,2	1,2	3,1	—	2,9	12
2º	6,4	—	3,2	0,10	1,9	—	4,3	—
3º	4,0	—	2,0	—	3,8	—	3,1	—
4º	4,3	—	2,2	—	5,3	—	6,5	—
5º	4,5	—	3,0	—	6,5	—	6,1	0,03

Na Tabela 7.15 verifica-se que, em quase todas as parcelas, ocorrem a percolação na 1º campanha intensiva. Uma hipótese levantada para esse fato é a da água armazenada no solo no período da chuva, uma vez que a 1º campanha intensiva foi realizada no mês de julho, sendo o mais próximo do fim desse período (abril).

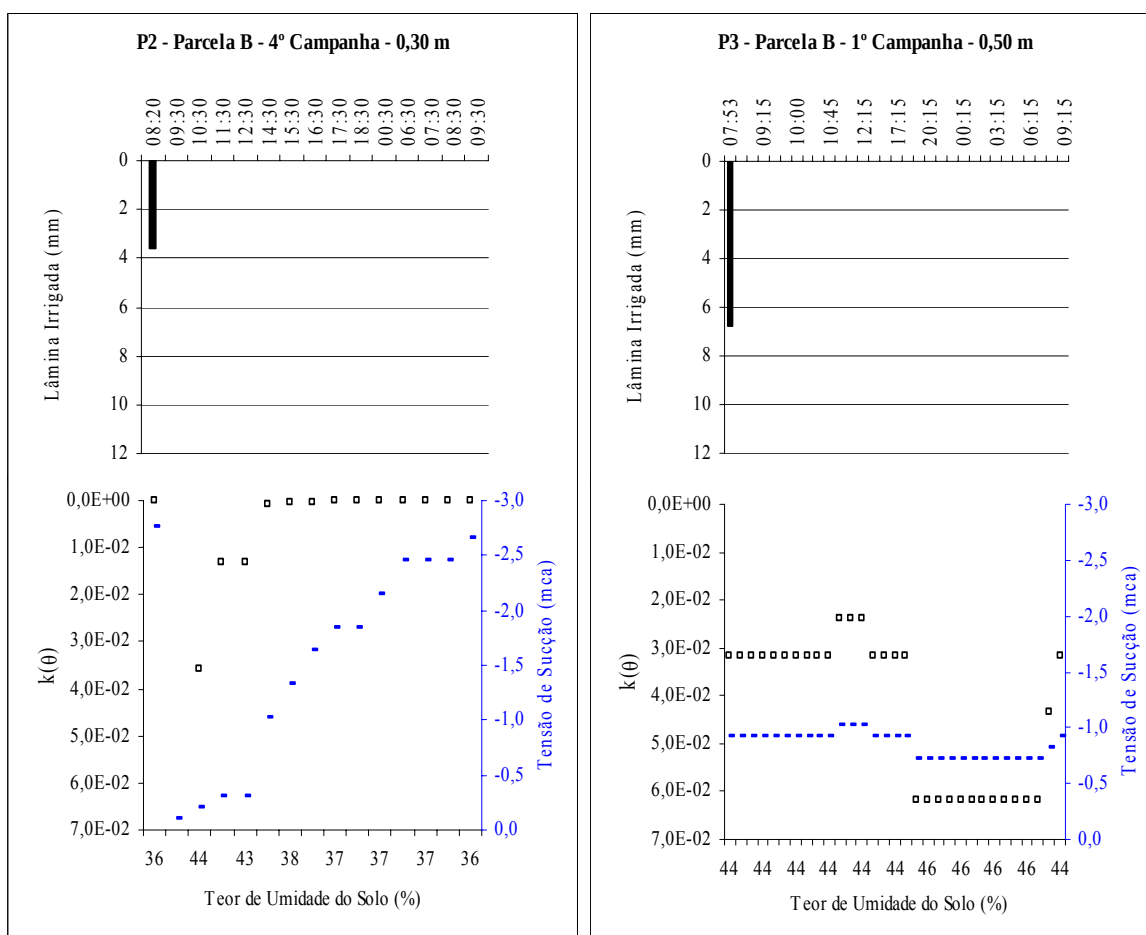


Figura 7.20 – Variação do coeficiente de permeabilidade em função do teor de umidade do solo e da tensão de sucção com o teor de umidade do solo.

7.3.2 - Cálculo das perdas hídricas

7.3.2.1 - Perda hídrica nos sistemas de irrigação

A perda hídrica nos sistemas de irrigação foi calculada por meio da relação entre a lâmina real de água captada e a lâmina de água aspergida, em cada campanha intensiva de monitoramento do fluxo de água na zona não saturada do solo, para as parcelas experimentais, de cada propriedade.

O cálculo da lâmina real de água captada, para cada campanha intensiva, foi realizado pelo produto entre as vazões reais, expressas em lâmina real de água por unidade de tempo (Tabela 7.6), com a duração de cada evento de irrigação (Tabela 7.13, coluna T). O cálculo da lâmina de água aspergida foi feito de forma semelhante, porém, utilizando os dados da Tabelas 7.11 e 7.13 (coluna T).

Nas Figuras 7.21, 7.22, 7.23 e 7.24 são apresentados os histogramas da lâmina real de água captada e da lâmina de água aspergida, para cada parcela experimental, de cada propriedade, para todas as campanhas intensivas de monitoramento do fluxo de água na zona não saturada do solo. A diferença entre os dois valores representa as perdas ocorridas, em lâmina, no sistema de irrigação. Os valores das perdas ocorridas no sistema de irrigação, determinados por meio da Equação 5.9, e expressos em porcentagem estão relacionadas com o eixo da direita (eixo vermelho). As perdas, na média, foram de 17%, as quais são consideráveis, pois a cada 1,0mm de água captada para o sistema de irrigação, 0,17mm são perdidos por vazamentos nas tubulações.

Para a propriedade P1, Parcela B, os valores da lâmina de água aspergida para os canhões hidráulicos foram assumidos como sendo iguais aos valores da lâmina real de água captada, pois a lâmina de água aspergida não foi determinada em campo, em função das altas pressões em que os canhões hidráulicos trabalham. Na mesma propriedade P1, Parcela B, com turno de rega de 48 horas e na propriedade P4, Parcelas A e B, com turnos de rega de 72 horas, os valores das lâminas foram convertidos para a base diária.

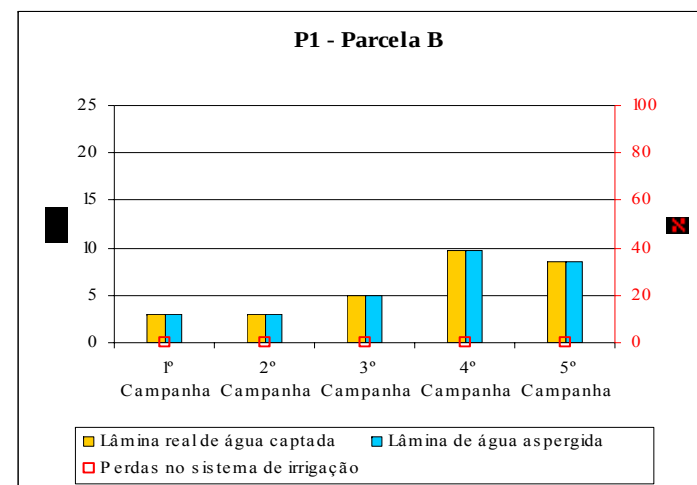
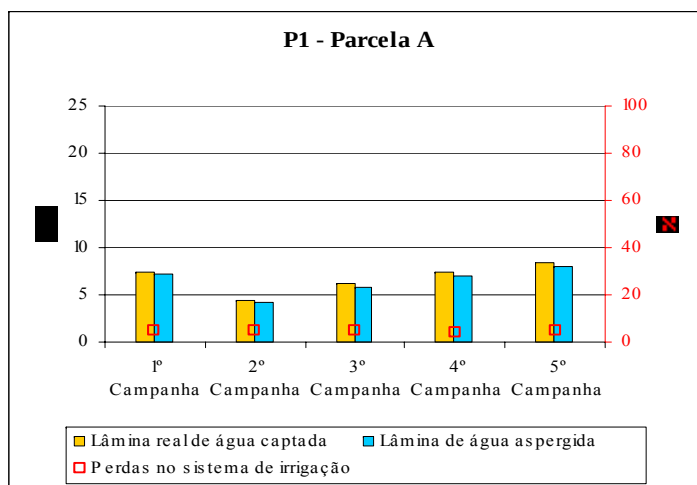


Figura 7.21 – Histograma da perda hídrica nos sistemas de irrigação, propriedade P1, Parcelas A e B.

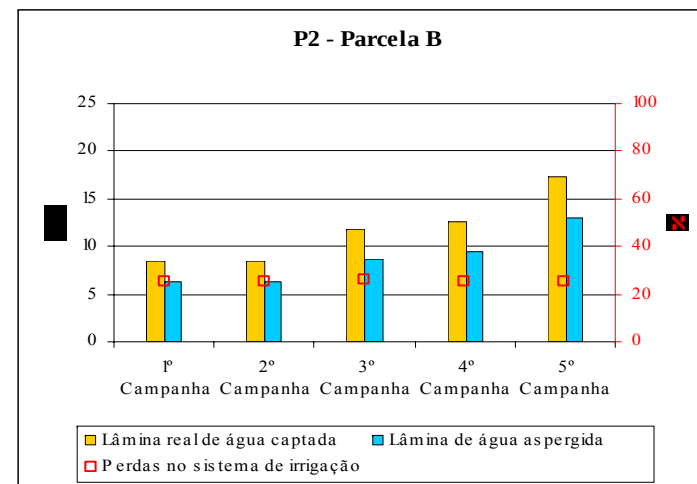
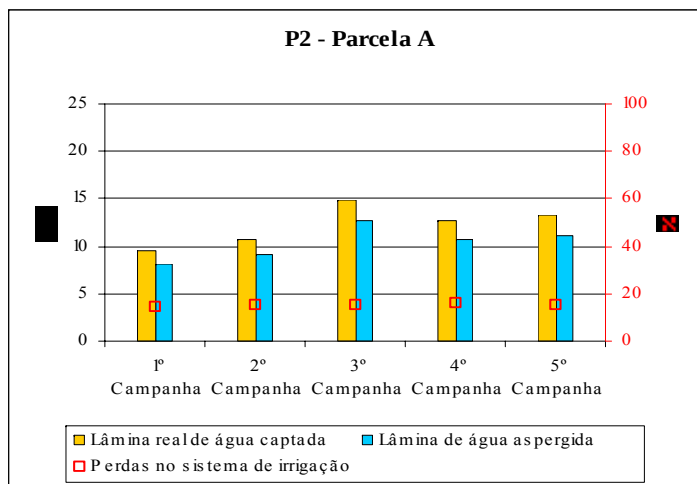


Figura 7.22 – Histograma da perda hídrica nos sistemas de irrigação, propriedade P2, Parcelas A e B.

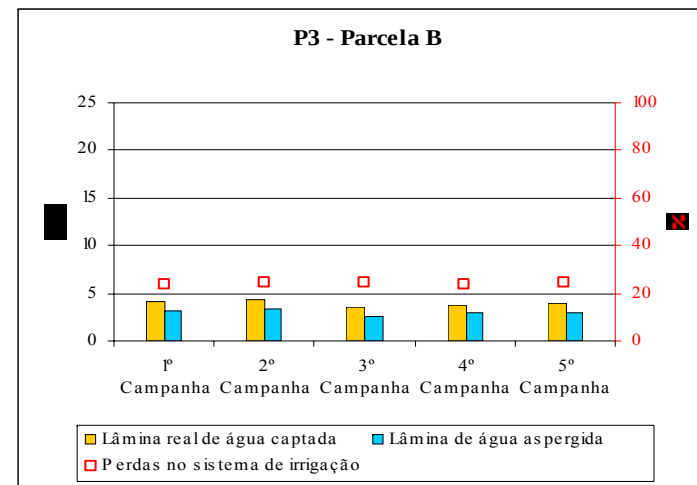
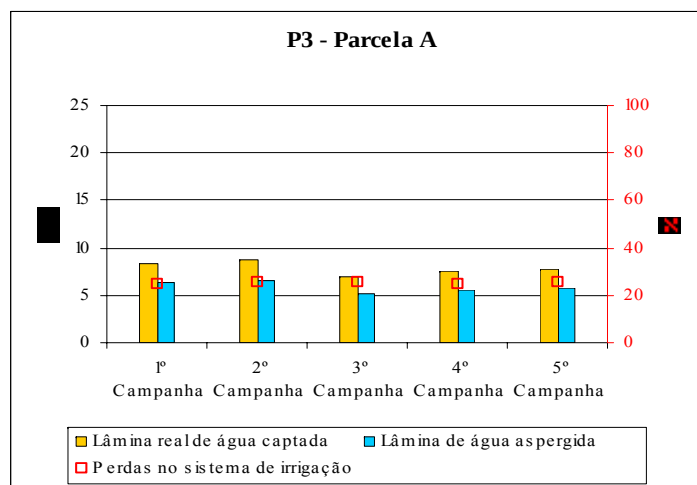


Figura 7.23 – Histograma da perda hídrica nos sistemas de irrigação, propriedade P3, Parcelas A e B.

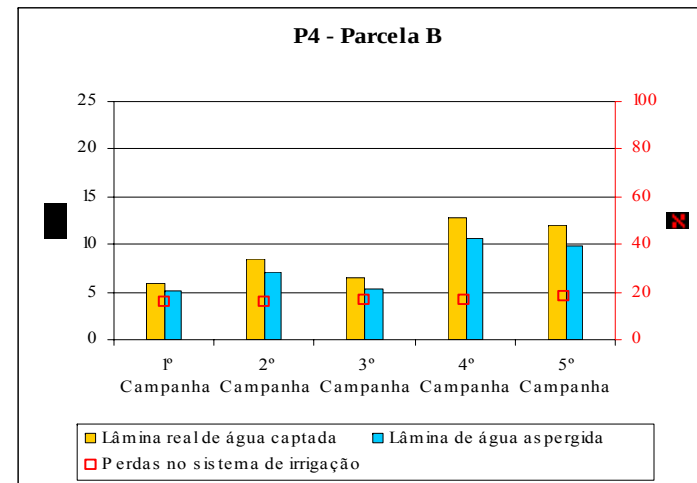
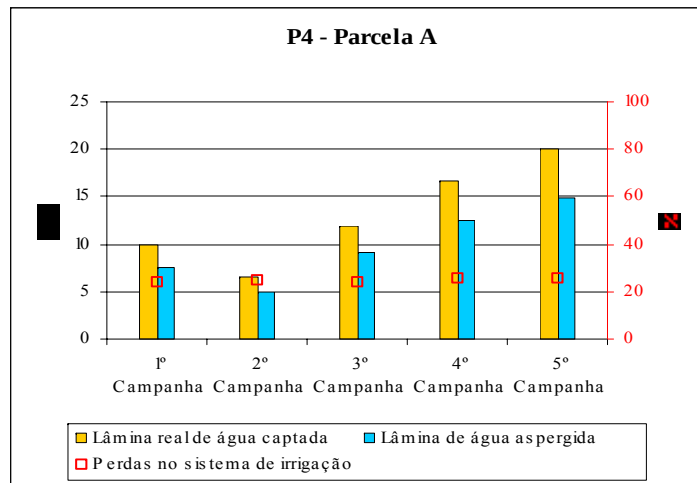


Figura 7.24 – Histograma da perda hídrica nos sistemas de irrigação, propriedade P4, Parcelas A e B.

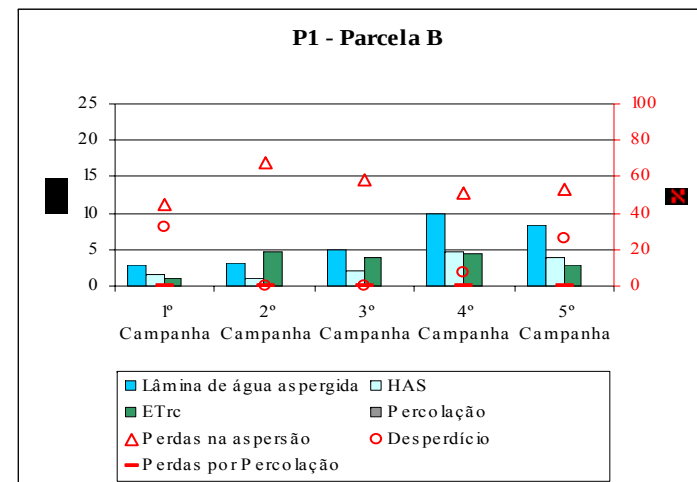
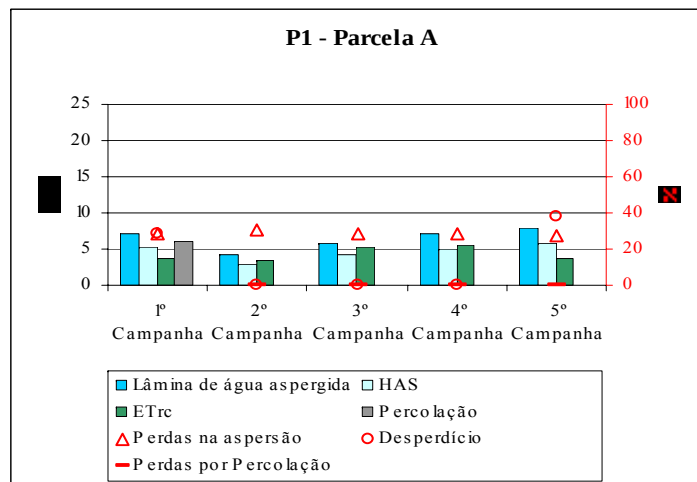
7.3.2.2 - Perda hídrica nas parcelas experimentais

A perda hídrica nas parcelas experimentais, de cada propriedade, foi determinada por meio da relação entre a lâmina de água aspergida, a lâmina de água efetiva, a interceptação, a evapotranspiração real da cultura e a percolação, em cada campanha intensiva de monitoramento do fluxo de água na zona não saturada do solo.

O cálculo da lâmina de água efetiva foi realizado pelo produto entre a lâmina de água efetiva por unidade de tempo, por linha de aspersores e por canhão hidráulico (Tabela 7.12), e a duração de cada evento de irrigação (Tabela 7.13, coluna T). Para a propriedade P3, Parcelas A e B, a lâmina de água efetiva foi assumida como sendo igual ao valor da lâmina de água aspergida, pois ocorreram erros na realização do ensaio.

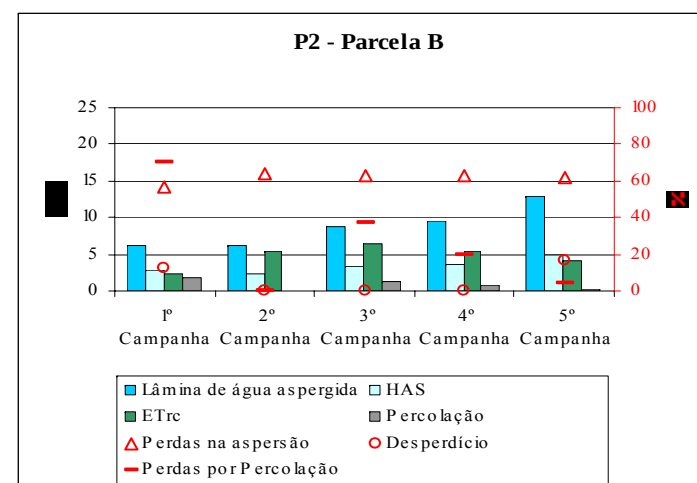
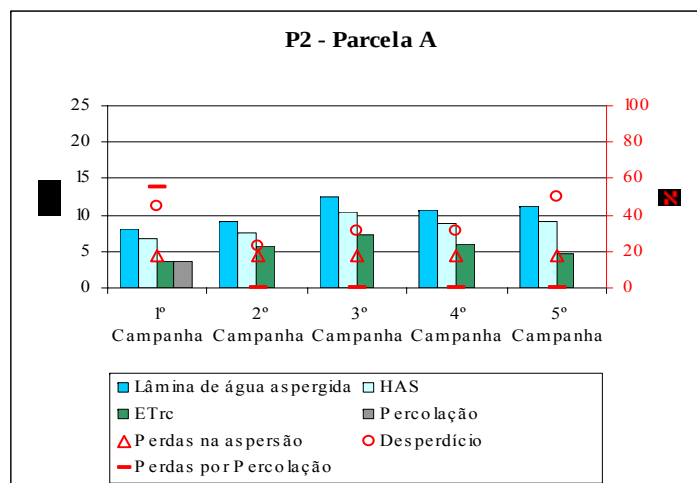
Os valores de interceptação, da evapotranspiração real da cultura (ET_{rc}) e da percolação apresentados nas Tabelas 7.13, 7.14 e 7.15 foram estimados por fórmulas.

Nas Figuras 7.25, 7.26, 7.27 e 7.28 são apresentados os histogramas da lâmina de água aspergida, da lâmina de água efetiva, da interceptação, da evapotranspiração real da cultura (ET_{rc}) e da percolação para todas as campanhas intensivas de monitoramento do fluxo de água na zona não saturada do solo, em todas as parcelas experimentais. A diferença entre a lâmina de água aspergida, a lâmina de água efetiva e a interceptação representa, em lâmina, as perdas ocorridas na aspersão, seja por espalhamento, seja por evaporação. A diferença entre a lâmina de água efetiva, a interceptação e a evapotranspiração real da cultura representa, em lâmina, o desperdício (excesso) ocorrido na aplicação de água sobre as parcelas experimentais. Os valores das perdas hídricas na aspersão, do desperdício e das perdas hídricas por percolação, determinados por meio das Equações 5.10, 5.11 e 5.12, e expressos em porcentagem, estão relacionados com o eixo da direita (eixo vermelho).



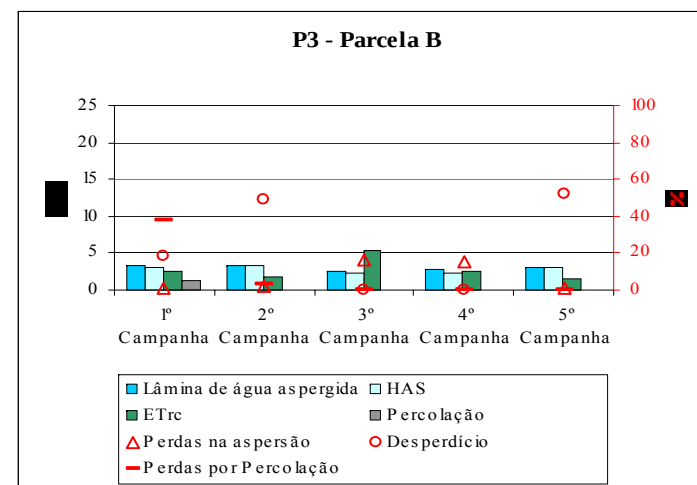
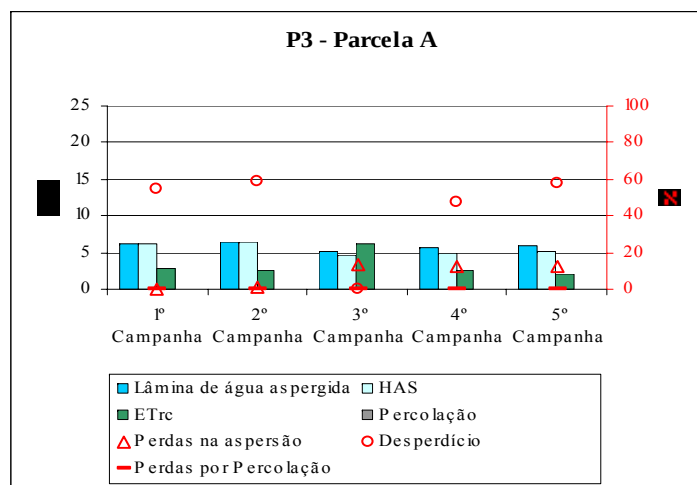
HAS – lâmina de água que atinge o solo e *ETrc* – evapotranspiração real da cultura.

Figura 7.25 – Histograma da perda hídrica nas parcelas experimentais, propriedade P1, Parcelas A e B.



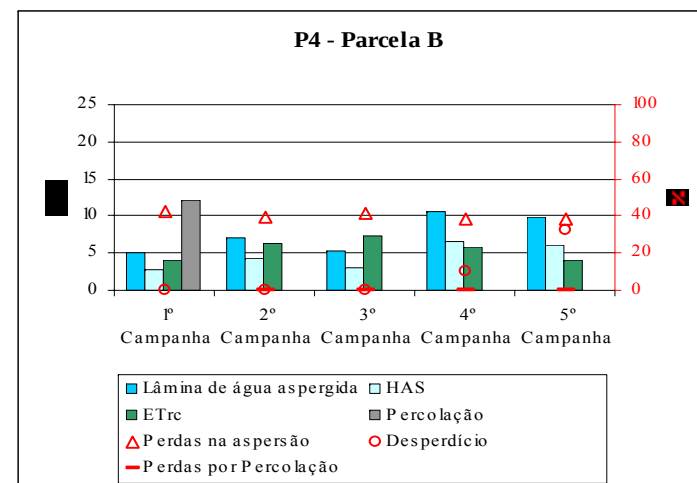
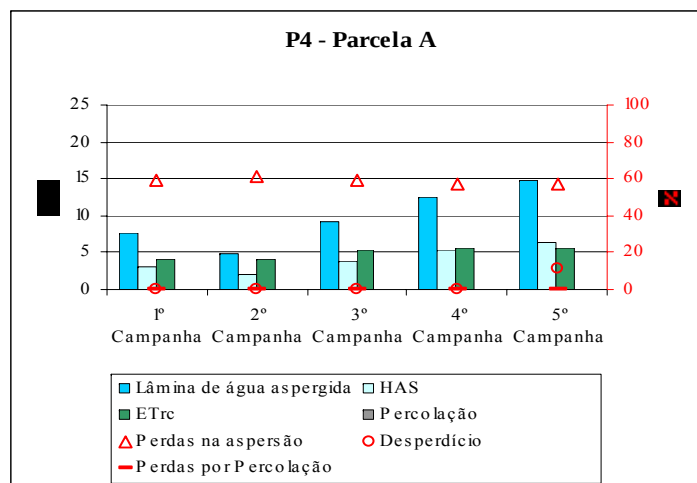
HAS – lâmina de água que atinge o solo e *ETrc* – evapotranspiração real da cultura.

Figura 7.26 – Histograma da perda hídrica nas parcelas experimentais, propriedade P2, Parcelas A e B.



HAS – lâmina de água que atinge o solo e *ETrc* – evapotranspiração real da cultura.

Figura 7.27 – Histograma da perda hídrica nas parcelas experimentais, propriedade P3, Parcelas A e B.



HAS – lâmina de água que atinge o solo e *ETrc* – evapotranspiração real da cultura.

Figura 7.28 – Histograma da perda hídrica nas parcelas experimentais, propriedade P4, Parcelas A e B.

Nas perdas ocorridas na aspersão, foi observado que a maior perda, de 68%, ocorreu na propriedade P1, Parcela B, 2º campanha intensiva. Na média essa perda foi da ordem de 35%, considerando-se todas as propriedades. Dessa forma, a cada 1,0mm de água aspergida, 0,35mm não contribuem com as parcelas experimentais.

No desperdício ocorrido na aplicação de água sobre as parcelas experimentais, foi verificado que o maior desperdício, de 59%, ocorreu na propriedade P3, Parcela A, 2º campanha intensiva. Na média esse desperdício foi da ordem 18%, considerando-se todas as propriedades. Dessa forma, a cada 1,0mm de água aspergida, 0,18mm são aplicados em excesso. Em 45% das campanhas intensivas de monitoramento do fluxo de água na zona não saturada do solo, a evapotranspiração real da cultura foi maior do que a diferença entre a lâmina de água efetiva e a interceptação.

No cálculo das perdas por percolação, nas duas campanhas em que os valores da percolação foram maiores (19 e 315%) do que a diferença entre os valores da lâmina de água efetiva e da interceptação, as perdas foram assumidas como 100%. Na média, as perdas ocorridas por percolação foram de 11%, representando uma perda, em lâmina, de 0,11mm para cada 1,0mm de água que atinge o solo.

Desconsiderando a lâmina de água excedente aplicada em cada evento de irrigação, a eficiência dos aspersores em relação à aplicação da água sobre o solo (Efa), determinada pela diferença entre a porcentagem total da lâmina de água aspergida (100%) e as perdas ocorridas na aspersão (35%) foi, na média, de 65%. Uma das formas de melhorar essa eficiência e diminuir as perdas ocorridas na aspersão é promover alterações no sistema de irrigação, tais como: alteração na pressão de serviço dos aspersores e canhões hidráulicos; alteração nos diâmetros dos bocais; utilização de aspersores setoriais; e alteração na altura do tubo de elevação.

7.3.2.3 - Perda hídrica total

A contabilização da perda hídrica total foi obtida por meio da Equação 5.13. Na média, essa perda foi de 52%, sendo o valor muito elevado, pois a cada 1,0mm de água captada – seja de rio, seja de reservatório, seja de poço artiano – para o sistema de irrigação, 0,52mm são perdidos em todo o processo da irrigação.

Na Tabela 7.16 a lâmina real de água captada; a lâmina de água efetiva, menos a interceptação, menos a percolação; e a perda hídrica total são apresentadas para cada campanha intensiva de monitoramento do fluxo de água na zona não saturada do solo, para cada parcela experimental, de cada propriedade.

Tabela 7.16 – Perda hídrica total em cada campanha intensiva, para cada parcela experimental, de cada propriedade: Lâmina real de água captada (H_{RC}); Lâmina de água efetiva – interceptação – percolação (H_S); e perda hídrica total (P_{HT}).

Propriedades / Campanhas	P1						P2					
	Parcela A			Parcela B			Parcela A			Parcela B		
	H_{RC} (mm)	H_S (mm)	P_{HT} (%)	H_{RC} (mm)	H_S (mm)	P_{HT} (%)	H_{RC} (mm)	H_S (mm)	P_{HT} (%)	H_{RC} (mm)	H_S (mm)	P_{HT} (%)
1º	7,5	0,00	100	2,9	1,6	44	9,6	3,0	69	8,4	0,81	90
2º	4,4	2,9	34	3,0	1,0	68	11	7,5	30	8,4	2,3	73
3º	6,2	4,2	32	4,9	2,0	59	15	10	30	12	2,1	82
4º	7,3	5,0	31	9,6	4,8	51	13	8,8	30	13	2,9	77
5º	8,4	5,8	31	8,4	3,9	53	13	9,2	30	17	4,7	73

Propriedades / Campanhas	P3						P4					
	Parcela A			Parcela B			Parcela A			Parcela B		
	H_{RC} (mm)	H_S (mm)	P_{HT} (%)	H_{RC} (mm)	H_S (mm)	P_{HT} (%)	H_{RC} (mm)	H_S (mm)	P_{HT} (%)	H_{RC} (mm)	H_S (mm)	P_{HT} (%)
1º	8,4	6,3	25	4,2	2,0	53	10	3,1	69	6,0	0,00	100
2º	8,7	6,4	26	4,4	3,1	28	6,5	1,9	71	8,4	4,3	49
3º	7,0	4,5	35	3,5	2,2	36	12	3,8	69	6,4	3,1	51
4º	7,5	4,9	34	3,7	2,4	35	17	5,3	68	13	6,5	49
5º	7,8	5,1	35	3,9	3,0	25	20	6,5	68	12	6,0	50

Trabalhando com o valor médio da lâmina real de água captada, com o turno de rega médio e com a duração média do evento de irrigação, é possível quantificar a lâmina real de água captada e a lâmina total de água perdida, para cada m² de área irrigada, na bacia do Descoberto, no período da seca, para 2004. O período da seca para o DF compreendeu o período entre o mês de maio e o primeiro decênio do mês de outubro. O único evento de precipitação, ocorrido nesse período, foi no dia 18/05/2004, sendo o mesmo desconsiderado para o cálculo do balanço hídrico total.

Na Tabela 7.17 são apresentados os valores da lâmina real de água captada, da lâmina total de água perdida e da lâmina total de água desperdiçada, para cada m² de área irrigada, na bacia do Descoberto, no período da seca, no ano de 2004. O número de dias para o período da seca foi de 164 dias; o turno de rega médio foi de 39 horas; a duração média da irrigação foi de 1,0 hora; a lâmina real média de água captada por unidade de tempo foi de 15mm/h; e, conforme descrito no item 7.3.2.2, o desperdício médio foi de 18%.

Tabela 7.17 – Lâmina real de água captada, lâmina total de água perdida e lâmina total de água desperdiçada, por m², na bacia do Descoberto, no período da seca, no ano de 2004.

	Lâmina real de água captada (mm)	Lâmina total de água perdida (mm)	Lâmina total de água desperdiçada (mm)
Período da seca – 2004	1514	787	273

É verificado, a partir dos dados da Tabela 7.17, que para cada m² de área irrigada na bacia do Descoberto, o volume de água captado para fins de irrigação, no período da seca, é de 1,5m³. Desse volume, apenas 0,45m³ é efetivamente utilizado, enquanto 0,79m³ é perdido e 0,27m³ é utilizado em excesso (desperdiçado).

8 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de estudar, por meio do monitoramento e da modelagem matemática do fluxo de água na zona não saturada do solo, o balanço hídrico e o consumo de água em práticas de agricultura irrigada, com estudo de casos na bacia do Descoberto. Para esse fim os seguintes procedimentos foram realizados: caracterização física dos tipos de solo utilizados para a prática agrícola na área de estudo; monitoramento do comportamento da umidade do solo; realização do balanço hídrico por medidas volumétricas e medidas de energia elétrica; e simulação do comportamento do fluxo de água na zona não saturada do solo.

Na determinação da curva de retenção de água no solo pelo processo da centrifugação a principal dificuldade encontrada foi a coleta de amostras indeformadas do solo. As principais vantagens do método são: a simplicidade do ensaio, o reduzido tempo do ensaio e o levantamento de outras propriedades físicas do solo, entre elas a capacidade de campo e o ponto de murcha.

Quando se trabalha com propriedades físicas do solo, em algumas situações, as análises de laboratório por si só são insuficientes, por mais que sofisticadas, para compreender certos comportamentos do solo, sendo necessárias observações de campo (visual ou tátil), que complementem as informações das análises de laboratório. Isso foi verificado na análise dos dados do coeficiente de permeabilidade do solo saturado, para a propriedade P2.

No monitoramento da frente de umidade no solo a coleta de dados por meio de campanhas intensivas não trouxe informações significativas ao conjunto de dados obtidos, pois como os solos das propriedades estudadas, em sua maioria, são argilosos, a água infiltrada não se movimenta com velocidade elevada dentro do solo, podendo as coletas ser em intervalos de tempo maiores.

Nas campanhas intensivas de monitoramento do fluxo de água na zona não saturada do solo foram observadas, por leituras efetuadas nos tensiômetros, a ocorrência do fluxo de água no sentido descendente em 10 das 40 campanhas realizadas; 5 delas ocorreram na 1ª campanha intensiva, devido provavelmente à água ainda armazenada no solo no período da chuva, uma vez que a 1ª campanha intensiva foi realizada no mês de julho, o mais próximo do fim desse período (abril).

As leituras obtidas nos umidímetros de bloco de gesso, embora não utilizadas no trabalho, mostraram que esse sensor é relativamente preciso, quando suas leituras foram comparadas com as dos tensiômetros. Essa afirmativa, só não é válida, quando as condições de umidade do solo estão próximas à saturação. Diferentemente do tensiômetro, e de outros equipamentos que se tem no mercado, o principal diferencial do umidímetro, é seu menor custo.

A lâmina real de água captada pelos sistemas de irrigação, para as parcelas experimentais, na média foi da ordem de 8,8mm/dia. A lâmina captada estimada por medição de corrente elétrica de alimentação do motor elétrico foi superestimada, na média, em 15% (10mm/dia). A utilização da potência nominal do motor elétrico ao invés da potência do motor elétrico calculada levou a uma superestimação ainda maior, na média, de 60% (14mm/dia).

Dos 8,8mm/dia de água captada, 17% são perdidos no sistema de irrigação, 35% são perdidos na aspersão, 18% são perdidos na aplicação em excesso e 11% são perdidos por percolação (perdas abaixo da zona radicular).

A eficiência dos aspersores em relação à aplicação da água sobre o solo, para os sistemas de irrigação monitorados na bacia do Descoberto, foi de 65% na média. Para que essa eficiência seja aumentada é recomendável que haja alterações no sistema de irrigação, tais como: alteração da pressão de serviço dos aspersores e canhões hidráulicos; alteração dos bocais; alteração do tubo de elevação; e utilização de aspersores setoriais.

Na perda hídrica total dos sistemas de irrigação, a lâmina real de água captada, foi de 1514mm; a lâmina total de água perdida, foi de 787mm; e a lâmina total de água desperdiçada (aplicada em excesso), foi de 273mm para cada m² de área irrigada, na bacia do Descoberto, no ano hidrológico de 2004. Os valores obtidos são representativos para o ano hidrológico, pois na bacia, a irrigação só é praticada no período da seca.

Uma das recomendações principais a serem feitas, de acordo com os dados analisados, é a substituição do sistema de irrigação por aspersão, praticado de forma extensiva na bacia do Descoberto, por outro sistema mais eficiente. Uma opção é a irrigação localizada, podendo ser a microaspersão ou o gotejamento. Caso a aspersão continue sendo a prática seguida na

bacia, os produtores têm de procurar diminuir as perdas, a começar pelas ocorridas no sistema de irrigação, que são significativas e fáceis de serem solucionadas.

Na substituição do sistema de irrigação, a análise comparativa entre os custos envolvidos e a vida útil dos equipamentos deve ser levada em consideração. O que se observa no mercado é que: no custo da implantação do sistema (preço/hectare) o sistema por gotejamento e por microaspersão são os mais caros, enquanto o sistema por aspersão convencional é o mais barato. Quando se avalia o custo operacional [energia + mão de obra (preço/hectare/ano)], a situação é contrária, o sistema por aspersão se torna mais caro, enquanto os sistemas por gotejamento e microaspersão, os mais baratos. Um dos pontos importantes no momento de decisão desse tipo de investimento, é a vida útil dos equipamentos que fazem parte do sistema de irrigação. Nos sistemas por aspersão convencional e por gotejamento a vida útil, na média, é de 5 anos. Já no sistema por microaspersão, a vida útil, na média, é de 10 anos. Nessa avaliação comparativa não foi considerado o custo da água, pois na bacia do Descoberto ainda não há a cobrança pelo seu uso.

Ao término do trabalho, a análise do delineamento experimental e dos resultados obtidos juntamente com as discussões permite sugerir para trabalhos futuros:

_ A promoção de campanhas de campo em um maior número de propriedades com uma maior frequência, porém não necessariamente intensivas, uma vez que, em solo argiloso, o intervalo de tempo entre coletas de dados pode ser maior.

_ A realização do balanço hídrico durante o período da chuva para saber como o volume de água armazenado no solo se comporta após o término desse período. A associação entre o balanço hídrico para o período da chuva e o balanço hídrico para o período da seca trará informações importantes no entendimento de todo o processo, permitindo validar ou não, algumas suposições feitas na análise dos resultados deste trabalho.

_ A associação dos resultados obtidos às ferramentas do geoprocessamento (espectroradiômetro, imagens de satélite tendo bandas que permitam por meio da temperatura de uma superfície estimar o teor de água etc) com o objetivo de estudar quantitativamente os resultados dos consumos na bacia ao longo do ano hidrológico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., Smith, M. (1998). "Crop Evapotranspiration – Guidelines for Computing Crop Water Requirements – FAO Irrigation and Drainage Paper 56". <http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm>. Acessado às 15h28min do dia 07/05/2005.
- Bacchi, O.O.S., Godoy, R., Fante Jr., L. *et al.* (1996). "Balanço hídrico em cultura de aveia forrageira de inverno na região de São Carlos – SP". *Scientia Agricola*, **53**(1), 172-178.
- Belmans, C., Wesseling, J.G., Feddes, R.A. (1983). "Simulation model of the water balance of a cropped soil: SWATRE". *Journal of hydrology*, **63**, 271-286.
- Bernardo, S. (1995). *Manual de Irrigação*. 6^o ed. – Viçosa : UFV, Impr. Univ., 625p.
- Blake, G.J. (1975). The interception process. *Prediction in catchment hydrology*. Australian Academy of Science.
- Boisvert, J., Dyer, J.A., Brewin, D. (1992). *The versatile soil moisture budget (VB) reference manual – VB4*. Research Branch, Agriculture Canada, Ottawa, Canada.
- Bouwer, H. (2002). "Integrated water management for the 21st century: problems and solutions". *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **128**(4), 193-202.
- Brooks, R.H. e Corey, C.T. (1964). "Hydraulic properties of porous media". *Hydrology Paper*, **3**, 27pp.
- Campos, R.F. (1998). *Eficiência de Diferentes Algoritmos em Elementos Finitos para Fluxo em Meio Saturado/Não Saturado*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília. Brasília, Brasil, 175p.
- Caputo, H.P. (1985). *Mecânica dos Solos e suas Aplicações*. 5^o ed. Ver. e Ampliada. – Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 217p.
- Cardoso, E. R. E Netto, O.M.C. (2000). Irrigação na bacia do Descoberto no Distrito Federal: Como avaliar o valor econômico da água?. Artigo 443. *I Simpósio de Recursos Hídricos do Centro-Oeste*. Brasília-DF. Meio eletrônico.
- Carvalho, M.A. (2003). *Sistema de Suporte à Decisão para Alocação de Água em Projetos de Irrigação*. Tese de Doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil, 193p.
- Celia, M.A., Bouloutas E. T., Zarba, R.L. (1990). "A general mass-conservative numerical solution for the unsaturated flow equation". *Water Resources Research*, **26**(7), 1483-1496.

- Chang, Y. e Corapcioglu, M.Y. (1997). "Effect of roots on water flow in unsaturated soils". *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **123**(3), 202-209.
- Christofidis, D. (2000). Os recursos hídricos: Abastecimento humano, industrial e irrigação no Distrito Federal. Artigo 315. *I Simpósio de Recursos Hídricos do Centro-Oeste*. Brasília-DF. Meio eletrônico.
- Clemente, R.S., Jong, R., Hayhoe, H.N., Reynolds, W.D., Hares, M. (1994). "Testing and comparison of three unsaturated soil water flow models". *Agricultural Water Management*, **25**, 135-152.
- CODEPLAN (1984). *Atlas do Distrito Federal*. 3v.:il.. Brasília-DF.
- Costa, M.H. (1994). *Evaporação e Evapotranspiração*. Caderno Didático nº 16. Engenharia na Agricultura. Departamento de Engenharia Agrícola/UFV, 20p.
- Elmaloglou, S. (1980). *Effects des Stratifications sur les Transferts de Matieres Dans les Sols*. Tese de Doutorado. Institut National Polytechnique De Grenoble. Canada.
- Elmaloglou, S. e Malamos, N. (2000). "Simulation of soil moisture content of a prairie field with SWAP93". *Agricultural Water Management*, **43**, 139-149.
- English, M.J., M.ASCE; Slomon, K.H., M.ASCE; Hoffman, G.J. (2002). "A paradigm shift in irrigation management". *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, **128**(5), 267-277.
- Faria, R.T. e Madramootoo, C.A. (1996). "Simulation of soil moisture profiles for wheat in Brazil". *Agricultural Water Management*, **31**, 35-49.
- Freeze, R.A. (1978). "Mathematical Models of Hillslope Hydrology". In: *Hillslope Hydrology*. Kirkby, M.J. (edit.). Wiley, Chichester, 177-225.
- Gardner, W.H. (1986). "Water Content". In: *Methods of Soil Analysis*. Klute, A. (edit.). – 2º.ed. Madison, Wisconsin, Estados Unidos, 493-544.
- Gomes, H.P. (1999). *Engenharia de irrigação: hidráulica dos sistemas pressurizados, aspersão e gotejamento*. 3º ed. – Paraíba : Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande, 412p.
- Guia de Brasília (2004). "Belo, o cerrado intriga e surpreende o visitante". http://www.guiadebrasil.com.br/cidade/dadostxtaspectos_fis/cerrado.html. Acessado 10:00 do dia 07/12/2004.
- Hayhoe, H.N. e De Jong, R. (1982). *Computer simulation model of soil water movement and uptake by plants roots*. Research Branch, Agriculture Canada, Ottawa, Canada.
- Hillel, D. (1998). *Environmental Soil Physics*. San Diego: Academic Press, 757p.

- Jain, A.K. e Murty, V.V.N. (1985). "Simulating of soil moisture profiles for scheduling of irrigations". *Agricultural Water Management*, **10**, 175-181.
- Johnson Division (1978). *Água Subterrânea e Poços Tubulares*. 3º ed. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. São Paulo, 482p.
- Klar, A. E. (1984). *A Água no Sistema Solo-Planta-Atmosfera* / Antônio Evaldo Klar. São Paulo: Nobel, 385p.
- Koide, S. (1990). *Hillslope Subsurface Flow Study by Finite Element Method*. Tese de Doutorado. Universidade de Londres. Londres, Inglaterra, 306p.
- Koide, S. (1998). "Equações simplificadas para a utilização da fórmula universal de perda de carga em tubulações". *Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental*, **3**(3 e 4), 92-96.
- Lacroix, M., Wang, H.Q., Blavoux, B. (1996). "Water-table modelling to estimate irrigation losses: application to the Lower Durance, France". *Agricultural Water Management*, **30**, 283-300.
- Leib, B.G., Jabro, J.D., Matthews, G.R. (2003). "Field evaluation and performance comparison of soil moisture sensors". *Soil Science*, **168**(6), 396-408.
- Letha, J., Elango, K. (1994). "Simulation of mildly unsaturated flow". *Journal of Hydrology*, **154**, 1-17.
- Lima, J.E.F.W., Ferreira, R.S.A., Christofidis, D. (1999). *Atlas Hidrológico Brasileiro – versão 1.0*. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Brasília-DF. Meio eletrônico.
- Marciano, C.R., Moraes, S.O., Saad, A.M., Libardi, P.L. (1998). "Variabilidade do potencial mátrico e do conteúdo de água no solo em experimento de manejo de irrigação". *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, **22**(4), 563-571.
- Medeiros, A.T. (2002). *Estimativa da Evapotranspiração de Referência a partir da Equação de Penman-Monteith, de Medidas Lisimétricas e de Equações Empíricas em Paraipaba, CE*. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil, 103p.
- Morgan, K.T., Parsons, L.R., Wheaton, T.A. (2001). "Comparison of laboratory and field-derived soil water retention curves for a fine sand soil using tensiometric, resistance and capacitances methods". *Plant and Soil*, **234**, 153-157.
- Mualem, Y. (1976). "A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media". *Water Resource Research*, **12**, 513-522.

- Mualem, Y. (1986). "Hydraulic conductivity of unsaturated soils: prediction and formulas". In: *Methods of Soil Analysis*. Klute, A. (edit.). 2º ed. Agronomy; nº 9. Madison, Wisconsin, Estados Unidos, 729-823.
- Neuman, S.P. (1973). "Saturated-unsaturated seepage by finite elements". *J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng.*, **99**, 2233-2250.
- Neuman, S.P., Feddes, R.A., Bresler, E. (1975). "Finite element analysis of two-dimensional flow in soils considering water uptake by roots: I - Theory". *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, **39**, 224-230.
- Oliveira, C.A.S. (1999). "Determinação da tensão de água em solo agrícola usando um sensor de dissipação de calor". *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, **34**(8), 1417-1425.
- Palmier, L.R. (1995). *Hydrological Aspects of Landfill Waste Management – A Case Study of the Drigg low-Level Radioactive Waste Repository*. Tese de Doutorado. Universidade de Londres. Londres, Inglaterra, 410p.
- Penman, H.L. (1948). "Natural evaporating from open water, bare soil and grass". *Proceedings of the Royal Society of London*, **193**, 120-146.
- Porto, R.M. (1999). *Hidráulica Básica*. 2º ed. São Carlos : EESC-USP, 540p.
- Prevedello, C.L. (1996). *Física dos Solos com Problemas Resolvidos*. Curitiba, 446p.
- Rathfelder, K. e Abriola, L.M. (1994). "Mass conservative numerical solutions of the head-based Richards equation". *Water Resources Research*, **30**(9), 2579-2586.
- Rawls, W.J. e Brakensiek, D.L. (1985). "Prediction of soil water properties for hydrologic modeling". Proc. Sump. Watershed Management in the Eighties, Colorado, *Am. Soc. Civ. Eng.*, New York, 293-299.
- Rawls, W.J., Ahuja, L.R., Brakensiek, D.L., Shirmohammadi, A. (1992). "Infiltration and soil water movement". In: *Handbook of Hydrology*. Maidment, D.R. (edit.). McGraw-Hill. New York, Estados Unidos, 5.1.
- Ribeiro, M.O., Koide, S., Souza, M.A.A. (2000). Estudo do quadro atual da qualidade da água superficial na bacia do rio Descoberto, no Distrito Federal. Artigo 431. *I Simpósio de Recursos Hídricos do Centro-Oeste*. Brasília-DF. Meio eletrônico.
- Sales, J.C. (1997). *Avaliação dos Coeficientes de Uniformidade de Distribuição e Perdas de Água por Aspersão Convencional*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará. Fortaleza, Brasil, 68p.
- Sarkar, S. e Kar, S. (1995). "Comparison between simulated and measured profile water distribution". *Agricultural Water Management*, **27**, 341-350.

- Setti, A.A. (2001). *Introdução ao Gerenciamento de Recursos Hídricos* / Arnaudo Augusto Setti...[et al.]. 2º ed. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica; Agencia Nacional de Águas, 328p.
- Shiklomanov, I.A. (1999). “Table 18 – Dynamics of water use in the world over the kinds of economics activities (km³/year)”. http://webworld.unesco.org/water/ihp/db/shiklomanov/part'3/HTML/Tb_18.html. Acessado às 11h00min do dia 27/04/2004.
- Silveira, A.L., Louzada J.A., Beltrame, L.F.S. (2001). “Infiltração e Armazenamento no Solo”. In: *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. Tucci, C.E.M. (org.). – 2º ed.; 2.reimpr. – Porto Alegre : Ed. Universidade/UFRGS : ABRH, 335-365.
- Souza, R.O.R.M. (2001). *Desenvolvimento e Avaliação de um Sistema de Irrigação Automatizado para Áreas Experimentais*. Dissertação de Mestrado. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil, 70p.
- Steinke, E.T. e Steinke, V.A. (2000). Fatores determinantes do período de seca no Distrito Federal. *Boletim Gaúcho de Geografia*, **26**, 244-254.
- Tabuada, M.A., Rego, Z.J.C., Vachaud, G., Pereira, L.S. (1995). “Two-dimensional infiltration under furrow irrigation: modelling, its validation, and applications”. *Agricultural Water Management*, **27**, 105-123.
- Tucci, C.E.M., (2001). “Interceptação”. In: *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. Tucci, C.E.M. (org.). – 2º ed.; 2.reimpr. – Porto Alegre : Ed. Universidade/UFRGS : ABRH, 243-249.
- Tucci, C.E.M., Beltrame, L.F.S. (2001). “Evaporação e Evapotranspiração”. In: *Hidrologia: Ciência e Aplicação*. Tucci, C.E.M. (org.). – 2º ed.; 2.reimpr. – Porto Alegre : Ed. Universidade/UFRGS : ABRH, 253-277.
- van Genuchten, M.Th. (1980). “A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil”. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, **44**, 892-898.
- Wagenet, R.J. e Hutson, J.L. (1989). *LEACHM: Leaching estimation and chemistry model*. Version 2. Center for Environmental Research, Cornell University, Ithaca and New York.
- Ward, R.C. e Robinson, M. (1990). *Principles of hydrology*. McGraw-Hill Book Company (UK) Ltd.

- Wesseling, J.G., Kabat, P., Van de Broek, B.J. *et al* (1989). *SWACROP – Instructions for input*. The Winand Staring Centre for Integrated Land, Soil and Water Research, Wageningen, Netherlands, 29pp.
- WHO (2003). *Right to Water*. World Health Organization, França, 44p.
- Wilderotter, O. (2003). “An adaptive numerical method for the Richards equation with root growth”. *Plant and Soil*, **251**, 255-267.

APÊNDICES

APÊNDICE A – TABELAS DE CONVERSÃO DE R.P.M. PARA TENSÃO MÉDIA NA AMOSTRA CENTRIFUGADA PARA OS TRÊS MODELOS DE CENTRÍFUGA

Para a conversão de R.P.M. para tensão média na amostra centrifugada é utilizada uma expressão, que é gerada a partir da relação entre a força que atua sobre a massa da água da amostra do solo (F_{ma}) e a força centrípeta (F_c) desempenhada pela centrífuga. Na Figura A.1 é apresentado um corte frontal do rotor da centrífuga, destacando o raio interno e externo, os quais são utilizados na expressão.

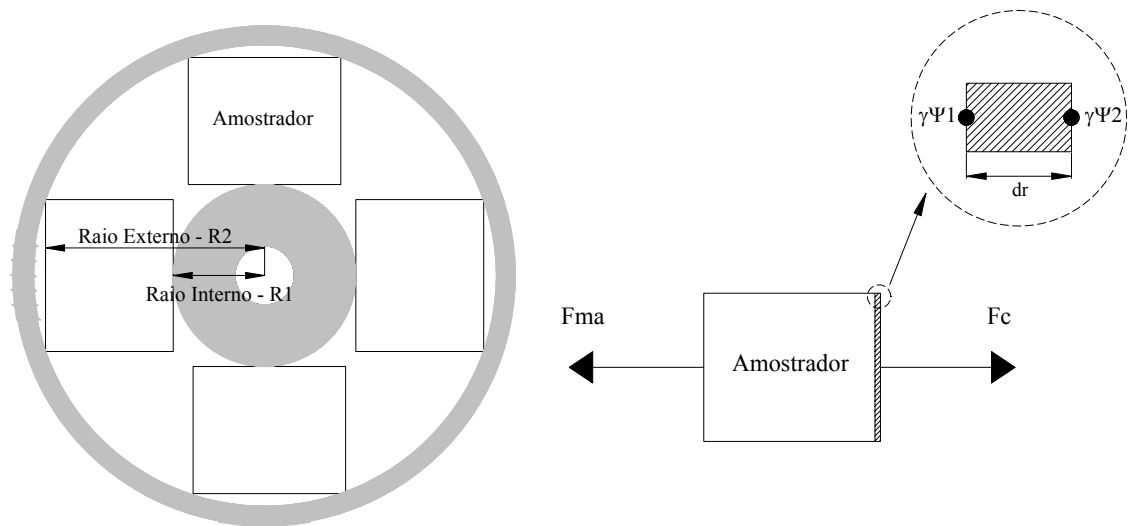


Figura A.1 – Corte frontal do rotor de uma centrífuga. Em destaque, o amostrador indicando F_{ma} e a F_c .

Quando a massa da água da amostra do solo atinge o equilíbrio com a velocidade angular da centrífuga a seguinte relação é verificada:

$$F_{ma} = F_c \quad (a.1)$$

$$\gamma \frac{\partial \psi}{\partial r} dr dA = m W_c^2 \therefore \rho g dV \frac{\partial \psi}{\partial r} = m W_c^2 \quad (a.2)$$

em que W_c é a aceleração centrípeta.

Como $\rho dV = m$, logo:

$$g \frac{\partial \psi}{\partial r} = W_c^2 \therefore \frac{\partial \psi}{\partial r} = \frac{W_c^2}{g} \quad (a.3)$$

Integrando a Equação a.3 obtém-se:

$$\psi = \frac{W_c^2}{2g} (r_1^2 - r_2^2) \quad (a.4)$$

Como $\Psi = hg$, logo a pressão matricial será:

$$h = \frac{W_c^2}{2g^2} (r_1^2 - r_2^2) \quad (a.5)$$

Tabela A.1 – Características das três centrífugas.

Características da Centrífuga	H-70	1400PF	DIK-3560
Raio interno do cilindro (cm)	4,10	3,20	4,10
Comprimento do cilindro (cm)	5,10	5,10	5,10
Raio externo do cilindro (cm)	9,20	8,30	9,20

Tabela A.2 – Conversão de R.P.M. para tensão média na amostra centrifugada – Centrífuga modelo H-70.

Rotação	Raio da Amostra		Espessura		Tensão Média na Camada		
	(cm)		da		Amostra		
(R.P.M)	(rad/s) x 10 ⁻¹	Interno	Externo	(cm)	(cmH ₂ O)	(atm) x 10 ⁻¹	(KPa)
195	204,20	3,20	8,30	5,10	10,50	0,10	1,03
335	350,81	3,20	8,30	5,10	30,99	0,30	3,04
475	497,42	3,20	8,30	5,10	62,31	0,60	6,11
615	644,03	3,20	8,30	5,10	104,45	1,01	10,24
1145	1199,04	3,20	8,30	5,10	362,06	3,50	35,51
1496	1566,61	3,20	8,30	5,10	618,07	5,98	60,61

Tabela A.2 – Conversão de R.P.M. para tensão média na amostra centrifugada –
Centrífuga modelo H-70 (Continuação).

Rotação		Raio da Amostra		Espessura	Tensão Média na Camada		
		(cm)		da			
				Amostra			
(R.P.M)	(rad/s) $\times 10^{-1}$	Interno	Externo	(cm)	(cmH ₂ O)	(atm) $\times 10^{-1}$	(KPa)
1760	1843,07	3,20	8,30	5,10	855,46	8,28	83,89
1935	2026,33	3,20	8,30	5,10	1034,03	10,01	101,40
2734	2863,04	3,20	8,30	5,10	2064,29	19,98	202,43
3869	4051,61	3,20	8,30	5,10	4134,00	40,01	405,40
4751	4975,24	3,20	8,30	5,10	6233,66	60,33	611,30
5455	5712,46	3,20	8,30	5,10	8217,93	79,53	805,89
6159	6449,69	3,20	8,30	5,10	10475,95	101,38	1027,32
6951	7279,07	3,20	8,30	5,10	13343,44	129,13	1308,52
7479	7831,99	3,20	8,30	5,10	15447,57	149,50	1514,86

Tabela A.3 – Conversão de R.P.M. para tensão média na amostra centrifugada –
Centrífuga modelo 1400PF.

Rotação		Raio da Amostra		Espessura	Tensão Média na Camada		
		(cm)		da			
				Amostra			
(R.P.M)	(rad/s) $\times 10^{-1}$	Interno	Externo	(cm)	(cmH ₂ O)	(atm) $\times 10^{-1}$	(KPa)
700	733,04	4,10	9,20	5,10	104,76	1,01	10,27
1300	1361,36	4,10	9,20	5,10	361,31	3,50	35,43
1700	1780,24	4,10	9,20	5,10	617,86	5,98	60,59
2000	2094,40	4,10	9,20	5,10	855,16	8,28	83,86
2200	2303,83	4,10	9,20	5,10	1034,75	10,01	101,47
3100	3246,31	4,10	9,20	5,10	2054,53	19,88	201,48
4400	4607,67	4,10	9,20	5,10	4139,00	40,06	405,89
5400	5654,87	4,10	9,20	5,10	6234,15	60,33	611,35
6200	6492,62	4,10	9,20	5,10	8218,13	79,53	805,91
7000	7330,38	4,10	9,20	5,10	10475,77	101,38	1027,30

Tabela A.3 – Conversão de R.P.M. para tensão média na amostra centrifugada –
Centrífuga modelo 1400PF (Continuação).

Rotação		Raio da Amostra (cm)		Espessura da Amostra (cm)	Tensão Média na Camada		
(R.P.M)	(rad/s) $\times 10^{-1}$	Interno	Externo	(cm)	(cmH ₂ O)	(atm) $\times 10^{-1}$	(KPa)
7900	8272,86	4,10	9,20	5,10	13342,70	129,13	1308,44
8500	8901,18	4,10	9,20	5,10	15446,41	149,49	1514,74

Tabela A.4 – Conversão de R.P.M. para tensão média na amostra centrifugada –
Centrífuga modelo DIK-3560.

Rotação		Raio da Amostra (cm)		Espessura da Amostra (cm)	Tensão Média na Camada		
(R.P.M)	(rad/s) $\times 10^{-1}$	Interno	Externo	(cm)	(cmH ₂ O)	(atm) $\times 10^{-1}$	(KPa)
220	230,38	4,10	9,20	5,10	10,35	0,10	1,01
380	397,94	4,10	9,20	5,10	30,87	0,30	3,03
540	565,49	4,10	9,20	5,10	62,34	0,60	6,11
700	733,04	4,10	9,20	5,10	104,76	1,01	10,27
1300	1361,36	4,10	9,20	5,10	361,31	3,50	35,43
1700	1780,24	4,10	9,20	5,10	617,86	5,98	60,59
2000	2094,40	4,10	9,20	5,10	855,16	8,28	83,86
2200	2303,83	4,10	9,20	5,10	1034,75	10,01	101,47
3100	3246,31	4,10	9,20	5,10	2054,53	19,88	201,48
4400	4607,67	4,10	9,20	5,10	4139,00	40,06	405,89
5400	5654,87	4,10	9,20	5,10	6234,15	60,33	611,35
6200	6492,62	4,10	9,20	5,10	8218,13	79,53	805,91
7000	7330,38	4,10	9,20	5,10	10475,77	101,38	1027,30
7900	8272,86	4,10	9,20	5,10	13342,70	129,13	1308,44
8500	8901,18	4,10	9,20	5,10	15446,41	149,49	1514,74

As Tabelas A.1, A.2, A.3 e A.4 foram fornecidas pelo Laboratório de Física do Solo da EMBRAPA/CPAC-DF.

APÊNDICE B – TABELAS COM DATAS E HORÁRIOS DE SECAGEM DAS AMOSTRAS DE SOLO, PARA A DETERMINAÇÃO DO TEOR DE UMIDADE DO SOLO

Tabela B.1 – Datas e horários de secagem das amostras de solo, para a determinação do teor de umidade do solo, 2004, P1.

Parcela A							
Amostra (cm)	10	20	30	40	50	90	200
Data da Secagem	18/11	17/11	17/11	17/11	18/11	18/11	18/11
Início da Secagem	12:50	11:00	11:00	11:00	12:50	13:40	13:40
Data do Fim da Secagem	19/11	18/11	18/11	18/11	19/11	19/11	19/11
Fim da Secagem	13:10	13:30	13:30	12:40	13:20	13:50	13:40

Parcela B							
Amostra (cm)	10	20	30	40	50	90	200
Data da Secagem	22/11	22/11	23/11	22/11	22/11	23/11	23/11
Início da Secagem	08:20	08:20	08:35	08:45	08:45	08:35	09:05
Data do Fim da Secagem	23/11	23/11	24/11	23/11	23/11	24/11	24/11
Fim da Secagem	08:25	08:25	08:35	09:00	09:00	08:35	09:05

Tabela B.2 – Datas e horários de secagem das amostras de solo, para a determinação do teor de umidade do solo, 2004, P2.

Parcela A							
Amostra (cm)	10	20	30	40	50	90	200
Data da Secagem	15/11	09/11	10/11	15/11	10/11	11/11	11/11
Início da Secagem	09:15	11:00	13:40	09:15	13:40	13:30	13:30
Data do Fim da Secagem	16/11	10/11	11/11	16/11	11/11	12/11	12/11
Fim da Secagem	09:15	13:00	13:40	09:15	13:40	13:30	13:30

Parcela B							
Amostra (cm)	10	20	30	40	50	90	200
Data da Secagem	16/11	15/11	15/11	17/11	16/11	16/11	16/11
Início da Secagem	10:15	09:15	09:15	11:00	10:15	10:15	10:15
Data do Fim da Secagem	17/11	16/11	16/11	18/11	17/11	17/11	17/11
Fim da Secagem	10:30	10:00	10:00	12:40	10:30	10:30	10:30

Tabela B.3 – Datas e horários de secagem das amostras de solo, para a determinação do teor de umidade do solo, 2004, P3.

Parcela A							
Amostra (cm)	10	20	30	40	50	90	200
Data da Secagem	10/08	10/08	02/09	01/09	02/08	03/08	31/08
Início da Secagem	09:45	10:40	14:15	11:45	11:00	15:00	09:00
Data do Fim da Secagem	11/08	11/08	03/09	02/09	03/08	04/08	01/09
Fim da Secagem	11:45	12:40	16:15	13:45	13:00	17:00	11:00

Parcela B							
Amostra (cm)	10	20	30	40	50	90	200
Data da Secagem	16/09	07/11	03/11	14/10	08/11	03/11	07/11
Início da Secagem	09:45	08:25	12:40	08:30	11:00	12:50	08:45
Data do Fim da Secagem	17/09	08/11	04/11	15/10	09/11	04/11	08/11
Fim da Secagem	11:45	10:25	14:40	10:30	13:00	14:50	10:45

Tabela B.4 – Datas e horários de secagem das amostras de solo, para a determinação do teor de umidade do solo, 2004, P4.

Parcela A							
Amostra (cm)	10	20	30	40	50	90	200
Data da Secagem	29/11	29/11	25/11	25/11	25/11	25/11	23/11
Início da Secagem	07:50	07:50	07:25	07:25	08:00	08:00	09:05
Data do Fim da Secagem	30/11	30/11	26/11	26/11	26/11	26/11	24/11
Fim da Secagem	07:50	07:50	07:35	07:35	08:00	08:00	09:05

Parcela B							
Amostra (cm)	10	20	30	40	50	90	200
Dia da Secagem	30/11	29/11	29/11	30/11	30/11	01/12	30/11
Início da Secagem	08:00	08:10	08:10	08:40	08:00	08:10	08:40
Data do Fim da Secagem	01/12	30/11	30/11	01/12	01/12	02/12	01/12
Fim da Secagem	08:00	08:30	08:30	08:40	08:00	08:10	08:40

A determinação do teor de umidade do solo não foi realizada para as profundidades a 0,70 e 1,50m. Isso só não ocorreu pois a instalação dos novos umidímetros de bloco de gesso foi efetuada após a realização da segunda campanha intensiva.

APÊNDICE C – DADOS RELACIONADOS AO ENSAIO DO LEVANTAMENTO DA UNIFORMIDADE DE APLICAÇÃO DA ÁGUA DOS ASPERSORES

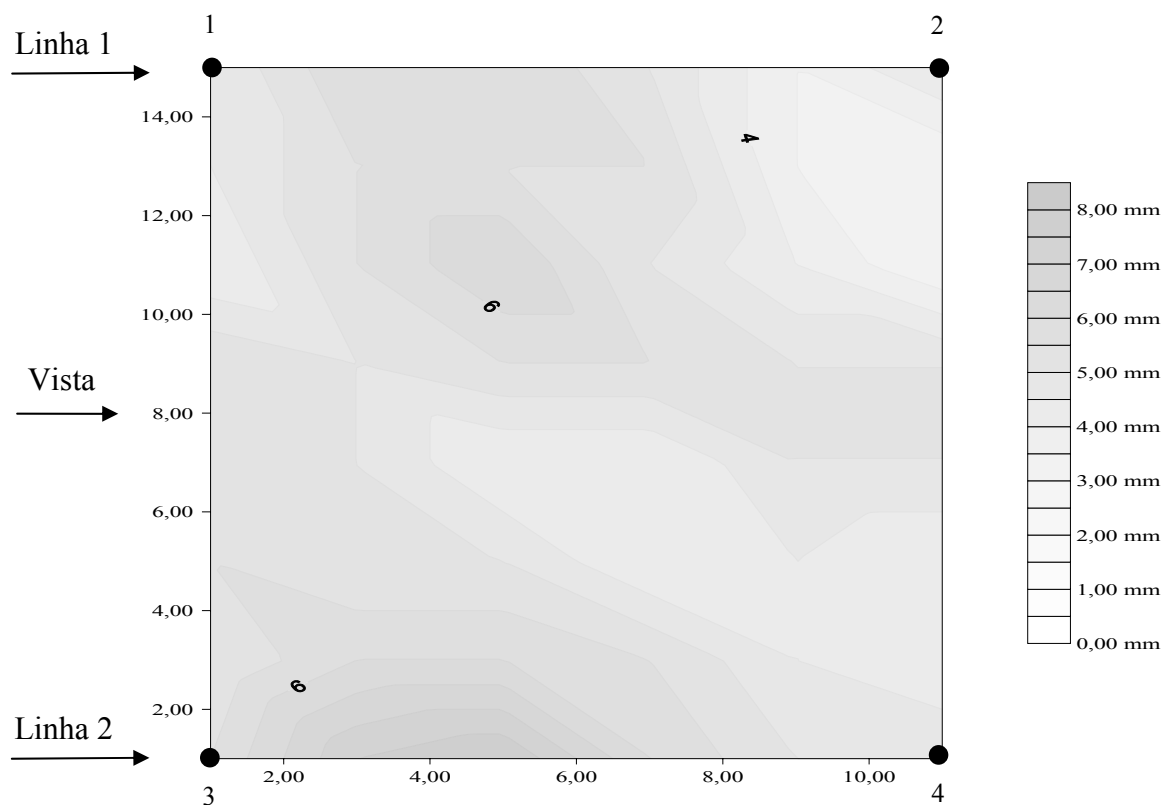


Figura C.1 – Distribuição da lâmina de água pelo sistema de irrigação, Parcela A, P1.

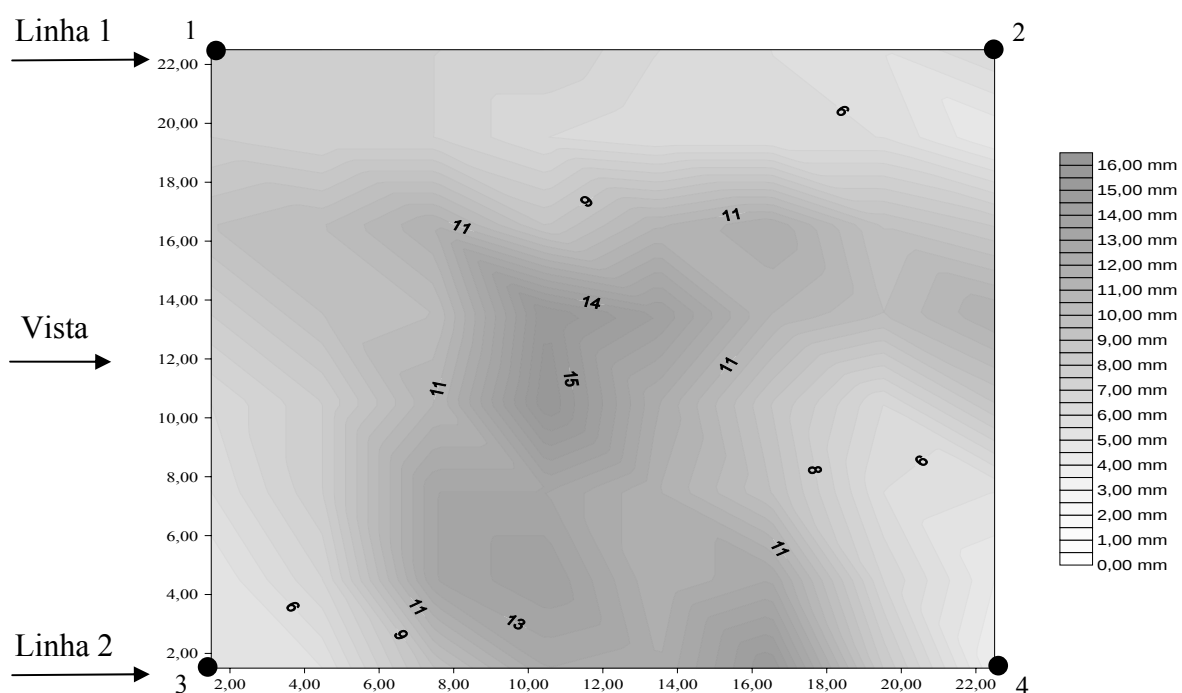


Figura C.2 – Distribuição da lâmina de água pelo sistema de irrigação, Parcela B, P1.

Tabela C.1 – Refinamento das malhas, P1.

	Malha entre os aspersores (m)
Parcela A	2,00 x 2,00
Parcela B	3,00 x 3,00

Tabela C.2 – Duração da irrigação, P1.

	Parcela A		Parcela B			
	Linha 1	Linha 2	CH 1	CH 2	CH 3	CH 4
Duração Parcial (minutos)	23	22	21	20	19	21
Duração Total (minutos)	45		81			

CH – canhão hidráulico.

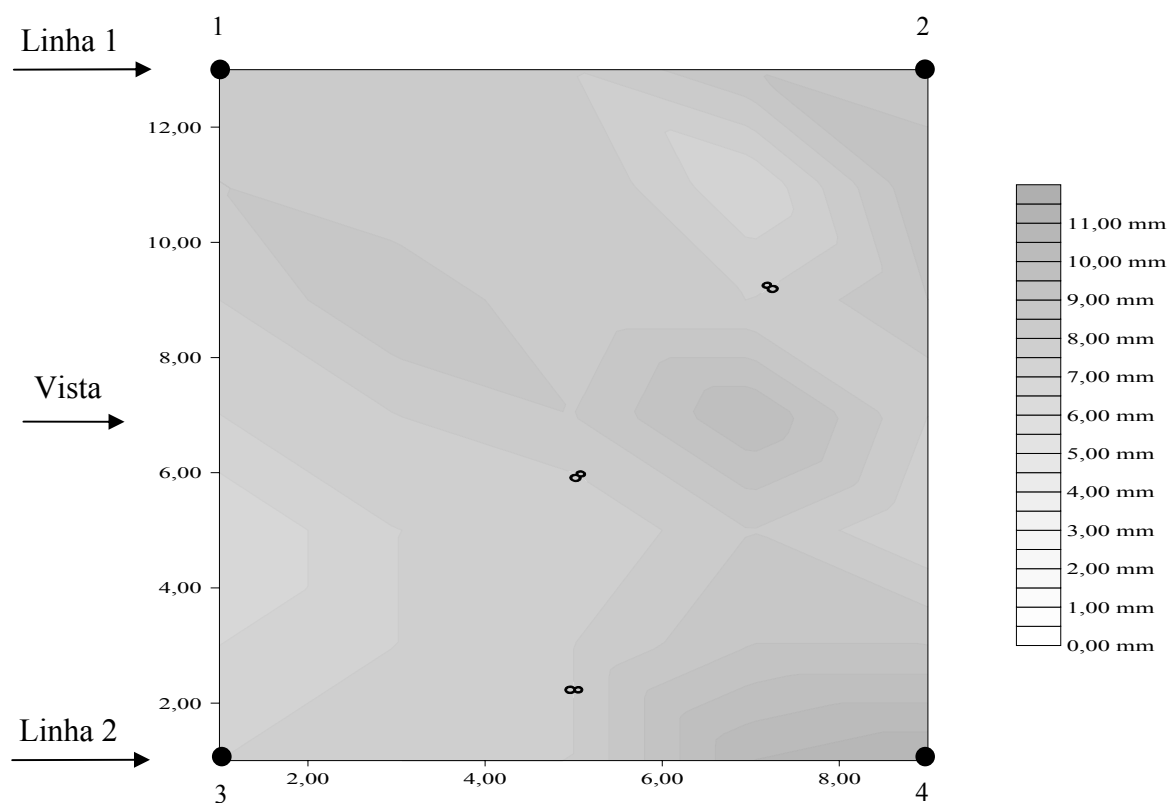


Figura C.3 – Distribuição da lâmina de água pelo sistema de irrigação, Parcela A, P2.

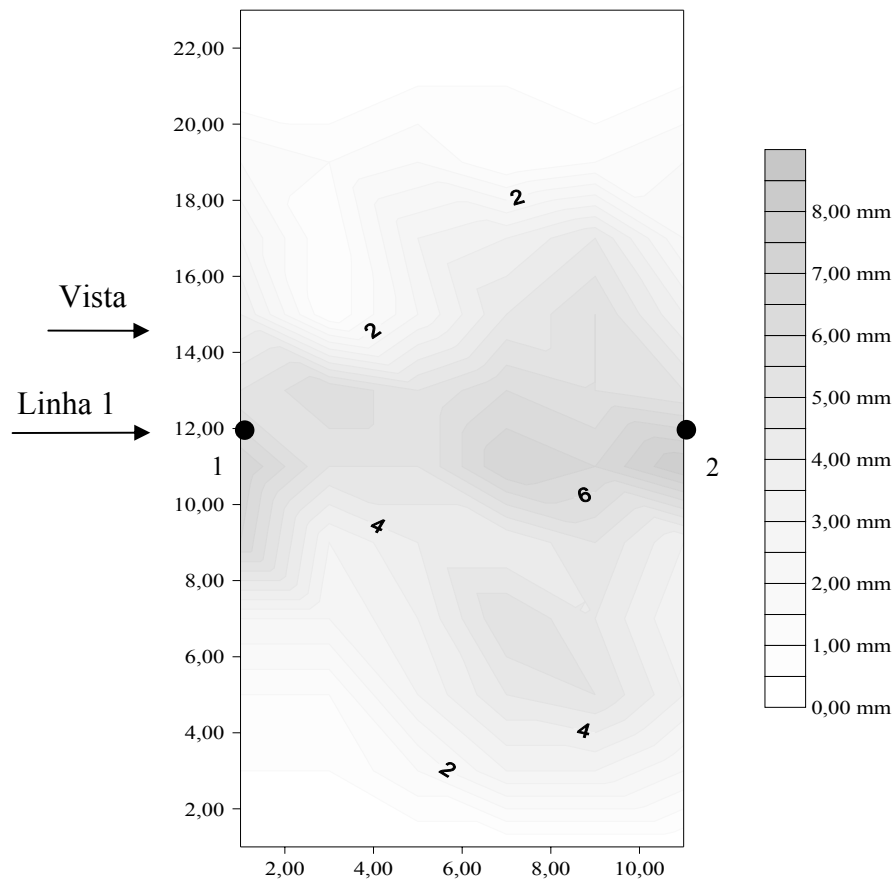


Figura C.4 – Distribuição da lâmina de água pelo sistema de irrigação, Parcela B, P2.

Tabela C.3 – Refinamento das malhas, P2.

	Malha entre os aspersores (m)
Parcela A	2,00 x 2,00
Parcela B	2,00 x 2,00

Tabela C.4 – Duração da irrigação, P2.

	Parcela A		Parcela B
	Linha 1	Linha 2	Linha 1
Duração Parcial (minutos)	28	26	21
Duração Total (minutos)	54		21

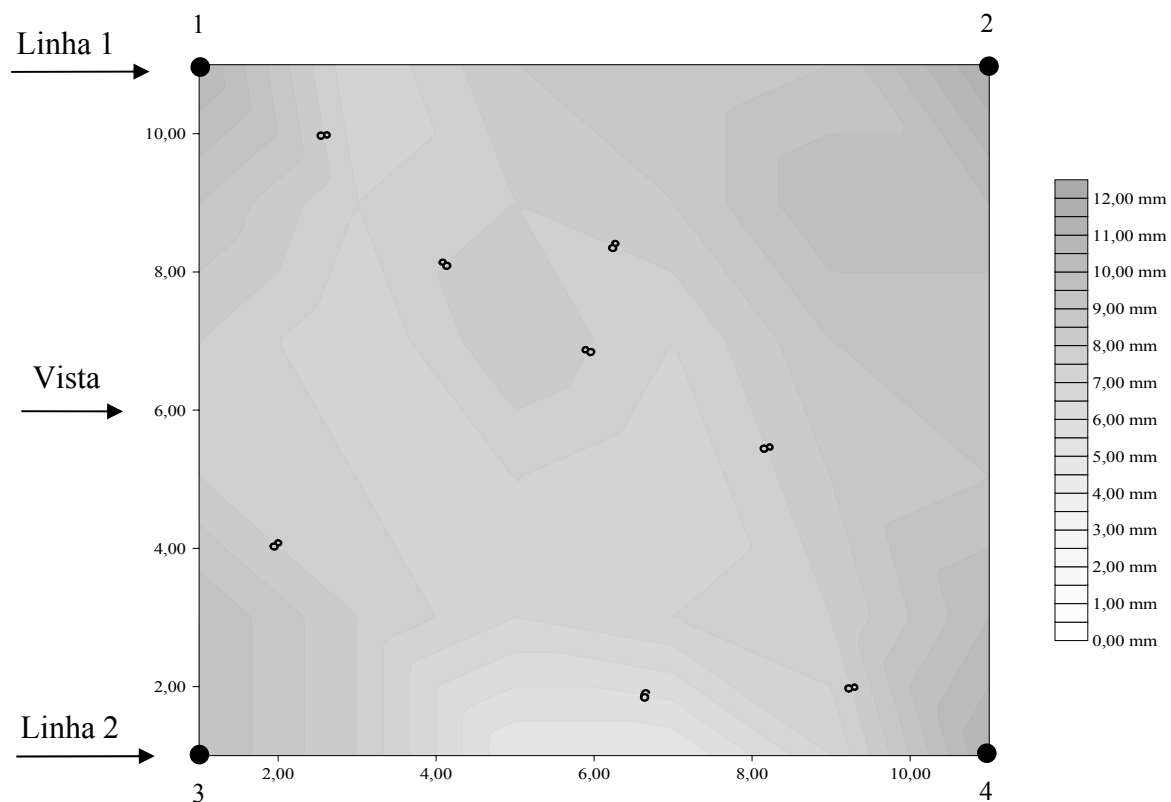


Figura C.5 – Distribuição da lâmina de água pelo sistema de irrigação, Parcela A, P3.

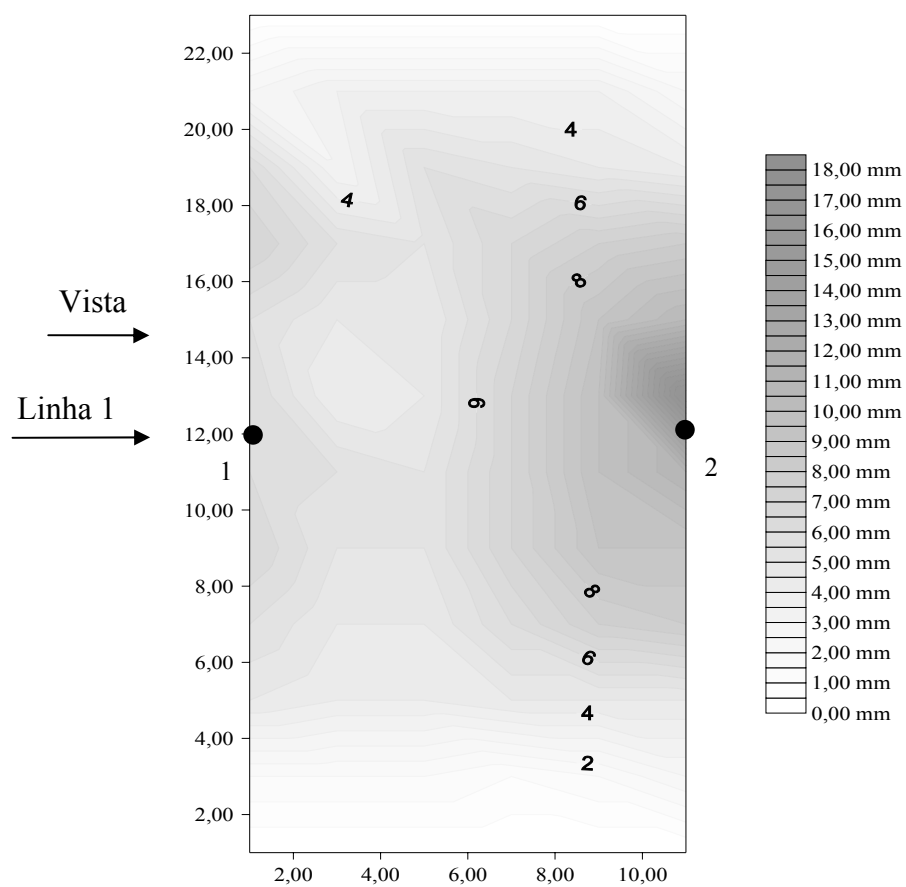


Figura C.6 – Distribuição da lâmina de água pelo sistema de irrigação, Parcela B, P3.

Tabela C.5 – Refinamento das malhas, P3.

	Malha entre os aspersores (m)
Parcela A	2,00 x 2,00
Parcela B	2,00 x 2,00

Tabela C.6 – Duração da irrigação, P3.

	Parcela A		Parcela B
	Linha 1	Linha 2	Linha 1
Duração Parcial (minutos)	31		31
Duração Total (minutos)	31		31

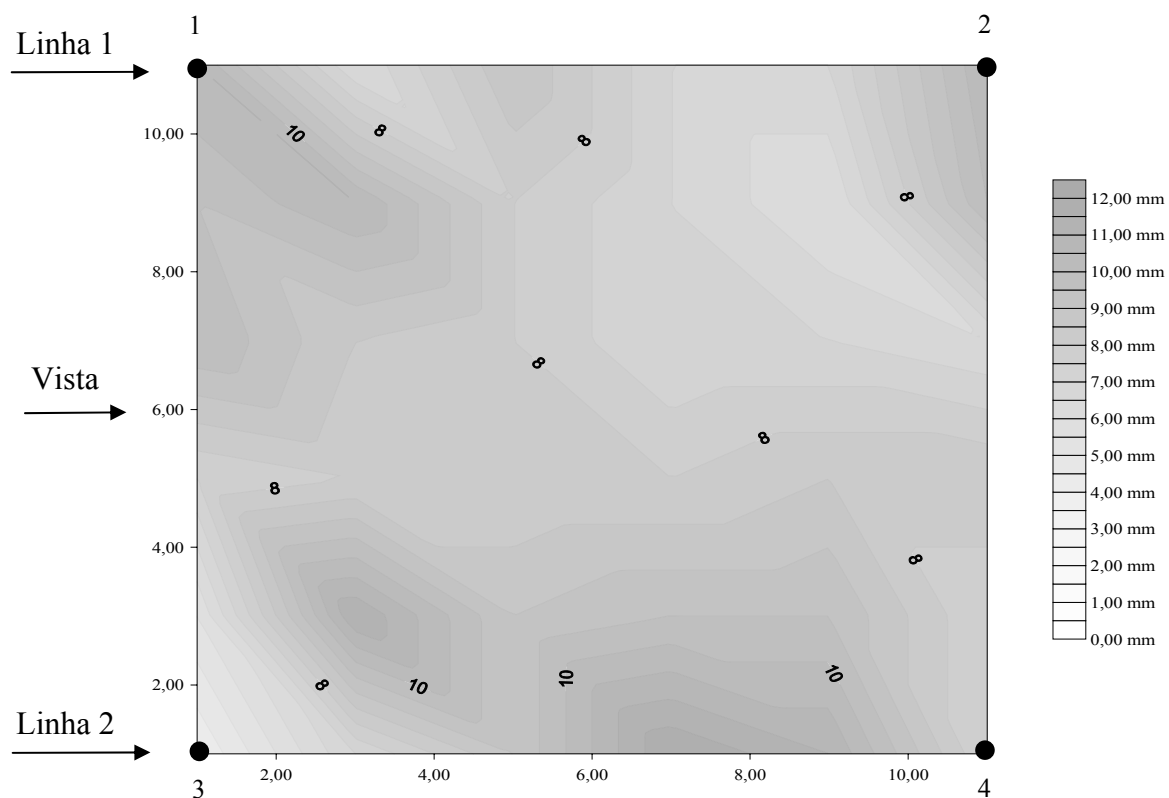


Figura C.7 – Distribuição da lâmina de água pelo sistema de irrigação, Parcela A, P4.

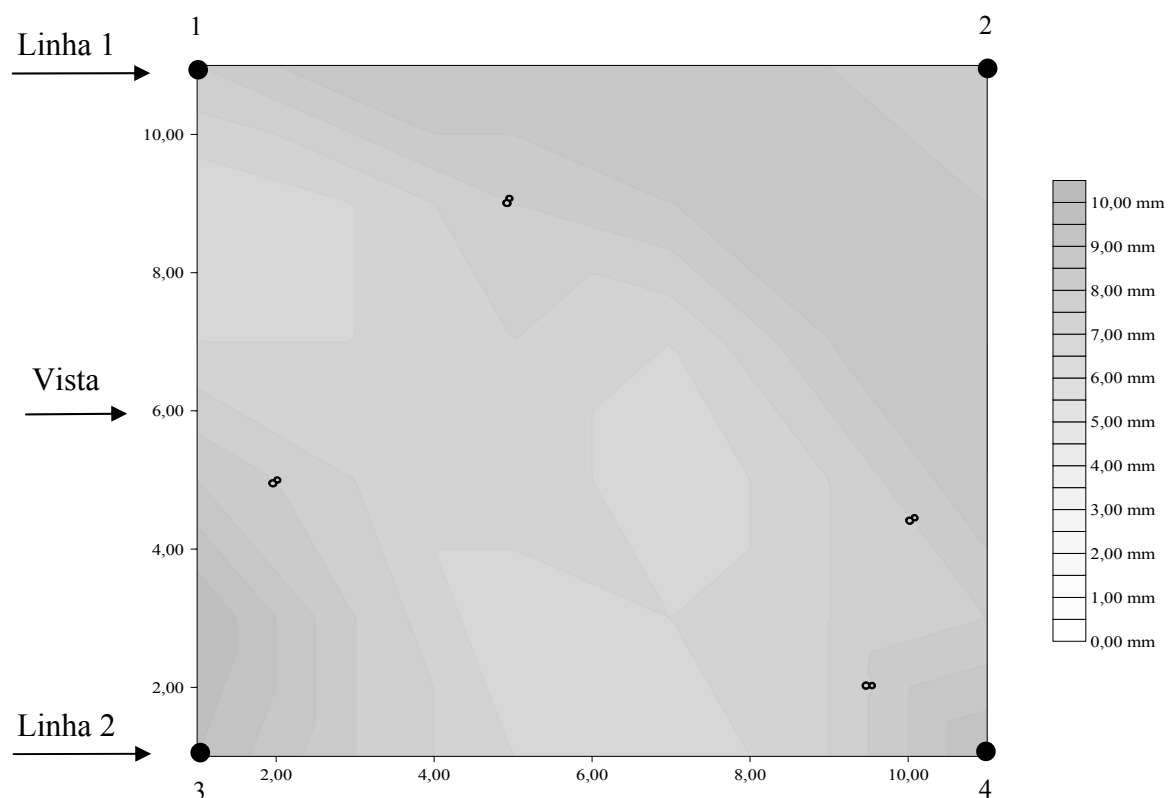


Figura C.8 – Distribuição da lâmina de água pelo sistema de irrigação, Parcela B, P4.

Tabela C.7 – Refinamento das malhas, P4.

	Malha entre os aspersores (m)
Parcela A	2,00 x 2,00
Parcela B	2,00 x 2,00

Tabela C.8 – Duração da irrigação, P4.

	Parcela A		Parcela B	
	Linha 1	Linha 2	Linha 1	Linha 2
Duração Parcial (minutos)	30	30	30	30
Duração Total (minutos)	60		60	

Obs: 1) Nas Figuras C.1 a C.8 o símbolo ● representa os aspersores que contribuiu com cada parcela experimental. No caso da Parcela B, da P1, o símbolo corresponde aos CH.

2) Os eixos nas Figuras C.1 a C.8 estão expressos em metro.

3) Nas Tabelas C.1, C.3, C.5 e C.7 o refinamento da malha corresponde à malha construída durante o ensaio do levantamento da uniformidade de aplicação da água dos aspersores.

De acordo com Bernardo (1995) o cálculo da uniformidade de aplicação da água dos aspersores pode ser realizada por várias equações, porém as três mais usadas são:

1º) Equação de Christiansen (*CUC*);

2º) Equação de uniformidade de distribuição recomendada pelo Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos (*CUD*);

3º) Equação de uniformidade, proposta por Wilcox e Swailes (*CUE*). Essa equação não será descrita, pois somente as duas primeiras serão utilizadas para fins de cálculo.

$$CUC = 100 \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - \bar{X}|}{n_p \bar{X}} \right), \text{ em porcentagem} \quad (c.1)$$

Em que, X_i – precipitação observada em cada copo pluviométrico, $\bar{X}$ – média das precipitações e n_p – número de copos pluviométricos.

$$CUD = 100 \frac{\bar{x}}{\bar{X}}, \text{ em porcentagem} \quad (c.2)$$

Em que, $\bar{x}$ – média dos 25% do total de copos pluviométricos, com as menores precipitações; e $\bar{X}$ – média das precipitações, considerando todos os pluviômetros.

Tabela C.9 – Valores do *CUC* e *CUD*, em porcentagem, para conjunto de aspersores utilizados em cada parcela experimental.

P1				P2			
Parcela A		Parcela B		Parcela A		Parcela B	
<i>CUC</i>	<i>CUD</i>	<i>CUC</i>	<i>CUD</i>	<i>CUC</i>	<i>CUD</i>	<i>CUC</i>	<i>CUD</i>
86	76	75	62	92	89	42	18

P3				P4			
Parcela A		Parcela B		Parcela A		Parcela B	
<i>CUC</i>	<i>CUD</i>	<i>CUC</i>	<i>CUD</i>	<i>CUC</i>	<i>CUD</i>	<i>CUC</i>	<i>CUD</i>
87	80	64	47	83	75	90	85

APÊNDICE D – VALORES DO K_c , DO K_s , DA ET_o E DA ET_{rc} , PARA CADA CAMPANHA INTENSIVA DE MONITORAMENTO DO FLUXO DE ÁGUA NA ZONA NÃO SATURADA DO SOLO

Tabela D.1 – Valores de K_c , de K_s , da ET_o , da ET_{rc} e da irrigação efetuada em cada campanha intensiva de monitoramento do fluxo de água na zona não saturada do solo, para cada parcela experimental, da P1.

Parcela A							
Datas das Campanhas Intensivas	ET_o (mm/dia)	K_c	Correção para o K_c	K_c + Correção	K_s	ET_{rc} (mm/dia)	H_{AS} (mm)
17/07/2004	4,31	1,05	0,04	1,09	0,52	5,67	5,10
19/08/2004	5,07	1,05	0,06	1,11	0,43	3,33	3,00
28/09/2004	6,46	1,05	0,06	1,11	0,49	4,67	4,20
30/09/2004	7,35	1,05	0,04	1,09	0,48	5,56	5,00
04/10/2004	5,17	1,05	0,02	1,07	0,45	6,33	5,80

H_{AS} – Lâmina de água que atinge o solo.

Parcela B								
Datas das Campanhas Intensivas	ET_o (mm/dia)	K_c	Correção para o K_c	K_c + Correção	K_s	ET_{rc} (mm/dia)	ET_{rc} Média (mm/dia)	H_{AS} Média (mm)
17/07/2004	4,31	0,30	0,00	0,30	0,69	1,10	2,19	1,60
18/07/2004	4,29	0,30	0,00	0,30	0,69	1,09		
19/08/2004	5,07	1,05	0,08	1,13	0,66	4,53		
20/08/2004	5,47	1,05	0,08	1,13	0,66	4,88	9,41	1,00
28/09/2004	6,46	1,05	0,08	1,13	0,58	4,16		
29/09/2004	5,58	1,05	0,06	1,11	0,58	3,53		
30/09/2004	7,35	1,05	0,06	1,11	0,57	4,65	8,82	4,80
01/10/2004	6,59	1,05	0,06	1,11	0,57	4,17		
04/10/2004	5,17	1,05	0,04	1,09	0,57	3,16		
05/10/2004	4,23	1,05	0,06	1,11	0,57	2,63	5,79	3,90

H_{AS} – Lâmina de água que atinge o solo.

Tabela D.2 – Valores de K_c , de K_s , da ET_o , da ET_{rc} e da irrigação efetuada em cada campanha intensiva de monitoramento do fluxo de água na zona não saturada do solo, para cada parcela experimental, da P2.

Parcela A							
Datas das Campanhas Intensivas	ET_o (mm/dia)	K_c	Correção para o K_c	K_c + Correção	K_s	ET_{rc} (mm/dia)	H_{AS} (mm)
08/07/2004	3,40	1,05	0,04	1,09	1,49	3,71	6,70
12/08/2004	5,25	1,05	0,04	1,09	1,44	5,72	7,50
28/09/2004	6,46	1,05	0,06	1,11	1,45	7,17	11,0
29/09/2004	5,58	1,05	0,04	1,09	1,45	6,08	8,80
05/10/2004	4,23	1,05	0,04	1,09	1,48	4,61	9,20

H_{AS} – Lâmina de água que atinge o solo.

Parcela B							
Datas das Campanhas Intensivas	ET_o (mm/dia)	K_c	Correção para o K_c	K_c + Correção	K_s	ET_c (mm/dia)	H_{AS} (mm)
17/07/2004	3,40	0,70	0,00	0,70	1,46	2,38	2,70
19/08/2004	5,25	0,95	0,06	1,01	1,39	5,30	2,30
28/09/2004	6,46	0,95	0,06	1,01	1,34	6,52	3,30
30/09/2004	5,58	0,95	0,04	0,99	1,42	5,52	3,60
04/10/2004	4,23	0,95	0,02	0,97	1,40	4,10	4,90

H_{AS} – Lâmina de água que atinge o solo.

Tabela D.3 – Valores de K_c , de K_s , da ET_o , da ET_{rc} e da irrigação efetuada em cada campanha intensiva de monitoramento do fluxo de água na zona não saturada do solo, para cada parcela experimental, da P3.

Parcela A							
Datas das Campanhas Intensivas	ET_o (mm/dia)	K_c	Correção para o K_c	K_c + Correção	K_s	ET_{rc} (mm/dia)	H_{AS} (mm)
18/07/2004	4,29	0,70	0,00	0,70	0,73	2,85	14,0
30/07/2004	3,90	0,70	0,00	0,70	0,73	2,62	14,0
24/09/2004	6,44	0,95	0,05	1,00	0,73	6,25	9,80
29/09/2004	5,58	0,95	0,04	0,99	0,43	2,60	11,0
05/10/2004	4,23	0,95	0,04	0,99	0,47	2,18	12,0

H_{AS} – Lâmina de água que atinge o solo.

Parcela B							
Datas das Campanhas Intensivas	ET_o (mm/dia)	K_c	Correção para o K_c	K_c + Correção	K_s	ET_{rc} (mm/dia)	H_{AS} (mm)
18/07/2004	4,29	0,70	0,00	0,70	0,69	2,58	6,80
05/08/2004	3,00	0,70	0,00	0,70	0,66	1,66	6,90
24/09/2004	6,44	0,95	0,05	1,00	0,53	5,28	4,90
29/09/2004	5,58	0,95	0,04	0,99	0,44	2,65	5,40
05/10/2004	4,23	0,70	0,00	0,70	0,43	1,42	6,30

H_{AS} – Lâmina de água que atinge o solo.

Tabela D.4 – Valores de K_c , de K_s , da ET_o , da ET_{rc} e da irrigação efetuada em cada campanha intensiva de monitoramento do fluxo de água na zona não saturada do solo, para cada parcela experimental, da P4.

Parcela A								
Datas das Campanhas Intensivas	ET_o (mm/dia)	K_c	Correção para o K_c	K_c + Correção	K_s	ET_{rc} (mm/dia)	ET_{rc} Média (mm/dia)	H_{AS} Média (mm)
20/07/2004	3,57	1,05	0,04	1,09	0,66	3,89		
21/07/2004	3,43	1,05	0,06	1,11	0,66	3,81	4,00	3,10
22/07/2004	3,72	1,05	0,08	1,13	0,66	4,20		
26/08/2004	5,62	1,05	0,09	1,14	0,54	4,36		
27/08/2004	5,08	1,05	0,08	1,13	0,54	3,90	4,20	1,90
28/08/2004	5,59	1,05	0,08	1,13	0,54	4,30		
23/09/2004	6,22	1,05	0,08	1,13	0,48	4,92		
24/09/2004	6,44	1,05	0,07	1,12	0,48	5,05	5,30	3,80
25/09/2004	7,38	1,05	0,09	1,14	0,48	5,89		
30/09/2004	7,35	1,05	0,06	1,11	0,48	5,87		
01/10/2004	6,59	1,05	0,08	1,13	0,48	5,36	5,50	5,30
02/10/2004	6,44	1,05	0,09	1,14	0,48	5,29		
04/10/2004	5,17	1,05	0,04	1,09	0,54	5,41		
05/10/2004	4,23	1,05	0,06	1,11	0,54	4,51	5,70	6,50
06/10/2004	6,67	1,05	0,06	1,11	0,54	7,11		

H_{AS} – Lâmina de água que atinge o solo.

Tabela D.4 – Valores de K_c , de K_s , da ET_o , da ET_{rc} e da irrigação efetuada em cada campanha intensiva de monitoramento do fluxo de água na zona não saturada do solo, para cada parcela experimental, da P4 (Continuação).

Parcela B								
Datas das Campanhas Intensivas	ET_o (mm/dia)	K_c	Correção para o K_c	K_c + Correção	K_s	ET_{rc} (mm/dia)	ET_{rc} Média (mm/dia)	H_{AS} Média (mm)
20/07/2004	3,57	1,05	0,04	1,09	0,71	3,89		
21/07/2004	3,43	1,05	0,06	1,11	0,72	3,81	4,00	2,90
22/07/2004	3,72	1,05	0,08	1,13	0,73	4,20		
26/08/2004	5,62	1,05	0,09	1,14	0,68	6,41		
27/08/2004	5,08	1,05	0,08	1,13	0,68	5,74	6,20	4,30
28/08/2004	5,59	1,05	0,08	1,13	0,68	6,32		
23/09/2004	6,22	1,05	0,08	1,13	0,66	6,89		
24/09/2004	6,44	1,05	0,07	1,12	0,66	7,07	7,40	3,10
25/09/2004	7,38	1,05	0,09	1,14	0,66	8,24		
30/09/2004	7,35	1,05	0,06	1,11	0,59	6,28		
01/10/2004	6,59	1,05	0,08	1,13	0,59	5,73	5,90	6,50
02/10/2004	6,44	1,05	0,09	1,14	0,59	5,65		
04/10/2004	5,17	1,05	0,04	1,09	0,55	3,89		
05/10/2004	4,23	1,05	0,06	1,11	0,55	3,24	4,10	6,10
06/10/2004	6,67	1,05	0,06	1,11	0,55	5,11		

H_{AS} – Lâmina de água que atinge o solo.

APÊNDICE E – EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA BRASÍLIA, ANO DE 2004

Tabela E.1 – Evapotranspiração de referência diária para Brasília, no ano de 2004
(Fonte: EMBRAPA/CPAC-DF, Estação Principal, posição geográfica de
15°35'30 de latitude e 47°42'00 de longitude).

Dia	ET _o	Dia	ET _o	Dia	ET _o	Dia	ET _o	Dia	ET _o
01/01/2004	3,13	01/02/2004	2,48	01/03/2004	5,69	01/04/2004	4,21	01/05/2004	4,39
02/01/2004	4,13	02/02/2004	2,44	02/03/2004	5,72	02/04/2004	4,19	02/05/2004	4,75
03/01/2004	3,30	03/02/2004	3,02	03/03/2004	4,27	03/04/2004	4,94	03/05/2004	4,76
04/01/2004	4,18	04/02/2004	4,42	04/03/2004	4,39	04/04/2004	3,80	04/05/2004	4,75
05/01/2004	4,03	05/02/2004	6,40	05/03/2004	4,40	05/04/2004	2,90	05/05/2004	4,65
06/01/2004	4,36	06/02/2004	6,24	06/03/2004	2,25	06/04/2004	3,43	06/05/2004	4,53
07/01/2004	4,44	07/02/2004	3,03	07/03/2004	2,82	07/04/2004	5,05	07/05/2004	4,60
08/01/2004	3,68	08/02/2004	4,34	08/03/2004	4,96	08/04/2004	4,95	08/05/2004	4,26
09/01/2004	4,87	09/02/2004	2,65	09/03/2004	6,39	09/04/2004	4,03	09/05/2004	3,55
10/01/2004	4,11	10/02/2004	1,42	10/03/2004	5,64	10/04/2004	4,01	10/05/2004	3,28
11/01/2004	3,86	11/02/2004	2,83	11/03/2004	5,91	11/04/2004	3,20	11/05/2004	3,82
12/01/2004	1,92	12/02/2004	1,51	12/03/2004	4,95	12/04/2004	2,13	12/05/2004	4,51
13/01/2004	4,94	13/02/2004	3,22	13/03/2004	3,33	13/04/2004	1,79	13/05/2004	3,79
14/01/2004	3,76	14/02/2004	5,35	14/03/2004	3,76	14/04/2004	2,78	14/05/2004	4,26
15/01/2004	4,05	15/02/2004	2,78	15/03/2004	3,75	15/04/2004	1,18	15/05/2004	3,13
16/01/2004	1,85	16/02/2004	3,38	16/03/2004	4,74	16/04/2004	3,47	16/05/2004	1,65
17/01/2004	4,23	17/02/2004	5,74	17/03/2004	1,62	17/04/2004	4,87	17/05/2004	2,90
18/01/2004	4,11	18/02/2004	3,24	18/03/2004	5,10	18/04/2004	5,15	18/05/2004	4,31
19/01/2004	3,77	19/02/2004	5,40	19/03/2004	1,84	19/04/2004	5,36	19/05/2004	3,97
20/01/2004	2,83	20/02/2004	5,55	20/03/2004	3,18	20/04/2004	5,09	20/05/2004	4,06
21/01/2004	1,16	21/02/2004	4,57	21/03/2004	3,62	21/04/2004	5,40	21/05/2004	4,23
22/01/2004	4,65	22/02/2004	3,47	22/03/2004	3,80	22/04/2004	3,97	22/05/2004	3,66
23/01/2004	2,80	23/02/2004	2,98	23/03/2004	4,26	23/04/2004	4,38	23/05/2004	4,13
24/01/2004	1,40	24/02/2004	2,17	24/03/2004	4,29	24/04/2004	4,70	24/05/2004	4,59
25/01/2004	1,74	25/02/2004	3,01	25/03/2004	4,02	25/04/2004	4,25	25/05/2004	4,55
26/01/2004	2,41	26/02/2004	5,99	26/03/2004	4,60	26/04/2004	3,79	26/05/2004	2,77
27/01/2004	2,56	27/02/2004	6,05	27/03/2004	3,09	27/04/2004	3,51	27/05/2004	3,92
28/01/2004	2,77	28/02/2004	5,41	28/03/2004	5,21	28/04/2004	2,17	28/05/2004	4,26
29/01/2004	5,45	29/02/2004	4,52	29/03/2004	3,66	29/04/2004	3,60	29/05/2004	3,28
30/01/2004	4,89			30/03/2004	3,72	30/04/2004	4,14	30/05/2004	4,30
31/01/2004	4,56			31/03/2004	4,48			31/05/2004	4,57

Tabela E.1 – Evapotranspiração de referência diária para Brasília, no ano de 2004
(Fonte: EMBRAPA/CPAC-DF, Estação Principal, posição geográfica de 15°35'30 de latitude e 47°42'00 de longitude) (Continuação).

Dia	ET _o	Dia	ET _o	Dia	ET _o	Dia	ET _o	Dia	ET _o
01/06/2004	4,32	01/07/2004	3,12	01/08/2004	3,97	01/09/2004	6,38	01/10/2004	6,59
02/06/2004	4,57	02/07/2004	3,25	02/08/2004	3,80	02/09/2004	6,51	02/10/2004	6,44
03/06/2004	3,54	03/07/2004	3,29	03/08/2004	5,12	03/09/2004	6,79	03/10/2004	6,39
04/06/2004	3,58	04/07/2004	3,53	04/08/2004	4,80	04/09/2004	6,66	04/10/2004	5,17
05/06/2004	4,34	05/07/2004	3,21	05/08/2004	3,00	05/09/2004	6,23	05/10/2004	4,23
06/06/2004	4,48	06/07/2004	3,35	06/08/2004	4,62	06/09/2004	5,31	06/10/2004	6,67
07/06/2004	5,21	07/07/2004	3,52	07/08/2004	4,64	07/09/2004	5,47	07/10/2004	5,81
08/06/2004	4,43	08/07/2004	3,40	08/08/2004	4,99	08/09/2004	6,24	08/10/2004	6,44
09/06/2004	4,12	09/07/2004	3,39	09/08/2004	5,47	09/09/2004	5,67	09/10/2004	6,43
10/06/2004	4,04	10/07/2004	3,35	10/08/2004	4,92	10/09/2004	6,18	10/10/2004	4,04
11/06/2004	4,61	11/07/2004	3,51	11/08/2004	4,79	11/09/2004	5,89	11/10/2004	2,02
12/06/2004	4,60	12/07/2004	3,78	12/08/2004	5,25	12/09/2004	6,59	12/10/2004	3,70
13/06/2004	4,05	13/07/2004	3,27	13/08/2004	4,88	13/09/2004	5,99	13/10/2004	3,91
14/06/2004	4,45	14/07/2004	3,68	14/08/2004	5,00	14/09/2004	5,31	14/10/2004	6,11
15/06/2004	2,91	15/07/2004	3,76	15/08/2004	4,83	15/09/2004	5,22	15/10/2004	6,31
16/06/2004	3,30	16/07/2004	3,90	16/08/2004	5,11	16/09/2004	5,44	16/10/2004	6,64
17/06/2004	4,41	17/07/2004	4,31	17/08/2004	5,19	17/09/2004	6,11	17/10/2004	6,44
18/06/2004	4,18	18/07/2004	4,29	18/08/2004	5,23	18/09/2004	6,46	18/10/2004	6,10
19/06/2004	3,70	19/07/2004	3,78	19/08/2004	5,07	19/09/2004	5,93	19/10/2004	2,90
20/06/2004	4,02	20/07/2004	3,57	20/08/2004	5,47	20/09/2004	4,77	20/10/2004	4,54
21/06/2004	3,56	21/07/2004	3,43	21/08/2004	5,43	21/09/2004	6,21	21/10/2004	3,23
22/06/2004	3,60	22/07/2004	3,72	22/08/2004	5,25	22/09/2004	6,29	22/10/2004	4,87
23/06/2004	4,40	23/07/2004	3,92	23/08/2004	5,16	23/09/2004	6,22	23/10/2004	6,36
24/06/2004	4,01	24/07/2004	3,85	24/08/2004	5,42	24/09/2004	6,44	24/10/2004	3,39
25/06/2004	3,06	25/07/2004	4,21	25/08/2004	4,69	25/09/2004	7,38	25/10/2004	3,65
26/06/2004	3,24	26/07/2004	4,08	26/08/2004	5,62	26/09/2004	6,78	26/10/2004	4,14
27/06/2004	3,19	27/07/2004	4,20	27/08/2004	5,08	27/09/2004	6,26	27/10/2004	3,25
28/06/2004	3,29	28/07/2004	4,50	28/08/2004	5,59	28/09/2004	6,46	28/10/2004	3,22
29/06/2004	3,31	29/07/2004	4,15	29/08/2004	4,35	29/09/2004	5,58	29/10/2004	3,00
30/06/2004	3,19	30/07/2004	3,90	30/08/2004	5,07	30/09/2004	7,35	30/10/2004	4,95
		31/07/2004	3,72	31/08/2004	4,67			31/10/2004	5,08

Tabela E.1 – Evapotranspiração de referência diária para Brasília, no ano de 2004
(Fonte: EMBRAPA/CPAC-DF, Estação Principal, posição geográfica de 15°35'30 de latitude e 47°42'00 de longitude) (Continuação).

Dia	<i>ETo</i>	Dia	<i>ETo</i>
01/11/2004	5,36	01/12/2004	3,82
02/11/2004	5,52	02/12/2004	3,12
03/11/2004	6,07	03/12/2004	2,70
04/11/2004	5,78	04/12/2004	4,94
05/11/2004	6,31	05/12/2004	5,82
06/11/2004	3,36	06/12/2004	6,03
07/11/2004	5,25	07/12/2004	4,60
08/11/2004	4,95	08/12/2004	4,98
09/11/2004	5,04	09/12/2004	3,66
10/11/2004	6,32	10/12/2004	3,66
11/11/2004	6,53	11/12/2004	2,37
12/11/2004	4,19	12/12/2004	4,32
13/11/2004	5,45	13/12/2004	3,45
14/11/2004	3,15	14/12/2004	4,88
15/11/2004	5,08	15/12/2004	2,58
16/11/2004	3,31	16/12/2004	3,64
17/11/2004	3,66	17/12/2004	4,67
18/11/2004	5,26	18/12/2004	3,65
19/11/2004	4,67	19/12/2004	3,76
20/11/2004	2,88	20/12/2004	3,80
21/11/2004	3,23	21/12/2004	3,71
22/11/2004	3,88	22/12/2004	3,70
23/11/2004	5,58	23/12/2004	2,13
24/11/2004	7,31	24/12/2004	4,30
25/11/2004	4,54	25/12/2004	4,03
26/11/2004	5,13	26/12/2004	5,59
27/11/2004	4,30	27/12/2004	5,00
28/11/2004	3,23	28/12/2004	4,13
29/11/2004	3,21	29/12/2004	4,12
30/11/2004	2,19	30/12/2004	3,43
		31/12/2004	2,92

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)