

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**COMPORTAMENTO DAS VARIÁVEIS  
HIDROLÓGICAS DO BALANÇO HÍDRICO DO SOLO  
EM LISÍMETROS DE DRENAGEM**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Rafael Matias Feltrin**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2009**

**COMPORTAMENTO DAS VARIÁVEIS HIDROLÓGICAS DO  
BALANÇO HÍDRICO DO SOLO EM LISÍMETROS DE  
DRENAGEM**

**por**

**Rafael Matias Feltrin**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Civil.**

**Orientador: Prof. Dr. João Batista Dias de Paiva**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2009**

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Tecnologia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado

**COMPORTAMENTO DAS VARIÁVEIS HIDROLÓGICAS DO  
BALANÇO HÍDRICO DO SOLO EM LISÍMETROS DE DRENAGEM**

Elaborada por  
**Rafael Matias Feltrin**

Como requisito parcial para a obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Civil**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Prof. Dr. João Batista Dias de Paiva**  
Presidente/Orientador (CT/UFSM)

---

**Profª. Drª. Nilza Maria dos Reis Castro**  
(IPH/UFRGS)

---

**Prof. Ph. D. Afrânio Almir Righes**  
(UNIFRA)

Santa Maria, 7 de julho de 2009.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus.

A Universidade Federal de Santa Maria, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e ao Departamento de Hidráulica e Saneamento Ambiental, que possibilitaram a realização do curso de mestrado.

Ao professor João Batista Dias de Paiva e aos demais professores do departamento de Hidráulica e Saneamento Ambiental, pela orientação e ensinamentos durante o mestrado e execução dos trabalhos.

A meus pais Irene e Valdir Feltrin e a minha namorada Sabrina pelo apoio e compreensão.

A todos aqueles colegas do curso que participaram de alguma forma na conclusão deste trabalho, entre eles as colegas Ana Lucia, Íris Marcon e Lorenza Oppa e os colegas Leandro Pereira, Jose Carlos, Marco Alésio e Alessandro Noal.

Ao bolsista de iniciação científica Fábio Belling pelo auxílio no trabalho de digitalização dos mapas.

A amiga Paula Kielse pela ajuda na estruturação e formatação do texto.

Aos funcionários do Laboratório de Hidráulica Alcides Sartori e José Astério pela ajuda nos trabalhos de campo e coleta de dados.

Ao senhor Eriton Coelho do Amaral, proprietário da área onde foi realizado o experimento pela dedicação na leitura de dados.

*“A Alma do homem é como Água; vem do Céu, para depois voltar para a Terra, em eterno ir e vir.”*

*Goethe*

## **RESUMO**

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
Universidade Federal de Santa Maria

### **COMPORTAMENTO DAS VARIÁVEIS HIDROLÓGICAS DO BALANÇO HÍDRICO DO SOLO EM LISÍMETROS DE DRENAGEM**

AUTOR: RAFAEL MATIAS FELTRIN

ORIENTADOR: JOÃO BATISTA DIAS DE PAIVA

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 7 de julho de 2009.

Este trabalho tem por objetivo monitorar o comportamento das variáveis hidrológicas envolvidas no balanço hídrico, a partir de dados lisimétricos, em uma pequena bacia hidrográfica característica do bioma Mata Atlântica, sob as condições climáticas da depressão central do estado do Rio Grande do Sul. As variáveis controladas junto ao lisímetro foram a precipitação, o escoamento superficial, a infiltração, o armazenamento de água no solo e a evapotranspiração. O trabalho apresenta ainda os procedimentos de instalação e reparos de um lisímetro de drenagem, além da caracterização física da área em estudo. A avaliação do balanço hídrico por meio de determinações lisimétricas considerou diferentes escalas temporais, sendo a evapotranspiração obtida em intervalos diários, de 5 e de 10 dias. Devido a problemas estruturais com o lisímetro, a avaliação das variáveis escoamento superficial, infiltração e evapotranspiração foi prejudicada durante o período anterior ao concerto do lisímetro (junho de 2008 a dezembro de 2008), sendo estas variáveis monitoradas apenas para o período posterior ao concerto do lisímetro (janeiro a abril de 2009). Já as variáveis precipitação e armazenamento de água no solo, foram avaliadas durante todo o período de estudo (junho de 2008 a abril de 2009). O monitoramento do potencial de água no solo para determinar o armazenamento de água no solo no interior do lisímetro, foi realizado por meio de tensiômetros do tipo vacuômetro instalados nas profundidades de 10, 30 e 70 cm. O conteúdo volumétrico de água no solo foi monitorado com TDR instalado a 30 cm de profundidade, externamente ao lisímetro. Os resultados demonstram que nos períodos úmidos o conteúdo de água no solo é maior na profundidade de 10 cm, enquanto que nos períodos secos observa-se uma maior concentração na profundidade de 70 cm. Na profundidade de 30 cm têm-se os menores valores de conteúdo de água no solo tanto no período úmido quanto no período seco. O armazenamento de água no solo, determinado com dados do tensiômetro e do TDR, para a profundidade de 30 cm, segue uma mesma tendência de variação, mesmo com o tensiômetro estando localizado no interior do lisímetro e o TDR fora do mesmo. No entanto, o armazenamento computado com dados do tensiômetro foi superior, além de apresentar maiores variações em relação ao armazenamento determinado pelo TDR. O balanço hídrico em escala diária, elaborado a partir de dados lisimétricos, pelo uso do equipamento referido neste estudo, não apresenta bons resultados, principalmente nos períodos em que ocorrem precipitações elevadas, superestimando ou subestimando a evapotranspiração. Já para períodos de 5 e 10 dias, observam-se resultados mais satisfatórios, quando comparados a escala diária.

**Palavras-chave:** balanço hídrico, lisímetros, evapotranspiração

## **ABSTRACT**

M.Sc. Dissertation  
Post-graduation Program in Civil Engineering  
Universidade Federal de Santa Maria

### **BEHAVIOR OF THE VARIABLES HYDROLOGICAL SOIL WATER BALANCE IN DRAINAGE LYSIMETERS**

AUTHOR: RAFAEL MATIAS FELTRIN

ADVISOR: JOÃO BATISTA DIAS DE PAIVA

Place and date of defense: Santa Maria, July, 7<sup>th</sup> of 2009.

The purpose of this study is the monitoring of the behaviour of variables involved in determining the hydrological water balance by means of lysimeters installed in a small basin in the central depression of Rio Grande do Sul. The controlled variables were the precipitation, the runoff, the infiltration and storage of water in the soil. This work also presents the procedures for installation and repair of one volumetric lysimeters, besides the physical characterization of the area studied. The evaluation of water balance through of lysimeters measures considered different time scales and the daily evapotranspiration were obtained for intervals of 5 and 10 days. Due to structural problems with the lysimeters the evaluation of variables runoff, infiltration and evapotranspiration was undermined during the period of repair of the lysimeters (June 2008 to December 2008), and these variables only was available after this period (January to April 2009). The variables precipitation and water storage in soil were evaluated during all the period studied (June 2008 to April 2009). The monitoring of the storage of water in the soil within the lysimeters was performed by means of tensiometers vaccum-type installed at depths of 10, 30 and 70 centimeter and then also analyzed by use of equipment TDR installed at 30 centimeter of depth, outside the lysimeters. The results showed that in wet periods the soil moisture is higher in the depth of 10 centimeter, whereas in dry periods there is a higher concentration of moisture at depth of 70 centimeter. The lowest values of moisture were obtained for depth of 30 centimeter both in wet and in dry period. The storage of water in the soil measured by tensiometers and TDR to the depth of 30 centimeter follows the same trend of variation, even with the tensiometers located inside the lysimeters and TDR outside it. However, the storage measured by the tensiometers was higher and presented more changes in relation to storage measured with TDR's help. The water balance in the daily scale developed from measures lysimeters through of the equipment referred in this study, does not show good results, especially in periods in which heavy rain occurs, overestimating or underestimating the evapotranspiration. Already for periods of 5 and 10 days, there are better results when compared with the daily scale.

**Key words:** water balance, lysimeters, evapotranspiration

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Representação esquemática dos componentes do balanço hídrico.....	5
FIGURA 2 – Tipos mais comuns de tensiômetros: (A) de coluna de mercúrio; (B) com vacuômetro; (C) com transdutor de pressão ou tensímetro. Fonte: Resende e Albuquerque (2002).....	15
FIGURA 3 – Representação esquemática das variáveis controladas em um lisímetro de drenagem: ET = evapotranspiração; P = precipitação; $\Delta A$ = variação no armazenamento entre o início e o fim do intervalo de tempo; I = infiltração; ES = escoamento superficial.....	22
FIGURA 4 – Área de estudo: Bacia hidrográfica do Arroio Vacacaí Mirim e Sub-bacia Rancho do Amaral, com respectivos pontos de monitoramento.....	25
FIGURA 5 – Normais climatológicas observadas para a região de Santa Maria (RS) entre os períodos de 1960 a 1990 (Fonte: CPTEC/INPE).....	26
FIGURA 6 – Lisímetro de drenagem: (a) Caixa C-1: Caixa vazada utilizada para a coleta da amostra do solo; (b) Caixa C-2: base do lisímetro. Fonte: Oliveira (2006).....	29
FIGURA 7 – Instalação do lisímetro para o monitoramento do balanço hídrico na sub-bacia Rancho do Amaral.....	30
FIGURA 8 – Equipamento TDR TRIME – FM da marca IMKO constituído de sonda de 2 hastes paralelas, utilizado no monitoramento do conteúdo de água no solo. Fonte: (IMKO).....	31
FIGURA 9 – Mapa da rede de drenagem da sub-bacia Rancho do Amaral.....	33
FIGURA 10 – Mapa do relevo da sub-bacia Rancho do Amaral.....	33
FIGURA 11 – Mapa de uso do solo da sub-bacia Rancho do Amaral.....	34
FIGURA 12 – Mapa de solos da sub-bacia Rancho do Amaral.....	34
FIGURA 13 – Curva de retenção de água no solo contido no lisímetro instalado na sub-bacia Rancho Amaral, para as diferentes profundidades amostradas.....	36
FIGURA 14 – Problemas constatados no lisímetro instalado na sub-bacia Rancho do Amaral.....	38
FIGURA 15 – Etapas do concerto do lisímetro instalado na sub-bacia Rancho do Amaral.....	39



FIGURA 16 – Precipitação mensal observada na sub-bacia Rancho do Amaral e na estação meteorológica da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM/INMET), para o período de estudo compreendido entre junho de 2008 a abril de 2009 e normais climatológicas observadas entre 1960 e 1990 na estação meteorológica de Santa Maria (CPTEC/INPE).....	41
FIGURA 17 – Precipitação diária registrada na sub-bacia Rancho do Amaral, para cada um dos meses compreendidos entre junho de 2008 a abril de 2009.....	43
FIGURA 18 – Tensão da água no solo registrada no interior do lisímetro instalado na sub-bacia Rancho do Amaral, para o período entre junho de 2008 a abril de 2009.....	45
FIGURA 19 – Conteúdo volumétrico de água no solo registrado no interior do lisímetro instalado na sub-bacia Rancho do Amaral, para o período compreendido entre junho de 2008 e abril de 2009.....	47
FIGURA 20 – Armazenamento de água no solo registrado no interior do lisímetro instalado na sub-bacia Rancho do Amaral, para o período entre junho de 2008 e abril de 2009.....	49
FIGURA 21 – Armazenamento de água no solo, para a camada de solo compreendida entre 0 a 90 cm de profundidade, no interior do lisímetro instalado na sub-bacia Rancho do Amaral, para o período entre junho de 2008 e abril de 2009.....	50
FIGURA 22 – Variação diária do armazenamento de água no solo, para a camada de 0 a 90 cm, registrada no interior do lisímetro instalado na sub-bacia Rancho do Amaral, para o período entre junho de 2008 e abril de 2009.....	50
FIGURA 23 – Armazenamento de água no solo, para as diferentes profundidades monitoradas, registrado por meio de tensiômetro e TDR, na sub-bacia Rancho do Amaral, entre o período de fevereiro e abril de 2009.....	52
FIGURA 24 – Variação diária do armazenamento de água no solo registrado por meio de tensiômetro e TDR, na sub-bacia Rancho do Amaral, entre o período de fevereiro a março de 2009.....	52
FIGURA 25 – Escoamento superficial e drenagem registrada no lisímetro instalado na sub-bacia Rancho do Amaral, para o período entre janeiro e abril de 2009.....	54
FIGURA 26 – Escoamento superficial e drenagem registrada no lisímetro instalado na sub-bacia Rancho do Amaral, para o evento ocorrido entre os dias 18/01/2009 e 21/01/2009.....	54

FIGURA 27 – Escoamento superficial e drenagem registrada no lisímetro instalado na sub-bacia Rancho do Amaral, para o evento ocorrido entre os dias 18/02/2009 e 06/03/2009.....	55
FIGURA 28 – Evapotranspiração diária obtida a partir de determinações lisimétricas na sub-bacia Rancho do Amaral, no entre janeiro e abril de 2009.....	56
FIGURA 29 – Evapotranspiração e precipitação acumulada para períodos de 5 dias, obtida a partir de determinações lisimétricas na sub-bacia Rancho do Amaral, entre janeiro e abril de 2009.....	57
FIGURA 30 – Evapotranspiração média diária para o período de 5 dias, obtida a partir de determinações lisimétricas na sub-bacia Rancho do Amaral, entre janeiro e abril de 2009.....	57
FIGURA 32 – Evapotranspiração e precipitação acumulada para períodos de 10 dias, obtida a partir de determinações lisimétricas na sub-bacia Rancho do Amaral, entre janeiro e abril de 2009.....	58
FIGURA 32 – Evapotranspiração média diária para o período de 10 dias obtida a partir de determinações lisimétricas na sub-bacia Rancho do Amaral, entre janeiro e abril de 2009.....	58

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Constante dielétrica de diferentes meios e materiais constituintes da matriz do solo.....	16
TABELA 2 – Uso do solo na área da sub-bacia Rancho do Amaral.....	34
TABELA 3 – Distribuição dos solos presentes na sub-bacia Rancho do Amaral.....	34
TABELA 4 – Valores de densidade do solo, densidade de partículas do solo e porosidade do solo coletado em áreas próximas ao lisímetro instalado na sub-bacia Rancho Amaral.....	35
TABELA 5 – Valores da análise granulométrica e classificação textural do solo de amostras retiradas próximas ao lisímetro instalado na sub-bacia Rancho Amaral.....	36
TABELA 6 – Valores da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e água disponível (AD), em função das profundidades amostradas.....	37
TABELA 7 – Precipitação mensal registrada na sub-bacia Rancho do Amaral para o período de estudo compreendido entre junho de 2008 e abril de 2009.....	40
TABELA 8 – Valores máximos, mínimos e médios de tensão de água no solo registrados no interior do lisímetro localizado na sub-bacia Rancho do Amaral para o período entre junho de 2008 e abril de 2009.....	44
TABELA 9 – Valores máximos, mínimos e médios do conteúdo volumétrico de água no solo registrados no interior do lisímetro localizado na sub-bacia Rancho do Amaral para o período de junho de 2008 a abril de 2009.....	48

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1 – Laudo de análises físicas do solo presente na região do lisímetro.....	73
ANEXO 3 – Balanço Hídrico diário obtido a partir de dados lisimétricos na sub-bacia Rancho do Amaral, no período compreendido entre janeiro e abril de 2009.....	74
ANEXO 4 – Balanço Hídrico para o período de 5 dias (quinquidial) obtido a partir de dados lisimétricos na sub-bacia Rancho do Amaral, entre janeiro e abril de 2009.....	77
ANEXO 5 – Balanço Hídrico para o período de 10 dias (decêndial) obtido a partir de dados lisimétricos na sub-bacia Rancho do Amaral, no período compreendido entre janeiro e abril de 2009.....	78

## LISTA DE SIGLAS, ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

- A (i) - armazenamento inicial de água no solo.  
A(f) - armazenamento final de água no solo.  
AD - água disponível.  
CAD - capacidade de água disponível  
CC - capacidade de campo  
Cfa - clima subtropical  
CPTEC - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos  
DNAEE - Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica  
DNOS - Departamento Nacional de Obras e Saneamento  
EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias  
ES - Escoamento superficial  
ET – evapotranspiração  
ETo - Evapotranspiração de Referência  
ETP - Evapotranspiração Potencial  
ETr - Evapotranspiração Real  
FAO - Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura  
FUSP - Fundação de Apoio à Universidade de São Paulo  
I - Infiltração de água no solo  
IAF - índice de área foliar  
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia  
INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
IPH-UFRGS - Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Ka - constante dielétrica do solo  
P – precipitação  
PMP - Ponto de Murcha Permanente  
Q – vazão, deflúvio  
Rd1 - Neossolo Litólico Distrófico relevo ondulado  
Re4 - Neossolo Litólico Eutrófico Chernossólico  
Re-C-Co - Associação Neossolo Litólico Eutrófico Chernossólico-Cambissolo-Colúvios  
SEPLAN - Secretaria de Planejamento da Presidência da República

STE - Serviços Técnicos de Engenharia S.A.

TBa-Rd - Associação Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico Alissólico e Neossolo Litólico Eutrófico

TDR - Reflectometria no Domínio do Tempo (Time Domain Reflectometry)

UFMS - Universidade Federal de Santa Maria

UNESCO - Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura.

$\alpha$ ,  $n$  e  $b$  - coeficientes empíricos da equação de Genuchten (1980).

$\Delta A$  - Variação no armazenamento de água do solo.

$\Delta S/\Delta t$  - variação do armazenamento de água do sistema no tempo.

$\theta$  - umidade volumétrica do solo

$\theta$  - conteúdo volumétrico de água no solo

$\theta_r$  - conteúdo volumétrico de água residual do solo

$\theta_s$  - conteúdo volumétrico de água na saturação do solo

$\Psi_m$  - potencial matricial de água no solo

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	1
<b>1.1 Objetivos gerais</b> .....	3
<b>1.2 Objetivos específicos</b> .....	3
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	4
<b>2.1 Balanço hídrico</b> .....	4
2.1.1 Balanço hídrico de bacias hidrográficas .....	6
<b>2.2 Variáveis do balanço hídrico</b> .....	7
2.2.1 Precipitação .....	9
2.2.2 Infiltração de água no solo .....	8
2.2.3 escoamento superficial .....	10
2.2.4 Armazenamento de água no solo .....	11
2.2.4.1 Potencial de água no solo .....	12
2.2.4.2 Tensiometria .....	13
2.2.4.3 Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) .....	16
2.2.5 Evapotranspiração .....	17
2.2.5.1 Fatores que influenciam na evapotranspiração .....	19
2.2.5.2 Determinação da evapotranspiração .....	20
<b>2.3 Lisímetros</b> .....	21
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	24
<b>3.1 Área de estudo</b> .....	24
3.1.1 Caracterização geral .....	24
3.1.2 Clima .....	26
3.1.3 Obtenção de informações cartográficas e classificação dos solos da bacia .....	27
3.1.4 Caracterização físico-hídrica do solo.....	27
<b>3.2 Instalação do lisímetro</b> .....	28
<b>3.3 Monitoramento das variáveis hidrológicas envolvidas no estudo</b> .....	30
3.3.1 Monitoramento da variação do armazenamento de água no solo .....	30
3.3.2 Monitoramento da precipitação, do escoamento superficial e da drenagem .....	31
3.3.3 Cálculo do balanço hídrico e da evapotranspiração .....	32
3.3.4 Análise dos dados coletados .....	32

<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	33
<b>4.1 Caracterização física da área de estudo</b> .....	33
<b>4.2 Propriedades físico-hídricas do solo</b> .....	35
<b>4.3 Constatação e correção de problemas no lisímetro</b> .....	37
<b>4.4 Análise das variáveis do balanço hídrico</b> .....	40
4.4.1 Precipitação .....	40
4.4.2 Armazenamento de água no solo .....	44
4.4.2.1 Tensão da água no solo .....	44
4.4.2.2 Conteúdo volumétrico de água no solo .....	46
4.4.2.3 Variação do armazenamento de água no solo .....	48
4.4.2.4 Armazenamento de água no solo – Relação entre dados registrados por tensiômetro e TDR .....	51
4.4.3 Escoamento superficial e drenagem .....	53
4.4.4 Balanço hídrico e evapotranspiração .....	55
<b>5 CONCLUSÕES</b> .....	60
<b>6 RECOMENDAÇÕES</b> .....	61
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	62
<b>8 ANEXOS</b> .....	72



## 1. INTRODUÇÃO

O balanço hídrico de bacias hidrográficas geralmente visa estimar a evapotranspiração baseando-se em dados de precipitação, evaporação e escoamentos superficial e sub-superficial, muitas vezes desconsiderando o armazenamento de água no solo. Neste contexto, determinações lisimétricas constituem-se em importante ferramenta para os estudos hidrológicos, permitindo a quantificação das variáveis hidrológicas envolvidas no balanço hídrico, especialmente aquelas relacionadas ao conteúdo e armazenamento de água no solo, variáveis estas de difícil mensuração. Assim, os resultados obtidos a partir de dados lisimétricos, no caso da modelação hidrológica de bacias hidrográficas, podem ser utilizados na aplicação e calibração de modelos matemáticos, fornecendo resultados finais com maior confiabilidade.

Conforme Tucci (2002) a maior parte do conhecimento hidrológico atual, em nível internacional, tem sido observada em pequenas bacias. No entanto, no Brasil ainda é incipiente o conhecimento do comportamento ecohidrológico de seus biomas, especialmente pela dificuldade de monitoramento. Deste modo, as bacias experimentais têm entre outras funções a de desempenhar o papel de um laboratório de campo, onde se busca caracterizar as relações entre solo, planta, água e atmosfera, assim como suas inter-relações. Assim sendo, o monitoramento em bacias experimentais, com uso de parâmetros do ciclo hidrológico, pode fornecer uma rápida interação desta com o meio, possibilitando a obtenção de dados locais capazes de conduzir a uma boa avaliação da disponibilidade hídrica de uma região (MORAES, 2007).

Na agricultura, a teoria do balanço hídrico tornou-se um importante instrumento agrometeorológico para caracterização do fator umidade do solo, podendo os seus resultados serem utilizados para o zoneamento agroclimático regional, demanda de potencial de água das culturas irrigadas e a definição de prioridades no planejamento de pesquisas. Além disso, o balanço hídrico torna-se praticamente indispensável na definição e quantificação das exigências climáticas das culturas econômicas, nas diferentes fases fenológicas, possibilitando o mapeamento das aptidões climáticas dessas culturas na área ou região de interesse (CAMARGO e CAMARGO, 1993; PEREIRA et al., 1997; TOMASELLA e ROSSATO, 2005).

No entanto, medidas feitas com o objetivo de estabelecer o balanço hídrico em uma determinada área vegetada, em um dado intervalo de tempo, normalmente exigem o emprego

de equipamentos sofisticados e de mão-de-obra bastante especializada, o que torna tais medidas normalmente inacessíveis ao agricultor. Na prática, efetuar diretamente a contabilidade hídrica de uma parcela de solo com vegetação não é uma atividade simples e dependendo das condições do local, nem sempre é possível efetuar-la. Assim, estudos do balanço hídrico a partir de variáveis meteorológicas ficam restritos a pequenas áreas e tem o objetivo apenas de verificar modelos matemáticos desenvolvidos para simular o balanço hídrico. Desta forma, inúmeros pesquisadores procuraram desenvolver processos indiretos para estimá-lo, a partir de variáveis meteorológicas (ROSSATO, 2002).

Tucci (1993) menciona que medidas diretas da evapotranspiração são raras, principalmente em regiões afastadas de centros urbanos, por esta não poder ser quantificada com aparelhos normalmente utilizados em estações meteorológicas. Neste caso devem-se utilizar estimativas através de modelos físicos ou empíricos para a sua quantificação. Uma ferramenta importante para a validação dos diferentes modelos utilizados são os lisímetros. Conhecidos e utilizados há 300 anos, atualmente, os lisímetros são peças fundamentais na determinação do balanço hídrico e da evapotranspiração, pois além de permitirem a sua obtenção direta, servem de instrumento de calibração para os métodos empíricos (MACHADO e MATTOS, 2001).

Conforme Gomes (2005) o desenvolvimento e a utilização de modelos de simulação do balanço hídrico têm se intensificado nos últimos anos e com o advento da informática, muitas dificuldades operacionais vêm sendo desconsideradas como obstáculos. No entanto, apesar das facilidades criadas, o desenvolvimento e validação de novos modelos ainda é algo complexo, demandando tempo considerável entre sua idealização, calibração e o cumprimento da função a que se destina. Souza (2001) afirma que a escolha do modelo de balanço hídrico mais adequado é determinada pelo grau de conhecimento do sistema solo/planta/atmosfera e que modelos mais complexos são mais exigentes em dados do solo, cultura e atmosfera, o que pode inviabilizar sua utilização.

Souza (2001) destaca os modelos pedológicos, em que a condição hídrica do solo é monitorada baseando-se no teor de umidade determinada por diferentes métodos e os modelos físicos que se baseiam na relação entre o teor de umidade e tensão de água no solo. Existem ainda modelos que relacionam as propriedades físico-hídricas do solo com os componentes de entrada e saída de água no solo, os quais são conhecidos como Balanços de Água no Solo ou simplesmente Balanços Hídricos (HILLEL, 1980).

No entanto, para que estes modelos possam ser colocados em prática, são requeridas estimativas confiáveis do conteúdo de umidade do solo, já que este é um fator determinante

nos processos de transferência entre o solo e a atmosfera (GARDNER et al., 2000). Por esta razão, pesquisas referentes a determinação do conteúdo de umidade do solo e ao comportamento das demais variáveis envolvidas no balanço hídrico, assumem extrema importância e são tema de diversos estudos (ROSSATO, 2002).

### **1.1 Objetivos gerais**

Esse trabalho tem por objetivo geral avaliar o comportamento das variáveis hidrológicas (precipitação, escoamento superficial, drenagem, conteúdo de água no solo e evapotranspiração) envolvidas no balanço hídrico, utilizando lisímetro de drenagem instalado em uma pequena bacia hidrográfica experimental característica do bioma Mata Atlântica na região sul do Brasil.

### **1.2 Objetivos específicos**

- Acompanhar o funcionamento de um equipamento TDR comparativamente a um tensiômetro, na determinação do conteúdo de água no solo.
- Elaborar o balanço hídrico para diferentes escalas temporais, a partir da aplicação da equação da continuidade de massa, com base em resultados obtidos por determinações lisimétricas.
- Obter informações referentes ao comportamento do armazenamento de água no solo, que possam ser transferidos para a bacia hidrográfica, servindo de subsídio a aplicação da modelagem hidrológica.

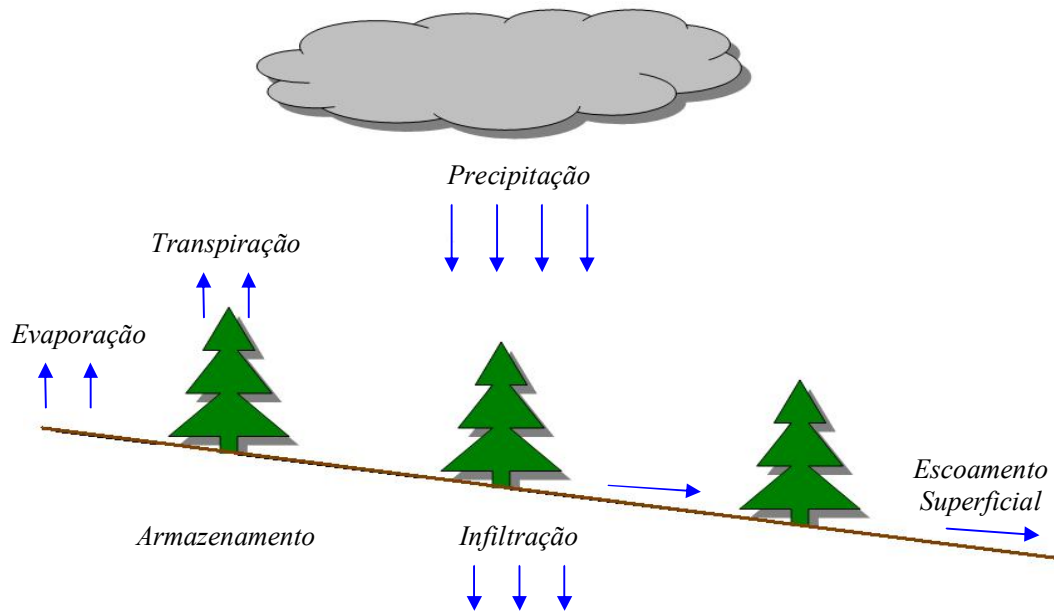
## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Balanço hídrico

O ciclo hidrológico pode ser definido como o fenômeno global de circulação fechada da água entre a superfície terrestre e a atmosfera, impulsionado pela radiação solar associada à gravidade e a rotação terrestre, constituindo-se em um processo contínuo de transporte de massas de água. Tal processo pode ocorrer no sentido superfície-atmosfera, sob a forma de vapor, sendo este considerado o principal elemento responsável pela contínua circulação de água no globo; ou no sentido atmosfera-superfície, com a água regressando a superfície nas fases líquida e sólida, por meio de precipitações (TUCCI, 1993). Assim definido, o balanço hídrico pode ser entendido como sendo o próprio ciclo hidrológico, cujo resultado fornecerá a água disponível no sistema, após vários processos que envolvem o fluxo hídrico.

A água que precipita nos continentes pode tomar diversos destinos, sendo uma porção devolvida diretamente à atmosfera por evapotranspiração; outra parcela escoar sobre a superfície do terreno (escoamento superficial), concentrando-se em canais que formarão os cursos de água; e a parte restante sofre infiltração (MORAES, 2007). A parcela de água que penetra no solo pode aumentar o armazenamento, ou ser drenada para baixo das raízes (drenagem profunda), com ascensão capilar do lençol freático para a zona das raízes em períodos mais secos (PEREIRA et al. 1997). Fujieda et al. (1997) relatam que do volume total de chuva que atinge o solo 11% escoar pela superfície, 59% é armazenado no solo, fluindo através das rotas sub-superficiais aos córregos durante todo o ano; e os 15% restantes sofrem evapotranspiração.

A Figura 1 ilustra uma representação esquemática dos principais componentes envolvidos no balanço hídrico do solo.



**Figura 1** – Representação esquemática dos componentes do balanço hídrico.

Angiolella (2005) comenta que a estimativa do balanço hídrico surgiu da necessidade de se contabilizar a chuva e a evapotranspiração que ocorre em um ecossistema, objetivando o conhecimento da disponibilidade de água para as plantas. Visando equacionar esta relação, surgiram diferentes métodos de cálculo, dentre eles, o conhecido balanço hídrico climatológico de Thornthwaite e Mather (1955). Tal modelo baseia-se na estimativa das entradas e saídas de água de um volume de controle, resultante da aplicação do princípio de conservação de massa para um volume de solo vegetado, possibilitando informações sobre ganhos, perdas e armazenamento da água pelo solo.

A mensuração do balanço hídrico pode ser realizada em diversos períodos de tempo, variando desde horas até anos, sendo as escalas de tempo mais utilizadas a diária, a mensal e a anual. Segundo Reichardt e Timm (2004), intervalos de tempo de medidas em períodos de um dia ou menos não são viáveis, visto a dinâmica da água ser relativamente lenta. Para fins agrícolas, a escolha do período de estudo é determinada de acordo com a sensibilidade da cultura ao estresse hídrico, e pela disponibilidade de dados climáticos em escala igual ou mais detalhada que a do balanço hídrico. Assim, quanto menor for o período de estudo, maior será a interferência das variações do tempo meteorológico (PEREIRA et al., 1997).

Quanto a escala, os balanços hídricos podem ser classificados em sequencial (contínuo) ou cíclico (climatológico), ambos apresentando particularidades matemáticas para a sua determinação. O balanço hídrico sequencial é normalmente empregado no manejo da

irrigação, sendo realizado para curtos períodos de tempo, demonstrando de forma satisfatória a variação da condição hídrica do local (OMETTO, 1981; TUBELLIS, 1986; PEREIRA et al., 1997). Já o balanço hídrico cíclico, freqüentemente é apresentado na escala mensal e para um ano médio, e elaborado partindo das variáveis climatológicas temperatura média e precipitação do local (CAMARGO e SENTELHAS, 1997).

### 2.1.1 Balanço hídrico de bacias hidrográficas

Segundo o guia metodológico para análise do balanço hídrico da América do Sul, elaborado pela UNESCO em 1982, o balanço hídrico de uma bacia hidrográfica constitui-se um valioso instrumento, tanto do ponto de vista teórico quanto prático, possibilitando uma correta avaliação da disponibilidade dos recursos hídricos de uma região, bem como de sua variabilidade espacial e temporal.

De acordo com Tucci (2002) a bacia hidrográfica pode ser considerada um sistema físico onde a entrada de água é representada pela precipitação e a saída representada pelo escoamento superficial pelo seu exutório, sendo a evapotranspiração e a infiltração as perdas intermediárias. Assim, os processos hidrológicos em bacias hidrográficas possuem duas direções predominantes de fluxo: vertical e longitudinal. O fluxo vertical é representado pelos processos de precipitação, evapotranspiração, umidade e fluxo no solo, enquanto que o fluxo longitudinal é constituído pelo escoamento na direção dos gradientes da superfície (escoamento superficial e rios) e do subsolo (escoamento subterrâneo). O fluxo sobre a superfície terrestre é positivo (precipitação menos evaporação), resultando nas vazões dos rios em direção aos oceanos, enquanto o fluxo vertical dos oceanos é negativo, com maior evaporação que precipitação. O volume evaporado adicional se desloca para os continentes por meio do sistema de circulação atmosférica, e precipita fechando o ciclo. Assim, o ciclo hidrológico só é fechado em nível global e à medida que se consideram áreas menores de drenagem, em nível local caracteriza-se como um ciclo aberto.

O balanço hídrico superficial em uma bacia hidrográfica baseia-se na aplicação da equação da continuidade, com os valores de evapotranspiração obtidos pela diferença entre a precipitação e a vazão no exutório. A entrada de água no sistema é quantificada com uso de pluviômetros, especialmente distribuídos; e a saída de água da bacia obtida em estações fluviométricas equipadas com vertedores padronizados. Em laboratório, os dados coletados

pelos fluviômetros são utilizados para obtenção da relação cota-vazão do curso d'água, fornecida pela curva-chave do vertedor. Quando isso não é possível, recomenda-se a calibração do vertedor instalado na própria microbacia, com uso das medições de velocidade da água e da área da seção molhada do vertedor, em diferentes cotas fluviométricas (MOSCA, 2003).

Além da continuidade de massa, o balanço hídrico de uma bacia hidrográfica envolve a quantificação dos componentes deste sistema (precipitação, umidade do solo, evaporação, evapotranspiração, vazão, escoamento superficial e escoamento subterrâneo) (TUCCI, 1993). Assim, o regime hidrológico de uma bacia hidrográfica, ou seja, as respostas emitidas na saída do canal principal, diante da entrada de energia pelos eventos de precipitação, são resultantes da interação de todos os elementos e fatores que compõem o interior desse sistema. Segundo Freitas (1998), os processos que regulam a vazão durante os eventos de precipitação, seu volume e regime variam de acordo com o clima, a vegetação, o uso do solo, a topografia e as características da chuva.

## **2.2 Variáveis do balanço hídrico**

### **2.2.1 Precipitação**

A precipitação é a principal entrada do sistema constituinte de uma bacia hidrográfica, sendo a partir dela obtidas as outras variáveis do sistema, a exemplo do escoamento superficial e da infiltração. Assim, a precipitação pode ser definida como toda a água proveniente da atmosfera que atinge a superfície terrestre, sendo a sua disponibilidade anual em uma região o fator determinante para quantificar a necessidade de irrigação e abastecimento de água (TUCCI, 1993). A precipitação pode apresentar-se sob a forma de chuva, granizo, orvalho, neblina, neve ou geada. No entanto, é comum tratá-la somente sob a forma de chuva, especialmente pela sua maior capacidade de produzir escoamento, contribuindo de forma significativa para a vazão dos rios (TUCCI, 1993; TOMASELLA e ROSSATO, 2005).

A quantidade de chuva pode ser expressa por meio de medidas obtidas em pontos previamente escolhidos, utilizando instrumentos denominados pluviômetros ou pluviógrafos e

podem ser espacializadas utilizando-se metodologia adequada para isto. O pluviógrafo registra os dados automaticamente, enquanto que a aferição com uso do pluviômetro requer leituras manuais a intervalos de tempo fixos. De modo geral, as chuvas coletadas e registradas por meio destes equipamentos, sobre a forma de altura de água precipitada em milímetros, pode ser convertida em volume se multiplicada pela área ou vazão de água, desde que se obtenha o tempo em que ocorreu a precipitação (TUCCI, 1993).

### 2.2.2 Infiltração de água no solo

O processo de infiltração de água no solo corresponde a penetração, através da superfície, da água proveniente da precipitação, que se move para o interior do solo sob a ação da gravidade, até atingir uma camada suporte, que a retém, formando a água armazenada do solo (PINTO et al., 1976). Para um perfil de solo homogêneo, esse processo ocorre em cinco estágios ou zonas. A Zona saturada corresponde ao estágio inicial de infiltração, seguida pela Zona de transição que corresponde à região logo abaixo da anterior, caracterizada por uma queda rápida no teor de umidade do solo. Nestas duas primeiras zonas, mais saturadas de água, o potencial gravitacional torna-se proeminente. O terceiro estágio corresponde a Zona de transmissão, que apresenta potencial de umidade constante, sendo o movimento de água gerado pelos potenciais gravitacional e matricial. No quarto estágio, ou Zona de umedecimento, os teores de umidade decrescem rapidamente com a profundidade, formando um gradiente de potencial de água entre dois pontos, e condutibilidade hidráulica decrescendo exponencialmente. Por fim, forma-se a frente de molhamento, camada limite das partes úmida e seca do perfil, onde ocorre maior gradiente de potencial de água. Na zona de transmissão, com o passar do tempo, há um aumento de espessura e a infiltração diminui, havendo um maior distanciamento entre a zona saturada e a frente de umedecimento, diminuindo assim o gradiente de potencial e a taxa ou velocidade de infiltração. Tal decréscimo ocorre até chegar um momento em que se pode considerar a velocidade constante, a qual pode ser denominada infiltração final (KLAR, 1984). A capacidade de infiltração pode ser definida como a quantidade máxima de água que um solo em determinadas condições pode absorver, na unidade de tempo por unidade de área horizontal (LIBARDI, 1995).

A capacidade de infiltração depende de condições variáveis, dentre elas, as características físicas e hídricas do solo, bem como de sua cobertura vegetal; sendo o



conhecimento desses fatores de fundamental importância para o manejo racional dos recursos naturais de uma região (GALVÍNCIO, 2005). O tipo de cobertura vegetal possui relevante importância no processo de infiltração, visto a vegetação de porte incorporar grande quantidade de matéria orgânica ao solo, o que favorece a formação de micro e macroporosidade que aumentam a infiltração sob florestas (BACEILAR, 2005). Além disso, solos com cobertura florestal se caracterizam por expressiva camada de resíduos vegetais (serrapilheira) e por um horizonte A rico em matéria orgânica. A matéria orgânica é comprovadamente eficiente para manter os agregados do solo, preservando sua porosidade (BERTONI e LOMBARDI NETTO, 1993). Quando as condições do solo após o desmatamento ficam deterioradas, o solo pode sofrer compactação ocasionada pela energia da chuva, gerando a redução da capacidade de infiltração e aumento do escoamento superficial, com conseqüente diminuição do potencial de alimentação do aquífero (MORAES, 2007). Sendo assim, se uma precipitação atinge o solo com intensidade menor que a capacidade de infiltração, toda a água penetra no solo, provocando uma progressiva diminuição da própria capacidade de infiltração, já que o solo está se umedecendo. Se a precipitação continuar, dependendo da sua intensidade, pode ocorrer um momento em que a capacidade de infiltração diminua tanto que sua taxa se iguale ou até fique menor que a intensidade da precipitação (MORAES, 2007).

A taxa de infiltração corresponde a velocidade média do escoamento da água através de um solo saturado, sendo obtida pela relação entre a quantidade de água que atravessa a unidade de área do material do solo e o tempo, determinando assim o deflúvio superficial (runoff) ou enxurrada, bem como o balanço de água na zona das raízes. Durante o processo de infiltração, a taxa de infiltração diminui relativamente com o passar do tempo, tendendo para zero no caso da infiltração horizontal, e tendendo para a condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_o$ ) no caso de infiltração vertical. Com a redução da velocidade de infiltração em função do tempo, a intensidade da chuva pode se tornar maior que a taxa de infiltração do solo, havendo neste caso escoamento superficial de parte da água pela superfície do solo (REICHARDT e TIMM, 2004).

O método direto mais preciso para estimar a infiltração em terrenos cultivados baseia-se na estimativa da vazão de água aplicada, subtraída pelo volume de escoamento por drenagem superficial na unidade de área. Quando não é possível a utilização do método direto, pode-se aplicar o método dos cilindros concêntricos (infiltrômetros), constituído por dois cilindros, um externo com aproximadamente 50 cm e outro interno com cerca de 25 cm de diâmetro, ambos com altura de 30 cm, que são enterrados a 15 cm de profundidade no

solo. As medições são estimadas pelo abaixamento de água no cilindro interno, sendo o cilindro externo utilizado apenas para diminuir a entrada lateral de água no solo (KLAR, 1984).

### 2.2.3 escoamento superficial

O escoamento superficial corresponde a combinação do fluxo de água em pequena profundidade na superfície com o escoamento em pequenos canais que constituem a drenagem da bacia hidrográfica, podendo ocorrer por excesso de saturação na superfície do solo, por saturação em função da disposição das camadas do solo, ou ainda, pelo excesso de infiltração, denominado escoamento Hortoniano. No entanto, existem áreas onde praticamente não ocorre escoamento superficial e toda a precipitação infiltra, tendo um significativo escoamento sub-superficial que é transportado pelos macroporos, podendo aparecer na superfície por meio de fontes, produzindo escoamento superficial em conjunto com a precipitação local (TUCCI, 2002).

O escoamento superficial sofre influência de diversos fatores que facilitam ou prejudicam a sua ocorrência. Estes fatores podem ser de natureza climática, relacionados à precipitação e evaporação; ou de natureza fisiográfica, ligadas às características físicas da bacia (GAUVÍNCIO, 2005). Segundo Tucci (1993) os principais fatores que influenciam a forma de um hidrograma são o relevo (densidade de drenagem, declividade do rio ou da bacia, capacidade de armazenamento e forma da bacia), a cobertura da bacia (vegetação e áreas impermeabilizadas), as modificações artificiais no rio (regularização e canalização); a distribuição, duração e intensidade da precipitação (em bacias pequenas, precipitações convectivas podem provocar maiores enchentes, enquanto em bacias maiores as chuvas frontais resultam em maiores vazões); e o solo (condições iniciais de umidade).

O escoamento superficial pode ser quantificado por meio da coleta de água que escoar em uma dada área. Seu fluxo é considerado positivo quando a contribuição é proveniente de montante, e negativo quando se trata de uma perda a jusante; sendo complexa a sua representação detalhada, em função da grande variabilidade das condições físicas das bacias (declividade, rugosidade, seção de escoamento e obstruções ao fluxo), do estado de umidade do sistema e da intensidade de chuva (REICHARDT e TIMM, 2004; TUCCI, 1993). Assim, em bacias hidrográficas, a estimativa da vazão pode simplificar a mensuração do escoamento

superficial, sendo esta realizada com base na medição das velocidades observadas em uma seção hidráulica do curso de água. A partir daí, estabelece-se uma curva de cotas do nível de água, com vazões correspondentes e medições sistemáticas substituídas pelos valores das cotas, com as quais se estimam as vazões.

#### 2.2.4 Armazenamento de água no solo

O solo é o armazenador e o fornecedor de água e nutrientes para as plantas. Assim, a quantidade de água armazenada no solo (umidade do solo) disponível para as raízes das plantas, constitui-se em um dos principais fatores para o estudo da resposta da vegetação em condições de estresse-hídrico, bem como dos processos de infiltração, drenagem, condutividade hidráulica e irrigação. Se a quantidade de água que entra em um volume de solo num período de tempo for maior que a quantidade que dele sai, haverá reposição hídrica, e se sair mais do que entrar, haverá retirada. O saldo de água no solo é obtido pela variação no armazenamento de água do perfil, podendo a água sair deste sistema pelos processos de drenagem profunda, evapotranspiração e escoamento superficial (MENDES, 2006).

Segundo Pereira et al. (1997), a água das chuvas penetra no solo aumentando o armazenamento, contudo, cada tipo de solo apresenta uma capacidade de armazenamento (Capacidade de Campo) específica. Assim, as propriedades físicas do solo podem afetar significativamente a sua Capacidade de Campo. Solos com textura mais fina, em função da sua maior superfície específica, retêm maior quantidade de água se comparados aos solos de textura grosseira. Além disso, o conteúdo de água no solo é função do tamanho e do volume dos seus poros, estando a umidade intimamente relacionada à pressão capilar (TUCCI, 1993). O tipo de cobertura vegetal também propicia diferenças na capacidade de armazenamento do solo, visto que culturas florestais apresentam sistema radicular profundo, alcançando várias dezenas de metros de profundidade, com maior capacidade de armazenamento de água disponível no solo se comparadas à vegetação de campo ou culturas agrícolas, com sistema radicular raso (CAMARGO, 2005).

Tradicionalmente, a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP) são considerados como os limites máximo e mínimo, respectivamente, de água disponível para as plantas. Partindo-se desses limites, é possível determinar a capacidade de armazenamento de água disponível no solo, considerando a profundidade do sistema radicular

(BERGAMASCHI et al., 1992). Geralmente, assume-se que a capacidade de campo corresponde a um potencial matricial de  $-10$  kPa, e que o ponto de murcha permanente corresponde a um potencial matricial de  $-1500$  kPa (REICHARDT, 1988), apesar de cada espécie de planta apresentar um valor distinto. No balanço hídrico, o armazenamento de água no solo varia entre o ponto de murcha e a capacidade de campo, e o excesso, ou seja, a quantidade de água acima da capacidade de campo do perfil de solo resulta na drenagem profunda ou no escoamento superficial (TOMASELLA e ROSSATO, 2005). Tal faixa de umidade, denominada de capacidade de água disponível (CAD), é mensurada, num dado volume de solo, por meio dos valores de densidade aparente do solo, profundidade do perfil explorado pelas raízes, umidade na capacidade de campo, e umidade no ponto de murcha permanente (PEREIRA et al., 1997).

#### 2.2.4.1 Potencial de água no solo

Ao longo de várias décadas, o estado hídrico do solo foi expresso com base na quantidade do conteúdo de água gravimétrica ou volumétrica. Entretanto, considerando que as características de retenção de água no solo variam muito, especialmente em função da textura, do conteúdo de matéria orgânica e do estado de agregação de suas partículas, houve a necessidade de expressar o conteúdo de água do solo em termos de energia. Assim, o conceito de tensão ou sucção de água, até então utilizado para quantificar o conteúdo de água no solo, foi substituído pela teoria do potencial de água no solo (ROSSATO, 2002).

O fluxo de água no interior do solo pode ocorrer tanto no sentido de cima para baixo (drenagem profunda), como no sentido de baixo para cima (ascensão capilar), dependendo do gradiente de potencial do solo, sendo necessário para isto o conhecimento de suas características hídricas, da curva de retenção de água e da condutividade hidráulica (REICHARDT, 1987; REICHARDT e TIMM, 2004). Segundo Libardi (1995), a retenção de água nos microporos dos agregados está associada às forças capilares e as forças de adsorção, que juntas denominam-se forças mátricas. Em solos arenosos, com poros e partículas relativamente grandes, a adsorção se torna pouco importante, predominando os fenômenos de capilaridade na determinação do potencial matricial, enquanto que em solos com textura fina ocorre exatamente o contrário. Pode ainda ocorrer variações no potencial matricial para um mesmo solo, desde que haja diferentes teores de umidade, sendo que quanto maior a umidade

do solo maior será a importância da capilaridade e, à medida que a umidade decresce, as forças adsorptivas se tornam predominantes (REICHARDT e TIMM, 2004).

A separação do potencial mátrico em seus dois componentes de adsorção e capilar é praticamente impossível na faixa de umidade do solo que as plantas normalmente se desenvolvem (LIBARDI, 1995; REICHARDT e TIMM 2004). Bergamaschi et al. (1992) demonstram que o potencial matricial se acentua à medida que o solo vai secando, tornando-se mais negativo, indicando que a água é retida com maior energia pela matriz do solo. Assim, para cada amostra de solo homogêneo, o potencial matricial apresenta um valor característico de teor de umidade. Do mesmo modo, o gráfico que relaciona potencial matricial em função da umidade do solo passa a ser uma característica da amostra, denominada curva característica de água no solo ou curva de retenção (KLAR, 1984; REICHARDT e TIMM, 2004).

A curva de retenção é o gráfico que relaciona a quantidade de água no solo (massa ou volume) com o potencial mátrico, ou ainda, é a curva que relaciona a quantidade de solução no solo em equilíbrio com a tensão aplicada (LIBARDI, 1995). As dificuldades para a confecção das curvas de retenção envolvem desde a coleta das amostras a processos laboratoriais, além de se questionarem o número de amostras necessárias e a maneira de coleta para obter-se uma curva de retenção representativa. A curva característica de umidade do solo é uma característica do solo, sendo variável de amostra para amostra e de local para local. Assim, a identificação das características de áreas maiores deverá envolver repetições que apresentem médias representativas (KLAR, 1984; REICHARDT, 1987).

A determinação da umidade do solo pode ser realizada por métodos diretos (gravimetria) ou métodos indiretos (tensiômetros, blocos de resistência elétrica, sonda de neutrons e reflectometria no domínio do tempo – TDR). No entanto, neste trabalho serão abordados apenas os métodos da tensiometria e da reflectometria no domínio do tempo – TDR, por estes fazerem parte da metodologia adotada no presente estudo.

#### 2.2.4.2 Tensiometria

Os tensiômetros foram desenvolvidos em 1922 por Gardner e colaboradores, possibilitando a obtenção direta do potencial de água no solo, e de forma indireta o conteúdo de água do solo (COELHO e TEIXEIRA, 2004). Tal instrumento consiste de uma câmara,

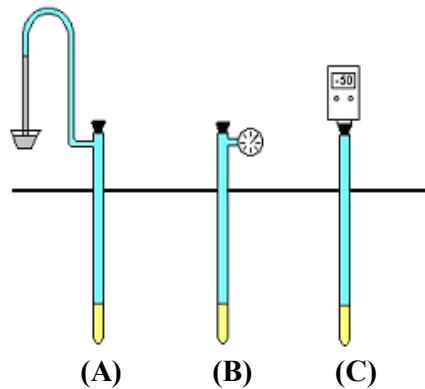
geralmente de plástico (PVC), preenchida com água, tendo na sua extremidade inferior uma cápsula porosa de cerâmica, e na extremidade superior um manômetro (KLAR, 1984; REICHARDT e TIMM, 2004). As cápsulas utilizadas nos tensiômetros são construídas com porosidade que forneça pressão de borbulhamento mínima de 0,1 MPa (100 kPa), possibilitando uma alta e uniforme condutância (LIBARDI, 1995). A câmara, por ser hermeticamente fechada, não permite a entrada de ar.

Os tensiômetros possibilitam quantificar o estado de energia com que a água fica retida entre os poros e os agregados sólidos do solo (matriz do solo), funcionando como um indicador do momento de iniciar-se a irrigação (FUSP, 2002). Assim, estes aparelhos medem o componente matricial do potencial de água no solo, sendo seus valores expressos em centibars (cbar), atmosfera (atm), metro ou centímetro de coluna de água (cm. H<sub>2</sub>O), ou ainda, milímetro de mercúrio (mmHg) ou quilopascal (kPa) (REICHARDT, 1996; RESENDE e ALBUQUERQUE, 2002; COUTO, 2007).

O princípio de funcionamento do tensiômetro baseia-se na formação do equilíbrio entre a solução do solo e a água contida no aparelho, visto que diferenças de potencial entre dois pontos possibilitam o fluxo de água do ponto de maior potencial para o ponto de menor potencial, na tendência natural de toda matéria atingir o equilíbrio. Dependendo do teor de umidade do solo, o equilíbrio é obtido com maior ou menor quantidade de água entre o interior do aparelho e o solo. Caso a água do solo esteja sob tensão, exercerá uma sucção retirando a água do instrumento, com conseqüente redução de sua pressão interna. Como o equipamento é vedado ocorrerá a formação de vácuo no interior da câmara, originando uma pressão negativa que será medida pelo manômetro, correspondendo ao potencial matricial de água no solo (REICHARDT e TIMM, 2004; TEIXEIRA et al., 2005; COUTO, 2007). Para o funcionamento adequado do tensiômetro é necessário que haja uma continuidade hidráulica desde a membrana porosa até o manômetro, além da ausência de ar aprisionado no interior do tensiômetro (KLAR, 1984).

Os tensiômetros podem ser de diversos tipos e marcas, porém o princípio físico que fundamenta o instrumento é sempre o mesmo (FUSP, 2002). Os diversos tipos de tensiômetros diferem somente quanto a leitura ou natureza do trabalho onde são utilizados, sendo os tipos mais comuns os tensiômetros de coluna de mercúrio, os tensiômetro com vacuômetro e os tensiômetros com transdutor de pressão (Figura 2) (RESENDE e ALBUQUERQUE, 2002). De acordo com Dirksen (1999) a performance de um tensiômetro depende, em primeiro lugar, da sensibilidade do manômetro utilizado. Assim, manômetros de

água apresentam menor sensibilidade, enquanto que os transdutores de pressão e manômetros de mercúrio são mais precisos.



**Figura 2** – Tipos mais comuns de tensiômetros: (A) de coluna de mercúrio; (B) com vacuômetro; (C) com transdutor de pressão ou tensímetro. Fonte: Adaptado de Resende e Albuquerque (2002).

As medidas realizadas com tensiômetros não fornecem resultados com absoluta acurácia, estando sujeitas a diversas fontes de erro. Na maioria das vezes, os problemas estão relacionados à representatividade das suas medidas, especialmente por serem influenciadas pela variabilidade espacial das características físicas do solo, pelas determinações serem relativamente localizadas ou mesmo pontuais; além das dificuldades operacionais, freqüentemente observadas na utilização dos equipamentos de determinação da umidade volumétrica do solo (SCALOPPI e SANTOS, 1999; VILLAGRA et al., 1998). Tucci (1993) menciona que a maior limitação dos tensiômetros está relacionada ao intervalo da leitura e ao tempo de resposta.

Reichardt e Timm (2004) mencionam que a determinação do potencial matricial em tensiômetros é limitada para valores menores que 1 atm, pois este equipamento mede pressões manométricas (vácuo) com relação a pressão atmosférica externa. Assim, quando a tensão atinge valores altos, próximos a -1 atm ocorre a formação de bolhas de ar que interferem no equilíbrio, chegando a romper a coluna de água. Desta forma, na prática, a medida direta do potencial matricial da água do solo, em condições de campo, é adequada e indicada apenas para potenciais que variam de 0 a 0,85 atm (85 kPa), em função da tendência do ar penetrar em potenciais menores, fazendo com que o aparelho deixe de funcionar. No entanto, apesar dos limites de água no solo poderem variar desde - 10 kPa (capacidade de campo) até -1500 kPa (ponto de murcha permanente), esta estreita faixa do potencial matricial que é coberta

pelo tensiômetro constitui a faixa de interesse do manejo de irrigação para a maioria dos solos agrícolas brasileiros (REICHARDT e TIMM, 2004).

#### 2.2.4.3 Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR)

A medida de umidade volumétrica com o auxílio do TDR se baseia na determinação da constante dielétrica do solo. A constante dielétrica é determinada por meio da velocidade de propagação de ondas eletromagnéticas de alta frequência (superiores a 50 MHz) que se propagam ao longo de condutores metálicos (hastes paralelas de metal) introduzidas no solo (NOBORIO, 2001). Como o componente que possui a maior influência sobre os valores da constante dielétrica do solo é a água, pode-se estimar a umidade volumétrica do solo em função de sua constante dielétrica (ZEGELIN et al., 1989).

A Tabela 1 apresenta os valores de constantes dielétricas de alguns materiais presentes no solo.

**Tabela 1** – Constante dielétrica de diferentes meios e materiais constituintes da matriz do solo.

Material	Constante dielétrica
Ar	1
Água (a 20 °C)	81
Gelo (a 5 °C)	3
Basalto	12
Granito	7 – 9
Arenito	9 – 11

Fonte: Noborio (2001).

Topp et al. (1980) realizaram os primeiros trabalhos com equipamento TDR, onde propuseram uma relação empírica entre a umidade do solo ( $\theta$ ) e a constante dielétrica ( $K_a$ ), a qual segundo os autores serve para uma ampla gama de tipos e texturas de solos. Por tal motivo esta equação ficou conhecida como equação universal de calibração do TDR, descrita por:

$$\theta = 0,053 + 0,0229 K_a - 0,00055 K_a^2 + 0,0000043 K_a^3 \quad (1)$$

Sendo:  $\theta$  = umidade volumétrica do solo, ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ );  $k_a$  = constante dielétrica do solo.



Segundo Tommaselli (1997) entre as vantagens da técnica do TDR destaca-se o fato de possibilitar medidas diretas e não destrutivas, além de não apresentar riscos ao operador do equipamento. Como desvantagens, destaca-se a dependência do tipo de solo (orgânico ou mineral), dos materiais magnéticos presentes no solo, o custo elevado do equipamento e ainda a sua calibração trabalhosa. Jacobsen & Schjonning (1993) comentam que variáveis como densidade do solo, textura, matéria orgânica, entre outras, devem ser incluídos no sentido de abranger uma ampla faixa de solos com características variadas. No entanto, Topp et al. (1980) afirmam que as características ambientais do solo como textura, densidade, estrutura, teor de sais e temperatura, não afetam a medição do conteúdo de água com o TDR, de forma que é desnecessária a calibração em diferentes tipos de solos. Assim, Tommaselli (1997) ressalta que a calibração seria universal, bastando estabelecer-se a relação existente entre a velocidade de propagação e a umidade do solo. Desta forma, muitos equipamentos TDR trazem uma tabela de calibração universal, sugerida pelo fabricante, baseada no modelo proposto por Topp et al. (1980), apesar dos vários estudos realizados mundialmente com o objetivo de propor modelos de calibração para cada tipo de solo.

Tommaselli e Bacchi (2001) comentam que os modelos empíricos de calibração pressupõem que a relação entre a constante dielétrica aparente e o conteúdo de água do solo é dependente apenas deste último e com base nisto Topp et al. (1980) desenvolveram uma curva de calibração considerando-a como universal. No entanto, estudos demonstram que a textura do solo não deve ser desprezada, principalmente no caso de solos argilosos. Zegelin et al. (1982) e Roth et al. (1990) comentam que a equação de Topp et al. (1980) apresenta bom ajuste em solos de textura grossa, funcionando melhor para solos arenosos, mas não tem bom desempenho em solos de textura fina, como no caso de solos argilosos. Tommaselli (1997) afirma que os teores de óxidos de ferro e manganês do solo não são variáveis significativas, ao contrário de Roth et al. (1992) que detectaram variações na curva de calibração para solos com altos teores de óxido de ferro.

### 2.2.5 Evapotranspiração

O termo evaporação refere-se ao fenômeno pelo qual a água passa da fase líquida para a fase gasosa, podendo ocorrer tanto em massas contínuas (mar, lagos e rios) quanto em superfície úmida (solo e plantas) (TUCCI, 1993; PEREIRA et al. 1997). Já a transpiração

corresponde a evaporação da água utilizada nos diversos processos metabólicos necessários ao crescimento e desenvolvimento das plantas, através dos seus estômatos (REICHARDT e TIMM, 2004). A ocorrência simultânea destes dois fenômenos na natureza constitui a evapotranspiração (ETP), geralmente expressa como lâmina de água por unidade de tempo ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) (BURMAN et al., 1983).

Segundo Raudkivi (1979) a evapotranspiração assume papel importante no ciclo hidrológico, sendo responsável pelo retorno à atmosfera de aproximadamente 70% da precipitação anual na superfície terrestre, representando assim uma parcela significativa nos estudos de balanço hídrico e nos projetos de recursos hídricos. Informações quantitativas deste processo podem ser utilizadas na resolução de numerosos problemas que envolvem o manejo da água. Tanto para o planejamento de áreas agrícolas irrigadas, quanto para a previsão de cheias ou a construção de reservatórios, são requeridos dados confiáveis de evapotranspiração (MORAES, 2007). Contudo, para a avaliação do balanço hídrico de uma região, se faz necessário o conhecimento dos diferentes conceitos de evapotranspiração:

- Evapotranspiração Potencial (ETp) → Termo introduzido por Thornthwaite (1948) referindo-se ao processo de perda máxima de água para a atmosfera pela ocorrência simultânea dos processos de transpiração e evaporação, através de uma superfície natural gramada, padrão, sem restrição hídrica, e em crescimento ativo (PEREIRA et al. 1997; TOMASELLA e ROSSATO, 2005). Mais tarde, Penman (1956) adotou o conceito de evapotranspiração potencial como sendo a quantidade de água transferida para a atmosfera por evaporação e transpiração, na unidade de tempo e de área, por uma cultura de porte baixo (vegetação rasteira), verde, de altura uniforme e sem deficiência hídrica, que cobre totalmente a superfície do solo (SEDIYAMA, 1996; REICHARDT e TIMM, 2004).
- Evapotranspiração Real (ETr) → A evapotranspiração real corresponde a quantidade de água realmente utilizada por uma extensa superfície vegetada com grama, em crescimento ativo, cobrindo totalmente o solo, porém, com ou sem restrição hídrica, podendo a evapotranspiração real ser igual ou menor a evapotranspiração potencial (UNESCO, 1982; TUCCI, 1993; SENTELHAS et al., 1999). Pode-se ainda dizer que a evapotranspiração real é aquela que ocorre em uma superfície vegetada, independente de sua área, de seu porte e das condições de umidade do solo, ocorrendo em qualquer circunstância, sem imposição de qualquer condição de contorno (PEREIRA et al., 1997; TOMASELLA e ROSSATO, 2005).

- Evapotranspiração de Referência (ET<sub>o</sub>) → Termo inicialmente introduzido por Jensen et al. (1971), a evapotranspiração de referência representa uma extensão da definição original de Penman (1956). No entanto, somente depois da adoção do boletim FAO-24 elaborado por Doorenbos e Pruitt (1977) é que tal definição se popularizou. Assim, Doorenbos e Pruitt (1977) definiram a evapotranspiração de referência como sendo a evapotranspiração de uma área com vegetação rasteira (grama), em crescimento ativo, mantida a uma altura uniforme de 0,08 a 0,15 m de altura e bem adaptada às condições locais. O mais recente conceito de evapotranspiração de referência foi proposto por Allen et al. (1998) no Boletim nº 56 da FAO, definindo-a como sendo a evapotranspiração de uma cultura hipotética, com altura fixa de 0,12m, albedo igual a 0,23, e resistência da superfície ao transporte de vapor d'água igual a 70s m<sup>-1</sup>. A cultura hipotética está relacionada a uma superfície gramada, de altura uniforme, possuindo em torno de 3m<sup>2</sup> de índice de área foliar (IAF) por m<sup>2</sup> de terreno ocupado, assemelhando-se a uma superfície verde, em crescimento ativo, cobrindo totalmente a superfície do solo e sem restrição hídrica.

#### 2.2.5.1 Fatores que influenciam na evapotranspiração

A evapotranspiração é um processo físico diretamente relacionado à disponibilidade de energia na superfície, sendo a radiação solar e a umidade do solo considerados as principais fontes de energia necessárias para suprir a demanda da evapotranspiração (OMETTO, 1981). Camargo e Camargo (2000) citam que a radiação é dependente do local (latitude), da topografia da região e da época do ano. Assim, nos trópicos a energia solar e a evapotranspiração, no curso do ano, são significativamente mais elevadas que em clima temperado; e mais elevadas no verão que no inverno (CAMARGO e CAMARGO, 2000). Além disso, a altitude afeta diretamente a temperatura do solo e do ar, bem como a pressão atmosférica, fatores que também estão diretamente relacionados com a evapotranspiração. Desse modo, setores topograficamente mais baixos, próximos ao lençol freático, como nas zonas ripárias, pântanos e nascentes, apresentam maior disponibilidade de água para as plantas transpirem (BACELLAR, 2005).

Conforme Bacellar (2005), a vegetação assume grande influência sobre o processo evaporativo, visto que árvores evapotranspiram mais que a vegetação de menor porte

(gramíneas, arbustos e culturas agrícolas), especialmente por apresentarem sistema radicular mais profundo. Por tal razão, o perfil de solo tende a ser em média menos úmido sob florestas. Para um determinado local, a disponibilidade de radiação é controlada ainda pelo poder refletor da superfície, que é expresso pelo coeficiente de reflexão (albedo). Superfícies mais claras refletem mais que aquelas mais escuras e, portanto, têm menos energia disponível. Assim, uma vegetação mais escura, a exemplo das florestas, reflete menos radiação solar que uma cultura agrícola ou um gramado. Logo, sob mesmas condições climáticas, uma floresta evapotranspira mais que uma vegetação rasteira (PEREIRA et al., 1997).

#### 2.2.5.2 Determinação da evapotranspiração

Medidas diretas da evapotranspiração são raras, especialmente pela dificuldade de quantificação com aparelhos normalmente utilizados em estações meteorológicas. Neste caso, recomenda-se o uso de estimativas oriundas de modelos físicos ou empíricos (TUCCI, 1993), com destaque para o modelo de Thornthwaite, pela facilidade dos cálculos; e o modelo de Penman-Monteith, pela precisão dos resultados (PEREIRA et al., 1997). Berlatto e Molion (1981) salientam que no momento da escolha de um método para a determinação da evapotranspiração deve-se considerar a praticidade e precisão, pois, apesar dos métodos teóricos e micrometeorológicos serem baseados em princípios físicos, eles apresentam algumas limitações, o que pode restringir a sua utilização.

Segundo Carvalho e Stipp (2004), o critério para adoção de um dos diferentes métodos de estimativa de evapotranspiração baseia-se na dependência de uma série de fatores, dentre eles, a disponibilidade de dados meteorológicos, a escala de tempo requerida, além das condições climáticas para as quais o método foi desenvolvido. Sedyama (1996) ressalta que o método ideal deve incorporar todos os fatores que influenciam na evapotranspiração, tais como a morfologia da planta, a taxa de crescimento da cobertura da superfície pela planta, as condições de solo, e as condições microclimáticas nos aspectos dos processos de transferências de energia e massa.

Os modelos matemáticos são também empregados na comparação entre dados medidos e simulados, como forma de se buscar um método de avaliação que represente da melhor forma possível o que ocorre na natureza. Por meio desses modelos, efetua-se o acompanhamento dos parâmetros naturais de forma simples e a baixo custo, além da

possibilidade de simular panoramas futuros, o que é fundamental no que se refere à gestão dos recursos hídricos (LIMA et al., 2001).

Em análise quantitativa, a evapotranspiração tem sua determinação baseada em métodos diretos e métodos indiretos. Mendes (2006) comenta que embora o uso de lisímetros seja uma ferramenta teórica muito precisa para se quantificar diretamente a evapotranspiração, a instalação e manejo deste instrumento é sempre difícil e onerosa. Assim, os métodos diretos são utilizados apenas para finalidades científicas (CARVALHO et al., 2006). Quanto aos modelos indiretos, Pereira et al. (1997) descreve diversos métodos para a estimativa da evapotranspiração, tais como: Thornthwaite (1948), Monteith (1965), Radiação Solar (Doorenbos e Pruitt, 1977), Hargreaves (1977), Blaney-Criddle (1977), Penman-Monteith (Allen et al., 1998), dentre outros. As diferentes equações necessitam de ajustes às condições locais, em função de apresentarem em determinadas épocas do ano super ou sub estimativas, dependendo do clima da região.

### **2.3 Lisímetros**

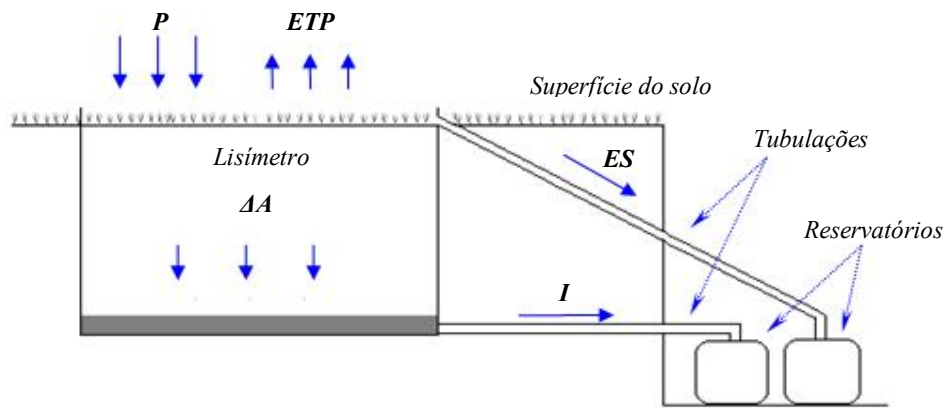
De acordo com Aboukhaled et al. (1982) os lisímetros vêm sendo utilizados há cerca de 300 anos e, sem dúvida alguma, continuam sendo considerados a principal ferramenta para estudos de evapotranspiração e do balanço hídrico. O primeiro relato do uso de lisímetros ocorreu na França em 1688, onde La Hire utilizou recipientes de chumbo preenchidos com solo, observando a perda de água dos lisímetros sob duas condições de cobertura do solo (cobertos com grama e sem cobertura).

Os lisímetros são equipamentos que consistem de uma caixa impermeável, contendo um volume de solo representativo, permitindo o conhecimento com detalhes de alguns termos do balanço hídrico do volume amostrado (PEREIRA et al., 1997). Conforme Tucci (1993), as variáveis controladas junto ao lisímetro são a precipitação, o escoamento, a infiltração e o armazenamento permitindo dessa forma a obtenção da evapotranspiração real e/ou potencial.

Os lisímetros podem ser classificados em duas categorias de acordo com o seu mecanismo de funcionamento:

- (1) lisímetros de pesagem (mecânica, eletrônica, hidráulica e de flutuação).
- (2) lisímetros não - pesáveis (drenagem e compensação com lençol freático constante).

A Figura 3 apresenta uma representação esquemática de um lisímetro de drenagem e as variáveis controladas junto ao mesmo.



**Figura 3** – Representação esquemática das variáveis controladas em um lisímetro de drenagem. ET = evapotranspiração; P = precipitação;  $\Delta A$  = variação no armazenamento entre o início e o fim do intervalo de tempo; I = infiltração; ES = escoamento superficial.

Assim o balanço hídrico junto ao lisímetro pode ser dado pela equação da continuidade:

$$ET = P - I - ES \pm \Delta A \quad (2)$$

Sendo: ET = Evapotranspiração; P = Precipitação; I = Infiltração; ES = Escoamento superficial;  $\Delta A$  = Variação no armazenamento entre o início e o fim do intervalo de tempo considerado.

Allen et al. (1991) apresentam extensa revisão sobre diversos tipos de lisímetros, destacando os de pesagem como os mais precisos. Os lisímetros de drenagem caracterizam-se por serem os mais baratos e funcionam adequadamente apenas em períodos longos de observação (7 a 10 dias), devendo ser conduzidas irrigações periódicas para manter a variação do armazenamento nula, com conseqüente drenagem. A quantidade de água que ultrapassa o valor da capacidade de campo é drenada para o fundo do tanque, e conduzida para um poço coletor onde é medida em um recipiente graduado (BÍSCARO, 2007).

Pereira et al. (1997) citam que a construção de lisímetros requer alto investimento, sendo quase sempre utilizado como método de aferição, por fornecer maior precisão na determinação da evapotranspiração. Aboukhaled et al. (1982) alertam que os lisímetros devem ser grandes e instalados na maior profundidade possível, no intuito de evitar restrição ao

desenvolvimento das raízes. Camargo (1962) e Allen et al. (1991) mencionam que as condições dentro e fora do lisímetro devem ser mantidas idênticas para evitar o efeito “oásis”, comum em áreas úmidas circundadas por áreas secas, ou ainda a ocorrência do efeito “buquê”, resultante do crescimento de plantas maiores no interior do lisímetro. Estas diferenças em crescimento das culturas no interior dos lisímetros em relação à área externa provocam uma perturbação maior no movimento horizontal do ar, com aumento do grau de turbulência do calor sensível do ar sobre a cultura, elevando a transpiração da vegetação. Além disso, a vegetação plantada em seu interior deve ser da mesma espécie, altura e densidade da vegetação externa (SEDIYAMA, 1996).

As condições físicas do solo no interior do lisímetro devem aproximar-se o quanto possível das condições do solo nas suas vizinhanças. Marques (1972) afirma que caso a transferência de calor entre o solo no interior e no exterior do lisímetro seja diferente ocorrerão erros de medida, ocasionados pela condutividade térmica distinta dos meios, e perturbação causada pela acomodação do solo no interior do lisímetro. Allen et al. (1991) afirmam que quando as medidas obtidas por meio de lisímetros diferem das estimativas feitas por modelos com forte base física, como o método de Penman-Monteith, é possível que o lisímetro não esteja representando as condições ambientais reais da área de estudo.

## 3 MATERIAL E MÉTODOS

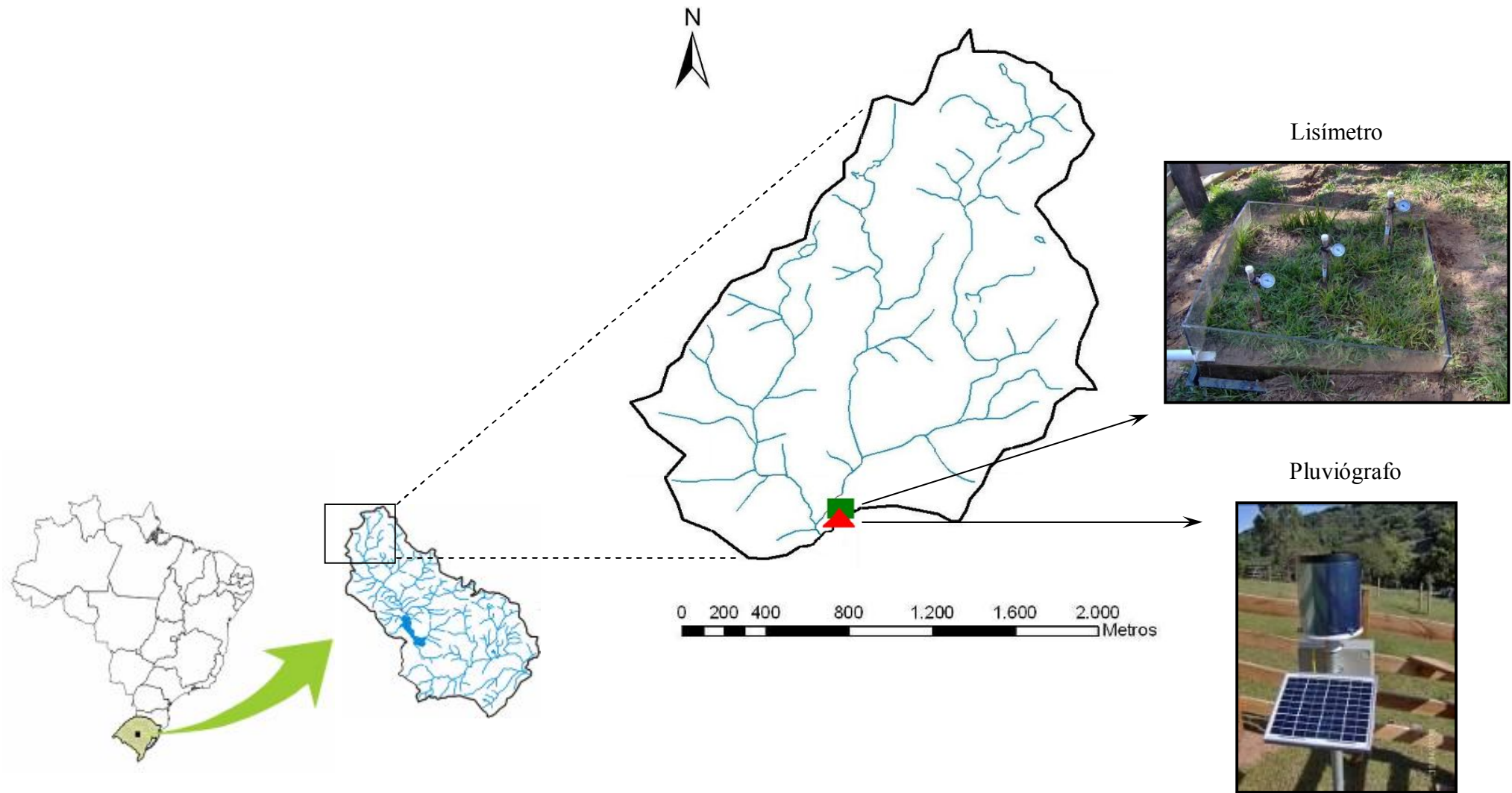
### 3.1 Área de estudo

#### 3.1.1 Caracterização geral

A sub-bacia Rancho do Amaral situa-se na cabeceira do Rio Vacacaí Mirim, sendo um importante afluente do Arroio Vacacaí Mirim e uma das sub-bacias contribuintes ao reservatório do DNOS, o qual é responsável por 40 % do abastecimento público da cidade de Santa Maria. Localizada na região central do estado do Rio Grande do Sul entre os municípios de Santa Maria e Itaára (coordenadas geográficas 53° 48' 39,8" longitude Oeste e 29° 37' 49,7" latitude Sul), a sub-bacia Rancho do Amaral abrange uma área aproximada de 4,5 Km<sup>2</sup>, onde predominam áreas de mata nativa característica do bioma Mata Atlântica, além áreas de campo nativo, pastagens, agricultura e plantios de eucalipto (*Eucalyptus* sp). O relevo da região é acidentado com fortes ondulações, apresentando vales em forma de “V” por onde correm os cursos de água constituintes ao sistema de drenagem da sub-bacia. O comprimento do rio principal é de 2,1 Km e a diferença de cota entre a nascente e o exutório de 220 m. O lisímetro encontra-se instalado próximo ao exutório da sub-bacia Rancho do Amaral, em uma área de campo nativo, onde predomina a gramínea conhecida como grama forquilha (*Paspalum notatum*), a qual se apresenta em crescimento ativo, cobrindo totalmente a superfície do solo e com altura uniforme em torno de 0,08 a 0,10 m.

A Figura 4 apresenta o mapa de localização da sub-bacia Rancho do Amaral com respectivos pontos de monitoramento e equipamentos instalados.



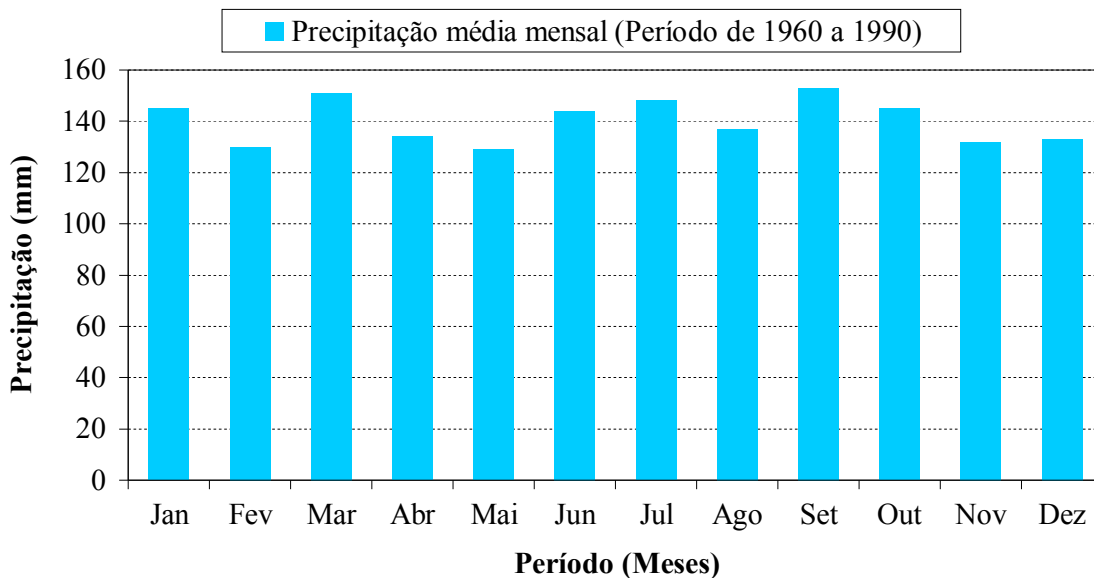


**Figura 4** – Área de estudo: Bacia hidrográfica do Arroio Vacacaí Mirim e sub-bacia Rancho do Amaral, com respectivos pontos de monitoramento.

### 3.1.2 Clima

O clima da região, conforme o sistema de classificação de Köppen é do tipo subtropical Cfa, caracterizado pela ocorrência de precipitações durante todos os meses do ano, sem grande diferença quantitativa entre o mês mais chuvoso e o mês mais seco. A precipitação média anual varia de 1.700 a 1.800 mm, com uma frequência de 113 dias. Entretanto, a região pode sofrer um déficit anual superior a 200 mm de precipitação. A temperatura média anual situa-se em torno de 19,3°C, sendo a média das temperaturas máximas do mês mais quente (janeiro) de 31,5°C, e do mês mais frio (julho) de 9,3°C. A umidade relativa do ar média anual é de 82%, com ventos predominantes de leste e sudoeste, além dos ventos que sopram do quadrante norte (MORENO 1961).

Analisando-se os valores médios das precipitações mensais para a região da cidade de Santa Maria observa-se que as precipitações são bastante homogêneas, variando de 130 a 150 mm mensais ao longo de todo ano (Figura 5).



**Figura 5** – Normais climatológicas observadas para a região de Santa Maria (RS) entre os períodos de 1960 a 1990 (Fonte: CPTEC/INPE).

### 3.1.3 Obtenção de informações cartográficas e classificação dos solos da bacia

Os mapas da rede de drenagem, do relevo, de uso e classificação do solo da sub-bacia Rancho do Amaral foram obtidos com base na imagem de satélite IKONOS, a qual foi processada com o auxílio do software ArcGis 9.2. Para a classificação e mapeamento dos solos presentes na sub-bacia Rancho do Amaral utilizaram-se como base os trabalhos de Dias (2003) e Casagrande (2004), nos quais consta o mapa de solos da bacia hidrográfica do arroio Vacacaí Mirim, elaborado conforme o mapa detalhado de solos, em escala 1:100000, confeccionado por Azolin e Mutti (1988). A classificação dos solos foi atualizada conforme o novo Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, sugerido pela Empresa Brasileira de Pesquisas Agropecuárias-EMBRAPA (1999).

De acordo com Azolin e Mutti (1988), os tipos de solos presentes na sub-bacia Rancho do Amaral são:

Rd<sub>1</sub>: Solo Litólico distrófico relevo ondulado;

Re<sub>4</sub>: Solo Litólico Eutrófico Relevo Montanhoso;

Re-C-Co: Associação Solo Litólico Eutrófico-Cambissolo-Colúvios;

TBa-Rd: Associação Terra Bruna - Estruturada Álica e Solo Litólico Distrófico.

Conforme o novo sistema de classificação de solos da EMBRAPA (1999), a denominação dos solos presentes na sub-bacia Rancho do Amaral passa a ser:

Rd<sub>1</sub>: Neossolo Litólico Distrófico relevo ondulado;

Re<sub>4</sub>: Neossolo Litólico Eutrófico Chernossólico;

Re-C-Co: Associação Neossolo Litólico Eutrófico Chernossólico-Cambissolo-Colúvios;

TBa-Rd: Associação Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico Alissólico e Neossolo Litólico Eutrófico.

### 3.1.4 Caracterização físico-hídrica do solo

Para a caracterização físico-hídrica do solo contido no lisímetro, realizou-se a coleta de amostras não deformadas de solo nas profundidades de 10, 30 e 70 cm, em áreas próximas ao local onde foi instalado o lisímetro. As amostras foram enviadas ao Laboratório de Física do

Solo da Universidade Federal de Santa Maria, onde foram realizadas análises de densidade do solo, densidade de partículas e porosidade do solo. A distribuição granulométrica do solo foi realizada conforme os métodos de análise de solo publicados no boletim nº 7 do Ministério da Agricultura (VETTORI, 1969) e a classe textural do solo foi determinada segundo classificação estabelecida pela Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.

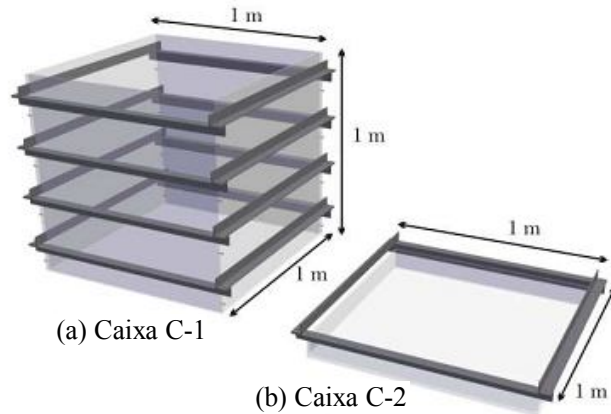
A curva característica do conteúdo volumétrico de água no solo para cada uma das profundidades amostradas (10, 30 e 70 cm), foi determinada em laboratório utilizando-se panela de pressão. Para a determinação dos valores de capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP), referentes a cada uma das profundidades analisadas, assumiram-se os valores de potencial matricial igual a -10 kPa e -1500 kPa, respectivamente, sendo a água disponível (AD) igual a diferença entre estes valores. O ajuste da curva foi realizado através da equação de GENUCHTEN (1980):

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha \Psi_m)^n]^b} \quad (3)$$

Sendo:  $\theta$  = conteúdo volumétrico de água no solo, em (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>);  $\theta_r$  = conteúdo volumétrico de água residual do solo (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>);  $\theta_s$  = conteúdo volumétrico de água na saturação do solo (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>);  $\alpha$ ,  $n$  e  $b$  = coeficientes empíricos;  $\Psi_m$  = potencial matricial de água no solo (kPa).

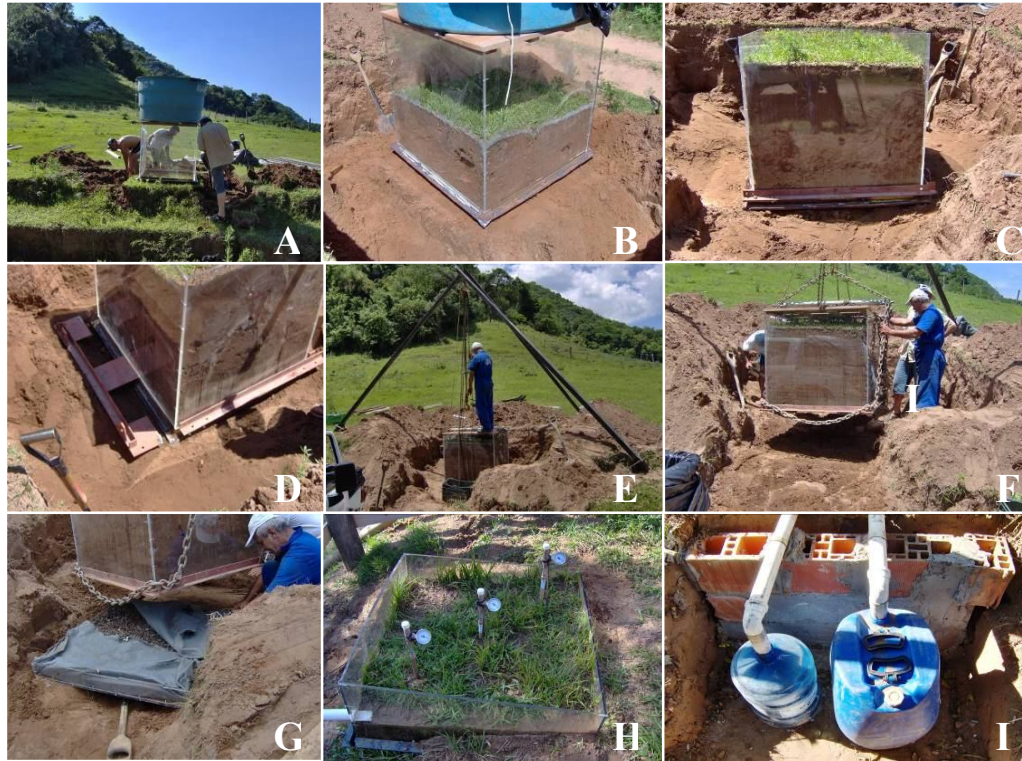
### 3.2 Instalação do lisímetro

Para o monitoramento das variáveis hidrológicas envolvidas no presente estudo utilizou-se um lisímetro de drenagem, contendo em seu interior uma amostra representativa de solo não deformado, com volume de 1 m<sup>3</sup> e área superficial de 1 m<sup>2</sup>. O equipamento foi confeccionado pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH-UFRGS), sendo constituído de placas de acrílico de espessura igual a ½”, coladas e parafusadas. O equipamento é formado por uma caixa vazada utilizada para a coleta da amostra do solo (Caixa C-1) e uma caixa que serve de base para o lisímetro (Caixa C-2), conforme Figura 6. A vantagem do uso deste lisímetro é a possibilidade de coletar-se a amostra não deformada do solo a ser estudado, preservando assim, suas características físicas de forma a obter resultados mais fiéis a realidade.



**Figura 6** – Lisímetro de drenagem: (a) Caixa C-1: Caixa vazada utilizada para a coleta da amostra do solo; (b) Caixa C-2: base do lisímetro. Fonte: Oliveira (2006).

A instalação do lisímetro ocorreu entre os dias 06 e 11 de novembro de 2007. Tal operação foi realizada por meio de escavação manual de uma trincheira ao redor da Caixa C-1 (Figuras 7A e 7B). Após a penetração da Caixa C-1 até aproximadamente 1 m de profundidade, foram introduzidas lâminas metálicas sob a sua base, efetuando o corte do volume de solo amostrado e servindo de sustentação para o bloco de solo coletado no interior da Caixa C-1 (Figuras 7C e 7D). Posteriormente, instalou-se um tripé metálico sobre a Caixa C-1, sendo o perfil de solo contido no interior desta, suspenso com o auxílio de uma talha e de correntes (Figuras 7E e 7F). Com a Caixa C-1 suspensa, procedeu-se o nivelamento do solo sob a mesma para colocação da base do lisímetro (Caixa C-2). O interior Caixa C-2 foi então preenchido com uma camada de brita envolta por uma manta sintética (bidim), de modo a evitar o entupimento e propiciar um melhor funcionamento do sistema de drenagem (Figura 7G). Após tal procedimento, a Caixa C-1 foi unida a Caixa C-2 com uso de silicone entre suas junções e no interior do lisímetro foram instalados tensiômetros do tipo vacuômetro nas profundidades de 10, 30 e 70 cm (Figura 7H). Na parte frontal do lisímetro foram feitos dois orifícios, um no nível da superfície do terreno, onde foi colocada a tubulação para coleta do escoamento superficial; e outro próximo do fundo do lisímetro, para coleta da drenagem decorrente da infiltração de água no solo. Tais tubulações foram construídas com tubos de PVC com 50 mm de diâmetro, conectando o lisímetro aos respectivos reservatórios de coleta do escoamento superficial e da drenagem (Figura 7I).



**Figura 7** – Instalação do lisímetro para o monitoramento do balanço hídrico na sub-bacia Rancho do Amaral.

### 3.3 Monitoramento das variáveis hidrológicas envolvidas no estudo

#### 3.3.1 Monitoramento da variação do armazenamento de água no solo

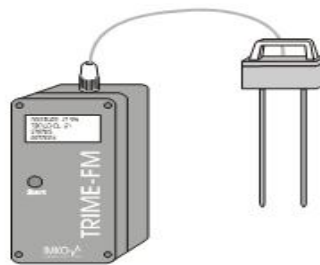
Devido a problemas na importação do equipamento TDR, até fevereiro de 2009 o monitoramento do conteúdo de água no solo no interior do lisímetro foi realizado por meio de tensiômetros do tipo vacuômetro instalados nas profundidades de 10, 30 e 70 cm. Tal monitoramento consistiu de leituras diárias da tensão de água no solo, cujos dados foram computados e relacionados com a curva de retenção de água para este solo, possibilitando a obtenção dos valores do conteúdo de água no solo correspondentes a cada um dos valores de tensão. O armazenamento acumulado de água no solo foi calculado pela regra do trapézio, conforme Libardi (1995). Assim, a variação do armazenamento de água no perfil do solo foi

determinada pela diferença entre os valores do conteúdo de água do solo, obtidos no tempo inicial e final de cada período considerado (período diário), utilizando-se a seguinte equação:

$$\Delta A = A_{(f)} - A_{(i)} \quad (4)$$

Sendo:  $\Delta A$  = variação no armazenamento de água do solo (mm);  $A_{(f)}$  = armazenamento final de água no solo (mm) e  $A_{(i)}$  = armazenamento inicial de água no solo (mm).

A partir de fevereiro de 2009 o monitoramento do armazenamento de água no solo passou também a ser realizado por meio da técnica de reflectometria no domínio do tempo (TDR). Nesse estudo utilizou-se um equipamento TDR, modelo TRIME – FM da marca IMKO constituído de uma sonda de 2 hastes paralelas (Figura 8). Segundo o fabricante, o software embutido no equipamento utiliza a equação universal de Topp et al. (1980) para quantificar o conteúdo volumétrico de água no solo em função da constante dielétrica.



**Figura 8** – Equipamento TDR TRIME – FM da marca IMKO constituído de sonda de 2 hastes paralelas, utilizado no monitoramento do conteúdo de água no solo. Fonte: (IMKO).

Para não afetar a estrutura do solo no interior do lisímetro, a sonda do equipamento TDR foi instalada do lado de fora do lisímetro, nas suas proximidades e a uma profundidade de 30 cm. As leituras registradas pelo TDR foram comparadas com as leituras obtidas a partir do tensiômetro instalado na mesma profundidade, no interior do lisímetro.

### 3.3.2 Monitoramento da precipitação, do escoamento superficial e da drenagem

A precipitação foi monitorada por meio de uma estação pluviográfica, dotada de um pluviógrafo eletrônico do tipo cubas basculantes, da marca HIDROMEC<sup>®</sup>, com área de captação de 400cm<sup>2</sup>, permitindo monitorar a precipitação em intervalos de tempo de até 1

minuto e com uma precisão de até 0,2 mm. O monitoramento do escoamento superficial e da drenagem do interior do lisímetro, inicialmente foi realizado de forma volumétrica, utilizando-se galões de 20 e 60 litros respectivamente, conectados ao lisímetro por meio de tubulação de PVC. Assim, a água proveniente dos processos de escoamento superficial e drenagem foi coletada manualmente a cada evento de chuva, sendo os respectivos volumes medidos por meio de provetas e pesados com o uso de balança digital. A partir de janeiro de 2009, tais medições passaram a ser realizadas por meio de pluviógrafos do tipo cubas basculantes, propiciando uma melhor avaliação dos processos de drenagem e escoamento superficial ocorridos no lisímetro, bem como seu comportamento no decorrer de cada evento chuvoso.

### 3.3.3 Cálculo do balanço hídrico e da evapotranspiração

A avaliação do balanço hídrico, realizado com determinações lisimétricas, considerou diferentes escalas temporais, sendo a evapotranspiração obtida para períodos diários, períodos de 5 dias (quinquidial) e períodos de 10 dias (decendial), compreendidos entre janeiro e abril de 2009. Conforme comentado anteriormente, utilizou-se um lisímetro de drenagem, contendo em seu interior uma amostra de solo não-deformado, com volume de  $1 \text{ m}^3$  e cobertura vegetal natural (campo nativo). O balanço hídrico junto ao lisímetro foi elaborado seguindo a equação da continuidade de massa (Equação 2) descrita na página 22 deste trabalho.

### 3.3.4 Análise dos dados coletados

Devido a ocorrência de problemas estruturais com o lisímetro, a avaliação das variáveis escoamento superficial, drenagem e evapotranspiração foi prejudicada durante o período anterior ao concerto do lisímetro (junho de 2008 a dezembro de 2008), sendo estas variáveis analisadas apenas para o período posterior ao concerto do lisímetro (janeiro de 2009 a abril de 2009). Já para as variáveis precipitação e armazenamento de água no solo, foram analisados os resultados referentes a todo o período de estudo (junho de 2008 a abril de 2009), considerando a ocorrência de períodos secos e úmidos.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Caracterização física da área de estudo

As Figuras 9, 10, 11 e 12 apresentam respectivamente, os mapas da rede de drenagem, relevo, uso do solo e mapa de solos da sub-bacia Rancho do Amaral.

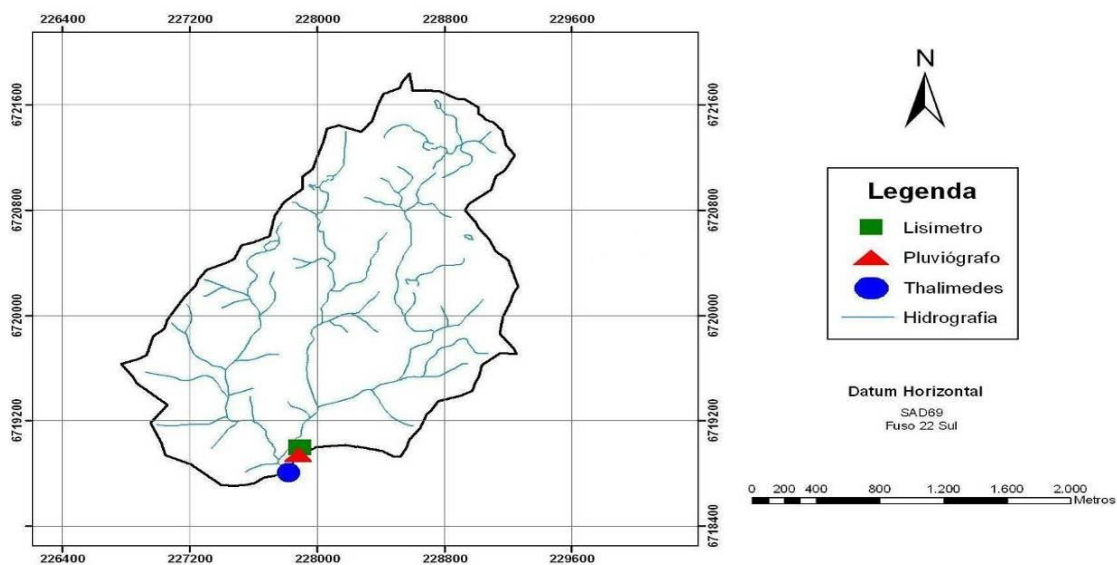


Figura 9 – Mapa da rede de drenagem da sub-bacia Rancho do Amaral.

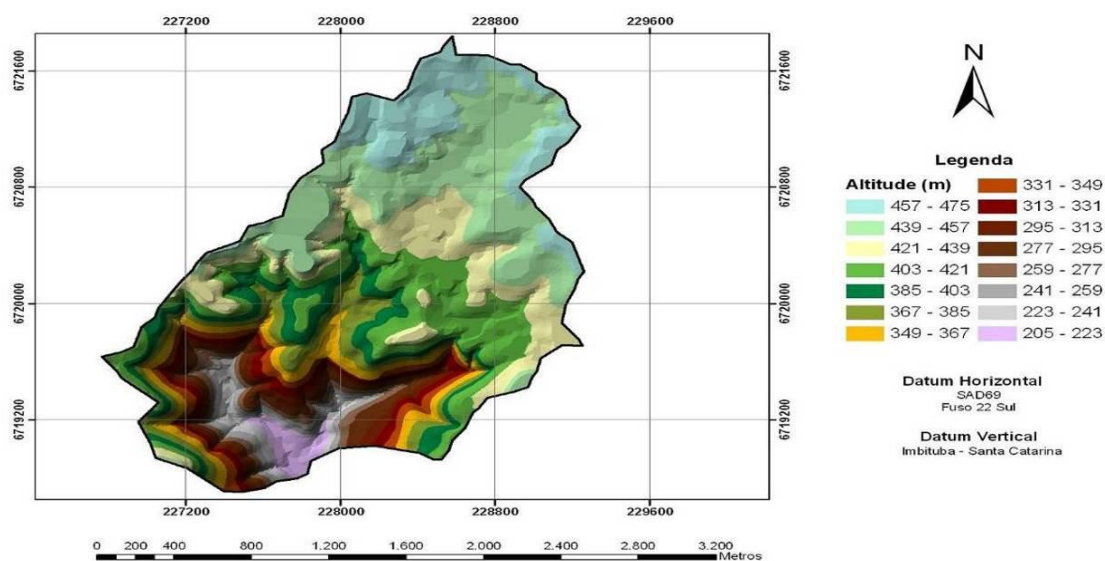
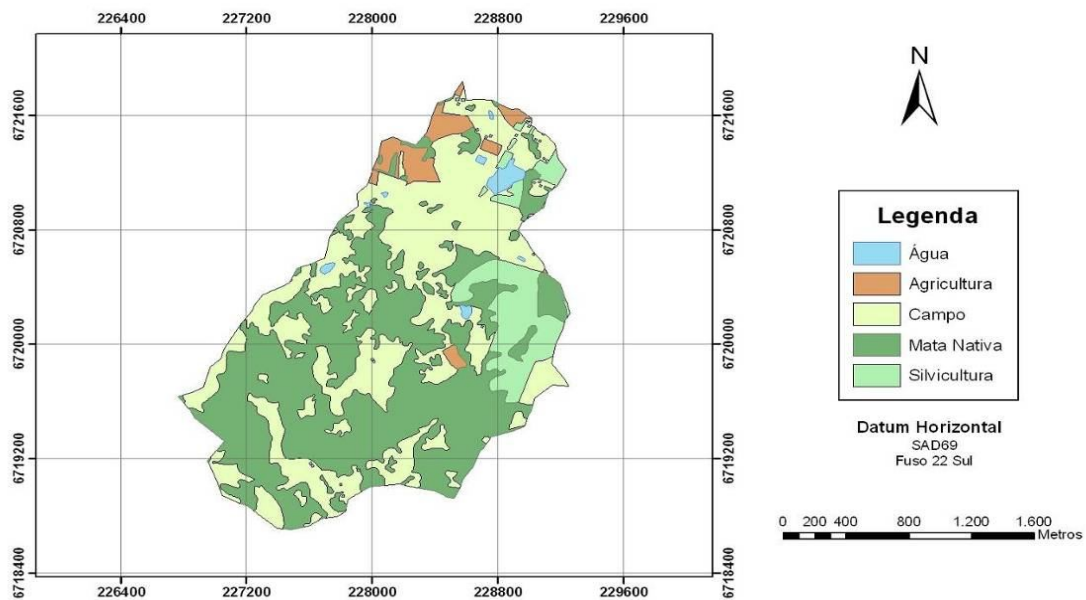
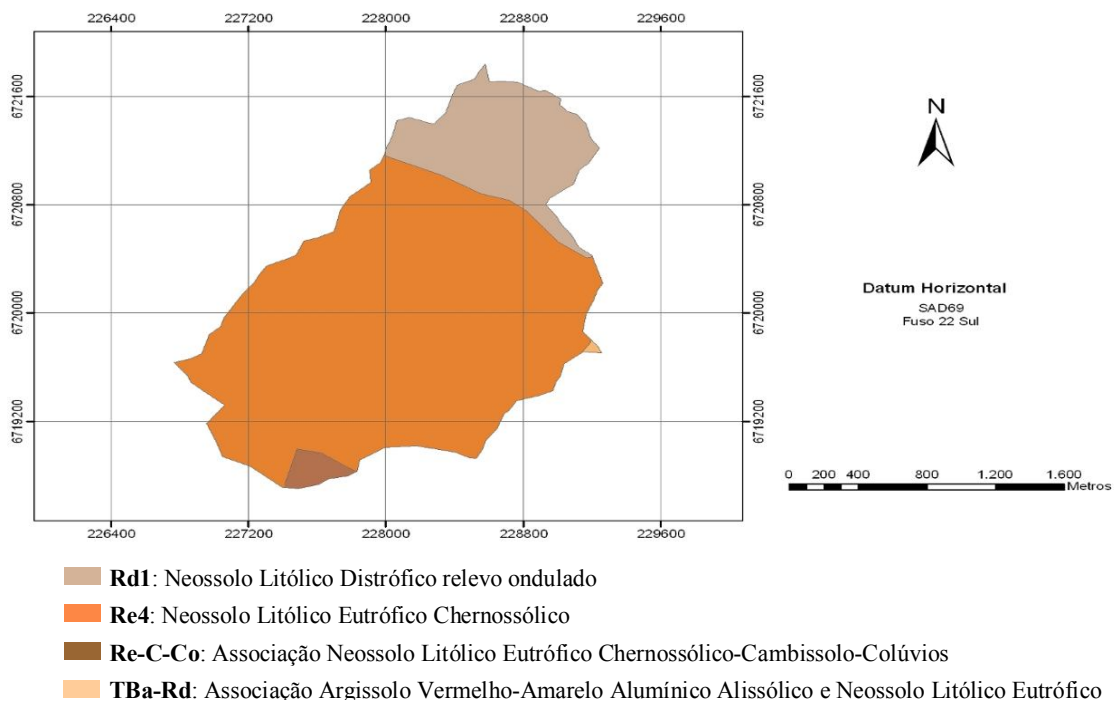


Figura 10 – Mapa do relevo da sub-bacia Rancho do Amaral.



**Figura 11** – Mapa de uso do solo da sub-bacia Rancho do Amaral.



**Figura 12** – Mapa de solos da sub-bacia Rancho do Amaral.

As Tabelas 2 e 3 apresentam respectivamente, a porcentagem do uso do solo e a distribuição dos diferentes solos na área da sub-bacia Rancho do Amaral.

**Tabela 2** – Uso do solo na área da sub-bacia Rancho do Amaral.

Uso do Solo	Área (km <sup>2</sup> )	%
Mata Nativa	2,121	47,62
Campo Nativo	1,754	39,37
Eucaliptos	0,364	8,17
Agricultura	0,162	3,63
Água	0,054	1,21

**Tabela 3** – Distribuição dos solos presentes na sub-bacia Rancho do Amaral.

Tipo de Solo	Área (km <sup>2</sup> )	%
Neossolo Litólico Eutrófico Chernossólico	3,5961	80,71
Neossolo Litólico Distrófico relevo ondulado	0,7840	17,60
Associação Neossolo Litólico Eutrófico Chernossólico-Cambissolo-Colúvios	0,0702	1,58
Associação Argissolo Vermelho-Amarelo Alumínico Alissólico e Neossolo Litólico Eutrófico	0,0051	0,12

#### 4.2 Propriedades físico-hídricas do solo

As Tabelas 4 e 5 apresentam respectivamente, os valores de densidade do solo, densidade de partículas, porosidade do solo, granulometria e classificação textural do solo de amostras coletadas em áreas próximas ao lisímetro instalado na sub-bacia Rancho Amaral.

**Tabela 4** – Valores de densidade do solo, densidade de partículas do solo e porosidade do solo coletado em áreas próximas ao lisímetro instalado na sub-bacia Rancho Amaral.

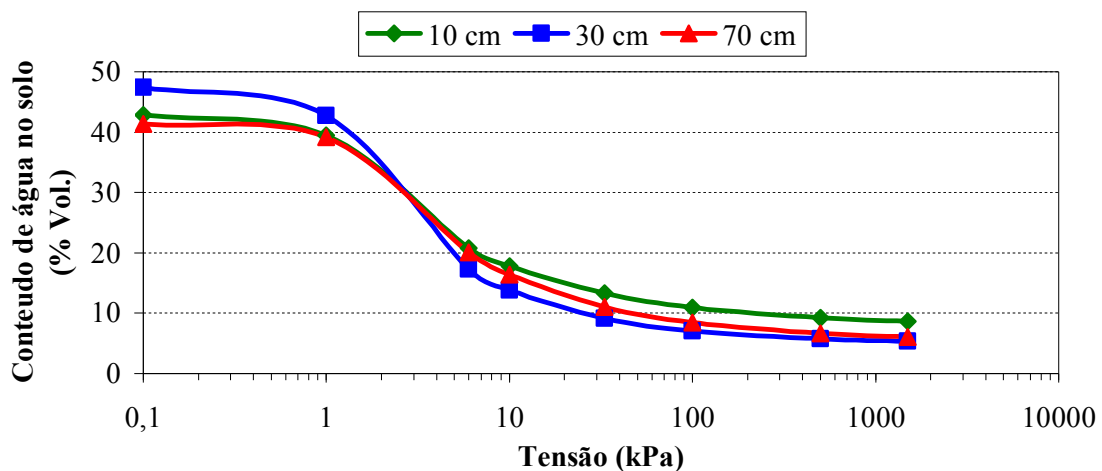
Profundidade (cm)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )		Porosidade (%)		
	Solo	Partíc.	Macro	Micro	Total
10	1,44	2,57	22,43	21,53	43,96
30	1,37	2,57	28,52	18,15	46,67
70	1,41	2,59	24,53	21,00	45,53

**Tabela 5** – Valores da análise granulométrica e classificação textural do solo de amostras retiradas próximas ao lisímetro instalado na sub-bacia Rancho Amaral.

Profundidade (cm)	Granulometria (%)				Classe Textural
	Areia Grossa (2- 0,2 mm)	Areia Fina (0,2- 0,05 mm)	Silte (0,05- 0, 002 mm)	Argila (<0, 002 mm)	
10	6,0	82,5	6,5	5,0	Areia
30	3,0	87,6	3,1	6,3	Areia
70	6,5	80,5	5,5	7,5	Areia franca

Observa-se que, em todas as profundidades amostradas a textura do solo apresenta porcentagens de areia maiores que 80% do total, caracterizando o solo contido no lisímetro como arenoso.

A capacidade de retenção de água no solo é uma propriedade determinada pela estrutura e pela granulometria do solo. Assim, a classe textural das areias, apresenta uma textura mais grossa, tendendo a uma maior drenagem, resultando em menor percentagem de umidade do solo. Sabe-se também que os poros são responsáveis pela retenção capilar da água e que quanto maior o seu tamanho, menor é a energia de retenção dessa água. A água retida nos macroporos é perdida rapidamente, sendo normalmente drenada para camadas mais profundas. No entanto, quanto maior a quantidade de microporos, menor a disponibilidade de água, pois a quantidade de água armazenada nestes são maiores, sendo necessárias tensões mais altas para que se tornem disponíveis. Esta relação entre a energia de retenção e o teor de água no solo pode ser melhor observada com o auxílio da curva de retenção de água no solo (Figura 13).



**Figura 13** – Curva de retenção de água no solo contido no lisímetro instalado na sub-bacia Rancho Amaral, para as diferentes profundidades amostradas.

A Tabela 6 apresenta os valores de capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e água disponível (AD), em função das profundidades de solo amostradas, para o lisímetro instalado na sub-bacia Rancho Amaral.

**Tabela 6** – Valores da capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP) e água disponível (AD), em função das profundidades amostradas.

	Profundidades		
	10 cm	30 cm	70 cm
<b>CC (%)</b>	17,83	13,86	16,39
<b>PMP (%)</b>	8,67	5,37	6,10
<b>AD (%)</b>	9,16	8,49	10,29

A partir da análise da Tabela 6 é possível observar que a profundidade de 30 cm apresenta menor capacidade de armazenamento de água, em relação as demais profundidades estudadas. Isto se deve a maior porosidade total (46,67 %) e a proporção entre macroporos e microporos. Na profundidade de 30 cm encontra-se maior porcentagem de macroporos (28,52 %) e menor proporção de microporos (18,15 %) quando comparado as demais profundidades analisadas. A alta porosidade favorece a infiltração de água no solo e as frações grosseiras reduzem a capacidade de armazenamento de água no solo. Por tal motivo a porcentagem de água disponível (AD), bem como capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP) é menor na profundidade de 30 cm.

### 4.3 Constatação e correção de problemas no lisímetro

O primeiro problema estrutural no lisímetro foi visualizado em abril de 2008, antes mesmo do equipamento entrar em operação, com a constatação da ocorrência de dilatação nas paredes laterais do lisímetro (Figura 14A). A reparação do problema foi feita mediante colocação de uma cinta metálica constituída de cantoneiras, de modo a envolver as laterais do lisímetro, estabilizando e impedindo o aumento da dilatação (Figura 14B).

Já entre os meses de dezembro de 2008 e janeiro de 2009 novamente foram necessários reparos no lisímetro. Após a obtenção de resultados incondizentes com a realidade local, foi levantada a hipótese de o lisímetro estar com algum tipo de vazamento, causando a saída de água para o seu exterior. Após escavação de todo o entorno do equipamento, e

saturação do mesmo com água, constatou-se o vazamento de água pelas junções laterais bem como pela junção entre a base do lisímetro (Caixa C-2) e a caixa formada por suas paredes laterais (Caixa C-1). Constatou-se ainda que devido a massa do solo contido internamente ao lisímetro, o terreno sob o mesmo acabou cedendo causando a rachadura das paredes laterais de sua base (Caixa C-2), bem como a formação de fendas entre suas junções (Figuras 14C e 14D). Conseqüentemente, a saída da água do interior do lisímetro por estas fendas acabou acarretando uma erosão interna, com a formação de vazios (bolsões de ar) entre o solo contido em seu interior e as paredes do equipamento (Figura 14E).



**Figura 14** – Problemas constatados no lisímetro instalado na sub-bacia Rancho do Amaral.

Imediatamente após detectados os problemas mencionados procedeu-se o concerto do lisímetro. O primeiro passo foi escavar o entorno do lisímetro para posteriormente suspender o equipamento (Figura 15A). Após tal procedimento, introduziram-se barras de aço sob a sua base, as quais serviram de suporte para um conjunto de correntes utilizadas na elevação do mesmo (Figura 15B). Com o auxílio de uma talha presa a uma estrutura de sustentação o lisímetro foi suspenso (Figura 15C). Com o lisímetro suspenso, procedeu-se a retirada de uma

camada de solo abaixo do mesmo, seguida pela construção de uma base de concreto armado de 17 cm de espessura, sobre a qual o equipamento foi solto (Figuras 15D e 15E).

O segundo passo foi preencher os vazios internos e vedar a superfície de contato solo/parede do lisímetro, com o objetivo de impermeabilizar e impedir a infiltração de água junto as paredes do mesmo. Para tanto, internamente as paredes do lisímetro, escavou-se uma trincheira de aproximadamente 2 cm de largura por 45 cm de profundidade, a qual foi preenchida com camadas de bentonita, intercaladas com camadas de solo. Os vazios (bolsões de ar) formados pela erosão interna do lisímetro também foram preenchidos por solo misturado a bentonita (Figuras 15F e 15G). Na ultima etapa do trabalho de concerto do lisímetro, procedeu-se a concretagem de todo o entorno das paredes do mesmo, formando uma espécie de tanque envolvendo o equipamento e impedindo a ocorrência de qualquer fuga de água do seu interior (Figura 15H). Por ocasião do concerto do lisímetro, substituiu-se o sistema de coleta do escoamento superficial e da drenagem, que até então era realizado por meio de recipientes volumétricos, por pluviógrafos do tipo cubas basculantes (Figura 15I).



**Figura 15** – Etapas do concerto do lisímetro instalado na sub-bacia Rancho do Amaral

## 4.5 Análise das variáveis do balanço hídrico

### 4.4.1 Precipitação

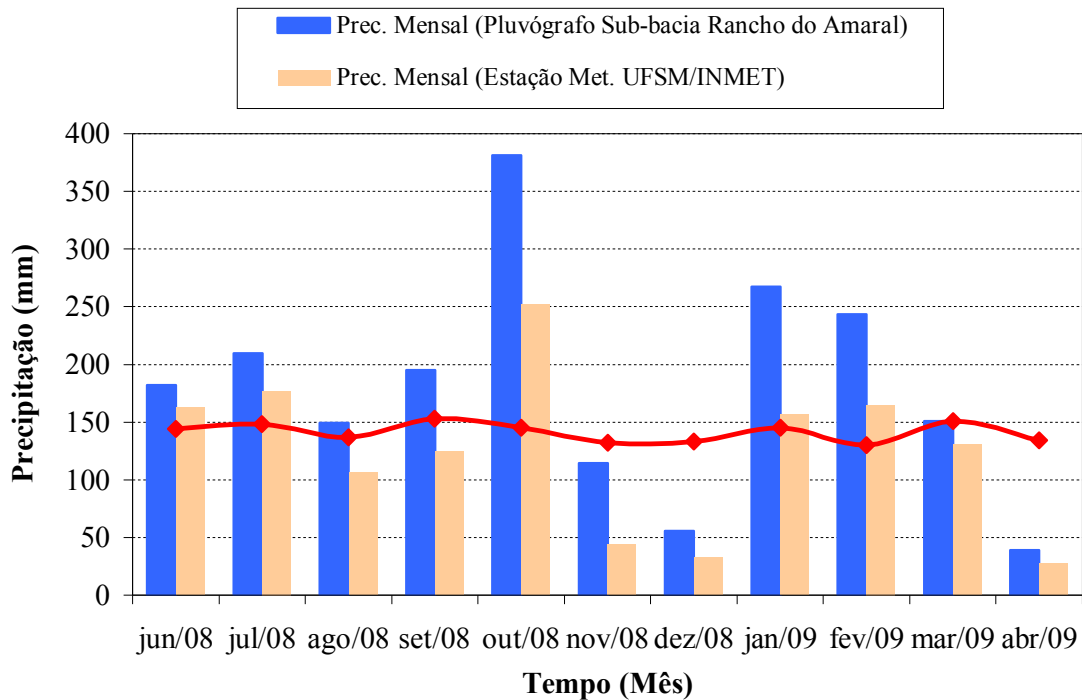
Na Tabela 7 são apresentados os dados de precipitação mensal registrados pela estação pluviográfica Rancho do Amaral, correspondentes ao período de monitoramento compreendido entre junho de 2008 e abril de 2009.

**Tabela 7** – Precipitação mensal registrada na sub-bacia Rancho do Amaral para o período de estudo compreendido entre junho de 2008 e abril de 2009.

Mês	Precipitação mensal (mm)
Junho/2008	182,0
Julho/2008	209,4
Agosto/2008	149,2
Setembro/2008	195,2
Outubro/2008	381,2
Novembro/2008	114,2
Dezembro/2008	55,6
Janeiro/2009	267,4
Fevereiro/2009	243,2
Março/2009	150,8
Abril/2009	39,2

A Figura 16 apresenta um gráfico referente a precipitação mensal registrada na sub-bacia Rancho do Amaral e a precipitação mensal registrada na estação meteorológica da Universidade Federal de Santa Maria mantida pelo Instituto Nacional de Meteorologia (UFSM/INMET), durante o período de junho de 2008 e abril de 2009, além das normais climatológicas registradas entre o período de 1960 e 1990 para a região de Santa Maria (CPTEC/INPE).





**Figura 16** – Precipitação mensal observada na sub-bacia Rancho do Amaral e na estação meteorológica da Universidade Federal de Santa Maria (UFESM/INMET), para o período de estudo compreendido entre junho de 2008 a abril de 2009 e normais climatológicas observadas entre 1960 e 1990 para a região de Santa Maria (CPTEC/INPE).

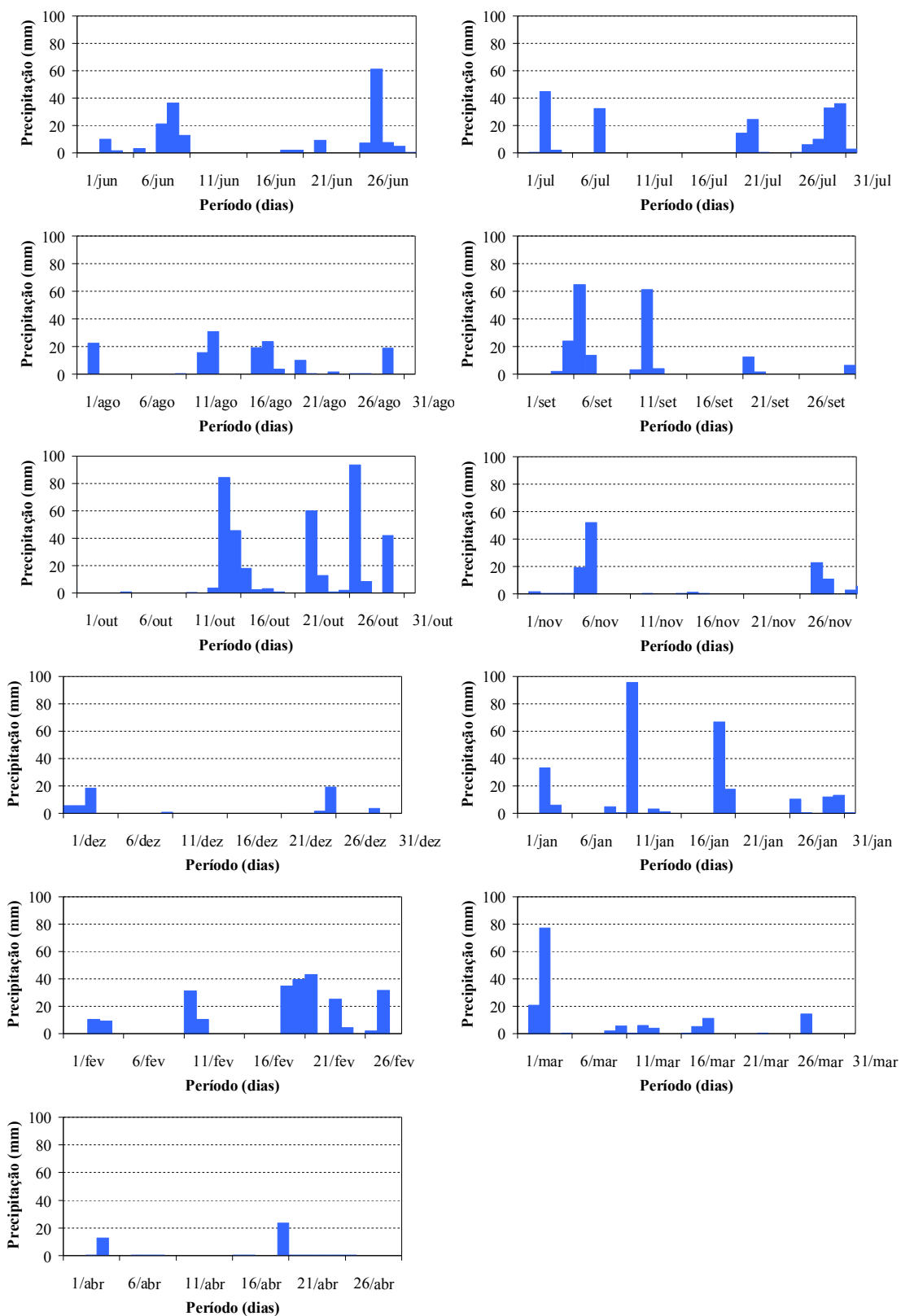
Em relação a precipitação ocorrida na sub-bacia Rancho do Amaral, observa-se que o período de estudo caracterizou-se pela ocorrência de chuvas bem distribuídas entre junho e outubro de 2008 e janeiro a março de 2009, intercalada por um período seco nos meses de novembro a dezembro de 2008 e outro período seco no mês de abril de 2009. O mês mais chuvoso foi o mês de outubro de 2008 apresentando uma precipitação total de 381,2 mm, enquanto que os menores índices pluviométricos foram observados nos meses de dezembro de 2008 (55,6 mm) e abril de 2009 (39,2 mm). A precipitação total registrada sobre a sub-bacia Rancho do Amaral, durante o período de estudo, foi igual a 1987,4 mm.

A partir da análise da Figura 16 pode-se observar que para todos os meses em estudo a precipitação registrada na sub-bacia Rancho do Amaral foi superior a precipitação registrada na estação meteorológica da Universidade Federal de Santa Maria. A diferença mais significativa pode ser observada no mês de novembro onde registrou-se o dobro da precipitação na sub-bacia Rancho do Amaral em relação a precipitação registrada na estação meteorológica da Universidade Federal de Santa Maria.

Observa-se ainda que a precipitação mensal registrada na sub-bacia Rancho do Amaral bem como na estação meteorológica da Universidade Federal de Santa Maria manteve-se acima da média das normais climatológica da região para todos os meses em estudo, exceto para os meses secos (novembro a dezembro de 2008 e abril de 2009). Constata-se uma concentração de chuva muito acima da média histórica no mês de outubro de 2008, quando na sub-bacia Rancho do Amaral choveu duas vezes e meia mais que o normal para este período. Já nos períodos secos, durante o mês de dezembro de 2008 registrou-se menos da metade da média histórica para a região em ambas as estações pluviográficas e no mês de abril de 2009, quando registrou-se uma precipitação três vezes menor que a media histórica para a região, caracterizando um período de seca severa.

Analisando-se a distribuição diária da precipitação para cada um dos meses compreendidos entre o período de estudo (Figura 17), observa-se a ocorrência de chuvas bem distribuídas ao longo da maior parte do período. Observa-se também que no mês de outubro, mês mais chuvoso, houve uma concentração da precipitação na segunda quinzena do mês, período este em que por duas vezes a precipitação atingiu valores superiores aos 80 mm/dia. Já nos meses de janeiro e fevereiro voltaram a ocorrer chuvas acima da média, sendo a precipitação máxima diária para o período de estudo registrada no dia 10 de janeiro de 2009 (95,8mm/dia). Percebe-se ainda que o mês de fevereiro apresentou chuvas melhor distribuídas em relação ao mês de janeiro. A partir da segunda semana de março ocorreu um período extremamente seco com distribuição irregular da precipitação, período este em que a precipitação máxima diária não ultrapassou a 23,6 mm/dia.

Observa-se ainda a ocorrência marcante de dois períodos úmidos que vão de junho de 2008 a 13 de setembro de 2008 e de 14 de outubro a 8 de novembro de 2008 seguidos por um terceiro período úmido entre janeiro de 2009 e abril de 2009. Intercalado a estes períodos úmidos, observa-se a ocorrência de períodos secos que vão de 14 de setembro de 2008 a 13 de outubro de 2008 e de 09 de novembro de 2008 até o início de janeiro de 2009, além de um terceiro período seco entre março e abril de 2009.



**Figura 17** – Precipitação diária registrada na sub-bacia Rancho do Amaral, para cada um dos meses compreendidos entre junho de 2008 a abril de 2009.

#### 4.4.3 Armazenamento de água no solo

A seguir são apresentados os resultados referentes a tensão de água no solo, conteúdo volumétrico de água, variação do armazenamento de água no solo e relação entre os resultados obtidos a partir de tensiômetro e TDR durante o período de estudo. Conforme discutido anteriormente, para melhor entendimento e análise dos resultados, será feita uma análise dividida em dois períodos: período anterior ao concerto do lisímetro (junho de 2008 até dezembro de 2008) e período posterior ao concerto do lisímetro (janeiro de 2009 até abril de 2009). Cabe aqui ressaltar que a área hachurada nos gráficos a seguir corresponde ao período de concerto do lisímetro, compreendido entre o dia 13 de dezembro de 2008 e 12 de janeiro de 2009.

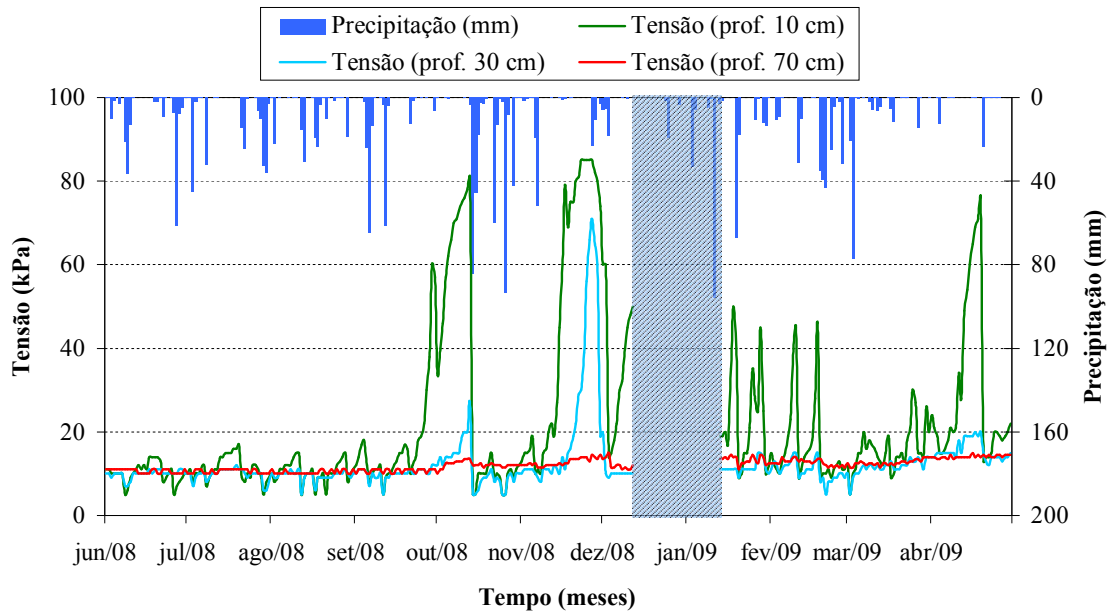
##### 4.4.2.1 Tensão da água no solo

A Tabela 8 apresenta os valores máximos, mínimos e médios de tensão de água no solo, para o período úmido e período seco, registrados no interior do lisímetro instalado na sub-bacia Rancho do Amaral para o período de estudo compreendido entre junho de 2008 e abril de 2009.

**Tabela 8** – Valores máximos, mínimos e médios de tensão de água no solo registrados no interior do lisímetro localizado na sub-bacia Rancho do Amaral para o período entre junho de 2008 e abril de 2009.

Período	Tensão (kPa)	Pré-Concerto Profundidade (cm)			Pós-Concerto Profundidade (cm)		
		10	30	70	10	30	70
Úmido	Mínimo	5,00	5,00	10,00	5,00	5,00	11,00
	Maximo	18,00	12,00	11,00	50,00	15,00	14,50
	Média	10,70	9,66	10,50	17,91	10,95	12,75
Seco	Mínimo	10,00	9,00	10,00	13,00	11,00	12,50
	Maximo	85,00	71,00	15,00	76,00	20,00	15,00
	Média	46,64	17,59	12,13	26,33	14,67	13,84

A Figura 18 apresenta a variação diária da tensão da água no solo, registrada no interior do lisímetro localizado na sub-bacia Rancho do Amaral, em função da precipitação e das diferentes profundidades monitoradas, para o período de estudo compreendido entre junho de 2008 e abril de 2009.



**Figura 18** – Tensão da água no solo registrada no interior do lisímetro instalado na sub-bacia Rancho do Amaral, para o período entre junho de 2008 a abril de 2009.

Com relação aos períodos anterior e posterior ao concerto do lisímetro não é possível estabelecer uma comparação já que tais períodos correspondem a épocas do ano diferentes, maio de 2008 a dezembro de 2008 e janeiro de 2009 a abril de 2009, respectivamente. No entanto pode-se relacionar a tendência da variação da tensão da água no solo em função da ocorrência de precipitação e períodos secos.

Pela análise da Tabela 8 e Figura 18 observa-se que a tensão da água no solo sofreu maiores variações na profundidade de 10 cm, variando desde 5 até 85 kPa no período anterior ao concerto do lisímetro e de 5 a 76 kPa no período posterior ao concerto do lisímetro. Esta maior variação na camada superficial (10 cm) pode ser explicada pelo fato dessa profundidade estar sujeita a uma perda maior de água, por meio da evaporação do solo e transpiração das plantas e por se encontrar, nesta profundidade, a maior parte do sistema radicular da vegetação.

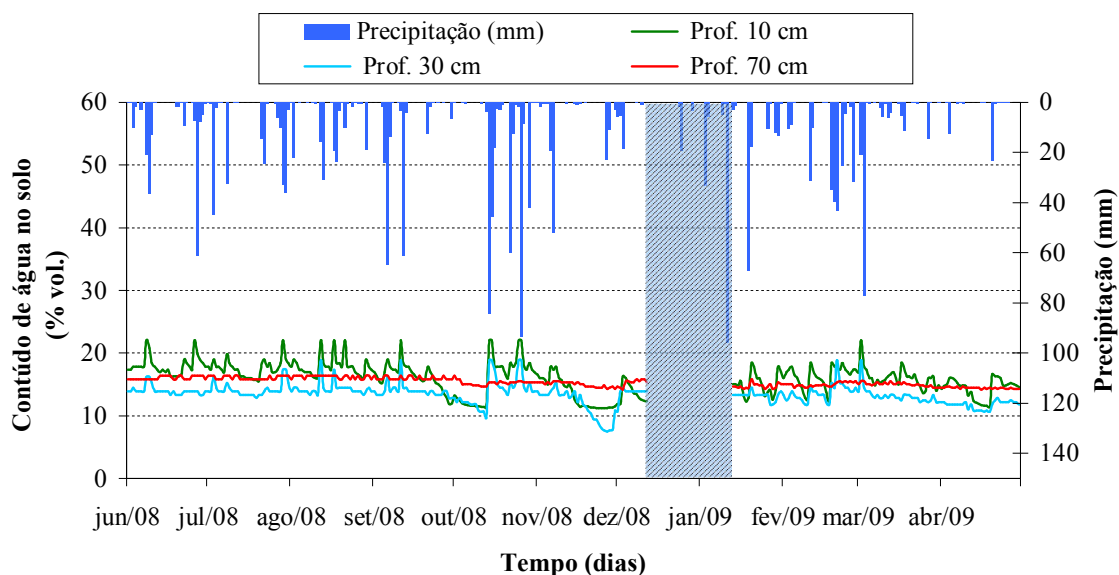
Na profundidade de 30 cm, observa-se que a variação da tensão de água no solo acompanha a tendência observada na profundidade de 10 cm, porem em escala menor,

variando entre 5 e 71 kPa no período anterior ao concerto do lisímetro e de 5 a 20 kPa no período após o concerto do lisímetro. Para a profundidade de 70 cm a variação da tensão de água no solo foi muito pequena entre os períodos seco e úmido, variando de 10 a 15 kPa e não apresentando diferença entre o período anterior e o período posterior ao concerto do lisímetro. A tensão média de água no solo para os períodos úmidos apresentou maiores valores na profundidade de 10 cm, seguida pela profundidade de 70 cm e 30 cm respectivamente. Já nos períodos secos observam-se maiores valores de tensão de água no solo para a profundidade de 10 cm, seguida pela profundidade de 30 cm e 70 cm respectivamente.

Observa-se ainda que durante os períodos úmidos ocorreram menores valores bem como menores variações de tensão da água no solo do que durante os períodos secos. Para o período úmido anterior ao concerto do lisímetro, período este caracterizado por chuvas bem distribuídas, observa-se para a profundidade de 10 cm valores de tensão de água no solo que variaram de 5 a 18 kPa enquanto que para os períodos secos anteriores ao concerto do lisímetro, para esta mesma profundidade, tais valores variaram de 10 a 85 kPa. Já para o período posterior ao concerto do lisímetro os valores de tensão de água no solo, para a profundidade de 10 cm variaram entre 5 e 50 kPa para o período úmido e entre 13 e 76 kPa para o período seco. Essa variação de tensão da água no solo durante o período úmido posterior ao concerto do lisímetro pode ter acontecido devido a ocorrência consecutiva de chuvas de baixa intensidade intercaladas com períodos com altas temperaturas e insolação (época do ano), o que propiciou altas taxas de evapotranspiração e perda de água pelo solo. Um segundo fator para tais resultados pode estar relacionado a interferências causadas por ocasião do concerto do lisímetro, quando os tensiômetros tiveram que ser retirados de seu interior e depois recolocados. Percebe-se que após um mês do concerto do lisímetro tal variação diminuiu significativamente, levando a crer que após tal período a superfície de contato tensiômetros/solo, que havia sido desestabilizada voltou a estabilizar-se novamente.

#### 4.4.2.2 Conteúdo volumétrico de água no solo

Na Figura 19 observa-se a variação do conteúdo volumétrico de água no solo no interior do lisímetro em função das diferentes profundidades e da precipitação registrada no lisímetro instalado na sub-bacia Rancho do Amaral, entre junho de 2008 e abril de 2009.



**Figura 19** – Conteúdo volumétrico de água no solo registrado no interior do lisímetro instalado na sub-bacia Rancho do Amaral, para o período compreendido entre junho de 2008 e abril de 2009.

Analisando-se a Figura 19 observa-se que o conteúdo volumétrico de água no solo a 10 cm e a 30 cm de profundidade segue um mesmo padrão de variação, apresentando rápida resposta em relação aos eventos chuvosos. Já na profundidade de 70 cm a umidade volumétrica do solo apresenta pouca variação durante os eventos chuvosos, fato este, também observado por Medeiros (2004) e Oliveira (2006) trabalhando com lisímetros em diferentes condições de uso e manejo do solo.

Quanto a variação do conteúdo volumétrico de água no solo nos períodos úmidos e secos observam-se duas situações distintas. Nos períodos úmidos o conteúdo volumétrico de água no solo é maior na profundidade de 10 cm, enquanto que a profundidade de 30 cm apresenta os menores valores e a profundidade de 70 cm apresenta valores intermediários. Já nos períodos secos observa-se maior conteúdo volumétrico de água no solo na profundidade de 70 cm, seguida pela profundidade de 10 cm, e de 30 cm respectivamente. Nota-se que tanto no período seco quanto no período úmido a profundidade de 30 cm apresenta os menores valores de conteúdo volumétrico de água no solo em relação as demais profundidades amostradas. Isto se deve a porosidade do solo (proporção entre macroporos e microporos) em relação as demais profundidades estudadas e a ocorrência de chuvas fracas capazes de suprir a profundidade de 10 cm, mas incapaz de produzir infiltração que penetre até a profundidade de 30 cm.

Na Tabela 9 são apresentados os valores máximos, mínimos e médios do conteúdo volumétrico de água no solo em função das diferentes profundidades e da precipitação, registrados no interior do lisímetro instalado na sub-bacia Rancho do Amaral, entre junho de 2008 e abril de 2009.

**Tabela 9** – Valores máximos, mínimos e médios do conteúdo volumétrico de água no solo no interior do lisímetro localizado na sub-bacia Rancho do Amaral para o período de junho de 2008 a abril de 2009.

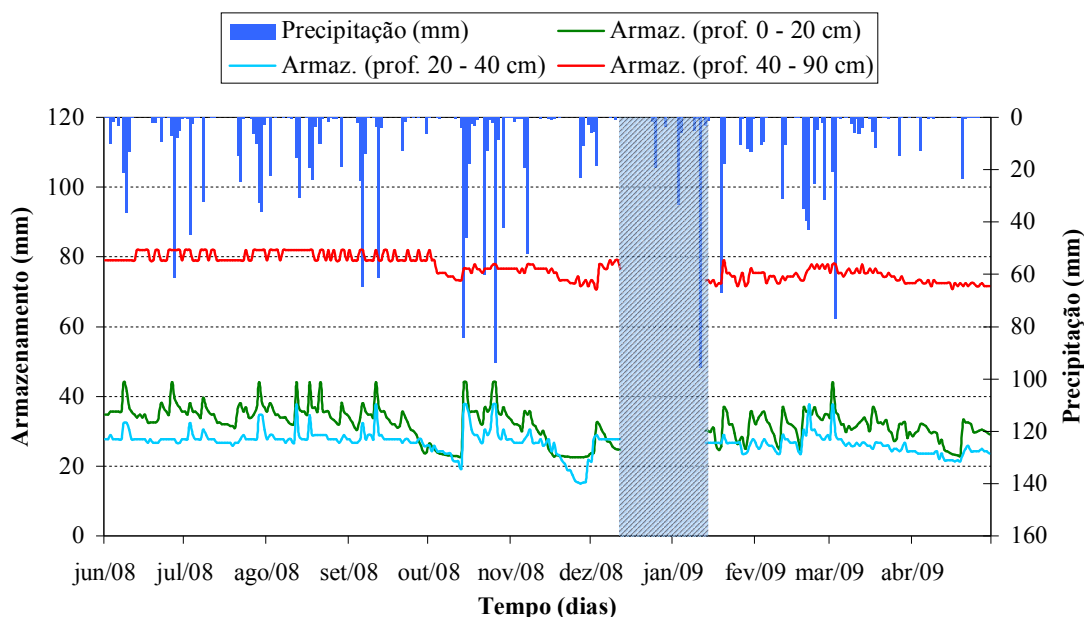
Período	Conteúdo de Água (% vol.)	Pré-Concerto			Pós-Concerto		
		Profundidade (cm)			Profundidade (cm)		
		10	30	70	10	30	70
Úmido	Mínimo	15,27	12,88	15,82	12,28	11,82	14,32
	Maximo	22,03	18,89	16,39	22,03	18,89	15,82
	Média	17,79	14,18	16,10	16,01	13,53	15,01
Seco	Mínimo	11,25	7,50	14,15	11,44	10,66	14,15
	Maximo	17,83	14,49	16,39	16,59	13,33	15,10
	Média	13,31	12,31	15,31	14,66	12,01	14,57

Ao compararmos os dados do conteúdo volumétrico de água no solo constata-se que as maiores variações são observadas na profundidade de 10 cm enquanto na profundidade de 70 cm, o conteúdo volumétrico de água no solo manteve-se praticamente constante.

#### 4.4.2.3 Variação do armazenamento de água no solo

A Figura 20 apresenta o armazenamento de água no solo para as camadas de solo compreendidas entre 0 e 20 cm, 20 a 40 cm e 40 a 90 cm, registrado no interior do lisímetro instalado na sub-bacia Rancho do Amaral, entre junho de 2008 e abril de 2009.

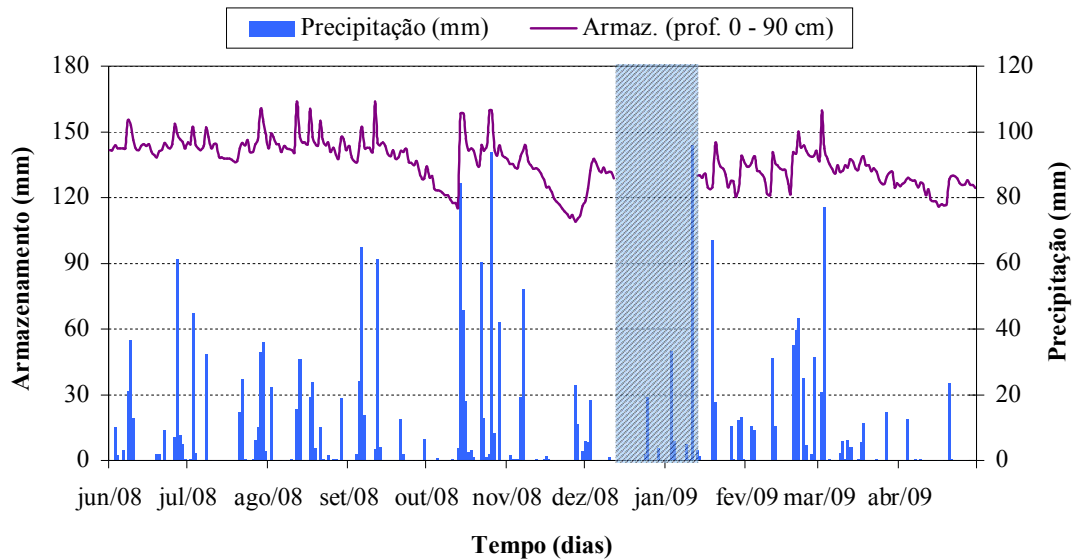




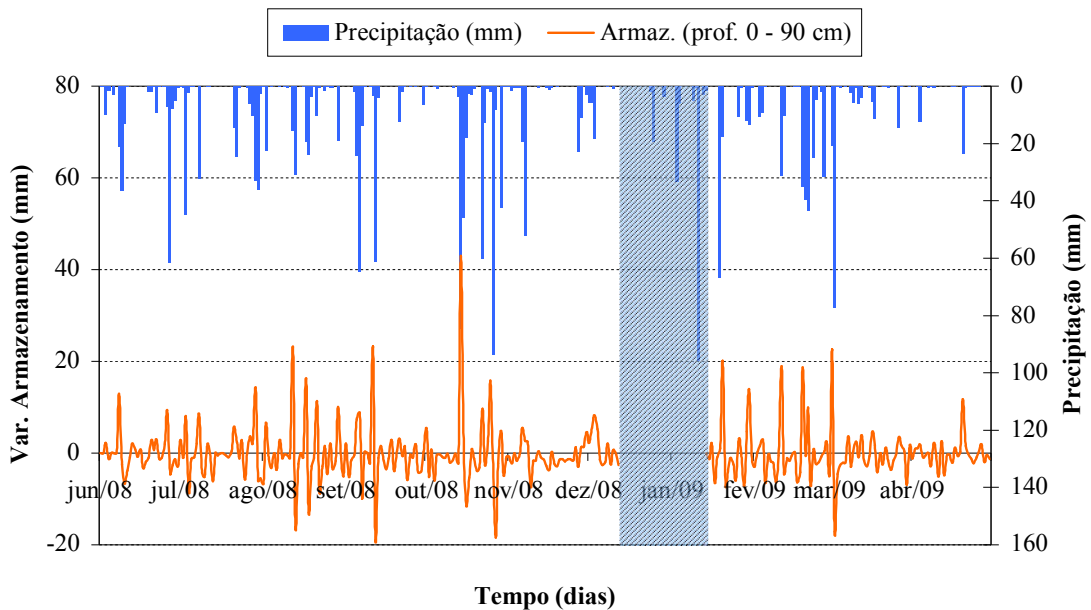
**Figura 20** – Armazenamento de água no solo, para as diferentes profundidades monitoradas, registrado no interior do lisímetro instalado na sub-bacia Rancho do Amaral, para o período entre junho de 2008 e abril de 2009.

Pela análise da Figura 20 observa-se que o armazenamento na camada entre 0 e 20 cm e na camada entre 20 e 40 cm segue um mesmo padrão sendo os seus valores bem próximos. No entanto, a camada de solo compreendida entre 20 e 40 cm de profundidade possui os menores valores de armazenamento de água. A camada de solo compreendida entre 40 e 90 cm apresenta um armazenamento de água no solo maior em relação as demais profundidades estudadas, além de apresentar menor variação do armazenamento de água no solo. No entanto, os maiores valores de armazenamento de água no solo encontradas nesta camada de solo, devem-se a maior espessura considerada no cálculo (50 cm) em relação as demais camadas consideradas. Percebe-se ainda que a partir de meados de novembro o armazenamento de água no solo passou a ser inferior ao período anterior, o que pode ter sido ocasionado pela época do ano (verão) caracterizada por alta insolação, elevadas temperaturas e conseqüentemente alta evapotranspiração.

As Figuras 21 e 22 apresentam respectivamente o armazenamento de água no solo para a camada de solo compreendida entre 0 e 90 cm de profundidade e a variação diária do armazenamento de água deste perfil de solo, registrada no interior do lisímetro instalado na sub-bacia Rancho do Amaral, entre junho de 2008 e abril de 2009.



**Figura 21** – Armazenamento de água no solo, para a camada de solo compreendida entre 0 a 90 cm de profundidade, no interior do lisímetro instalado na sub-bacia Rancho do Amaral, para o período entre junho de 2008 e abril de 2009.



**Figura 22** – Variação diária do armazenamento de água no solo, para a camada de 0 a 90 cm, registrada no interior do lisímetro instalado na sub-bacia Rancho do Amaral, para o período entre junho de 2008 e abril de 2009.

Analisando-se a Figura 21 observa-se que o armazenamento de água no solo para a camada de solo compreendida entre 0 e 90 cm apresentou valores que variaram desde 109,10

mm até 145,34 mm no período anterior ao concerto do lisímetro e de 115,94 mm a 159,62 mm no período posterior ao concerto do lisímetro. Para o período anterior ao concerto do lisímetro o armazenamento médio foi de 144,44 mm para o período úmido e de 127,79 mm para o período seco. Após o concerto do lisímetro tais valores variaram de 134,13 mm no período úmido a 126,17 mm no período seco. Esses menores valores de armazenamento de água no solo não se devem ao fato do concerto do lisímetro, mas sim a época do ano, com condições propícias ao aumento da evapotranspiração a partir de meados de novembro.

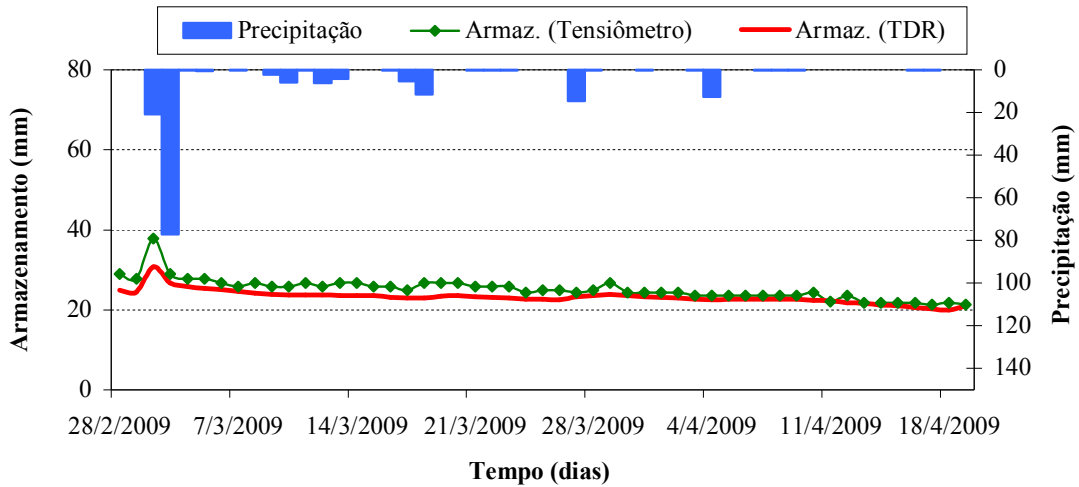
Pela análise da Figura 22 percebe-se que a variação diária do armazenamento de água no solo apresenta maior amplitude durante os períodos úmidos e que tais resultados foram semelhantes para o período anterior e para o período posterior ao concerto do lisímetro. No período úmido anterior ao concerto do lisímetro observa-se uma variação diária do armazenamento de água no solo que vai desde -18,95 mm até 23,19 mm enquanto que no período úmido posterior ao concerto do lisímetro observa-se que tais valores variam desde -17,18 mm até 22,51 mm. Já para o período seco anterior ao concerto do lisímetro houve uma variação diária do armazenamento de água no solo entre -7,51 mm e 8,28 mm enquanto que no período seco posterior ao concerto do lisímetro tal variação foi de -6,93 mm a 11,73 mm. Pela análise dos resultados obtidos percebe-se que a resposta da variação do armazenamento de água no solo é muito rápida e sensível a ocorrência de precipitações e períodos secos, havendo assim rápida reposição de água do solo após a ocorrência de uma chuva, bem como a rápida perda de água do solo após cessada a precipitação. Isto é típico de solos com textura arenosa como o solo presente na região de estudo.

A obtenção deste tipo de resultado é de muita importância para a modelagem hidrológica, já que estes podem ser transferidos para a bacia para estimar o conteúdo volumétrico de água no solo a partir da precipitação, pela aplicação em modelos hidrológicos.

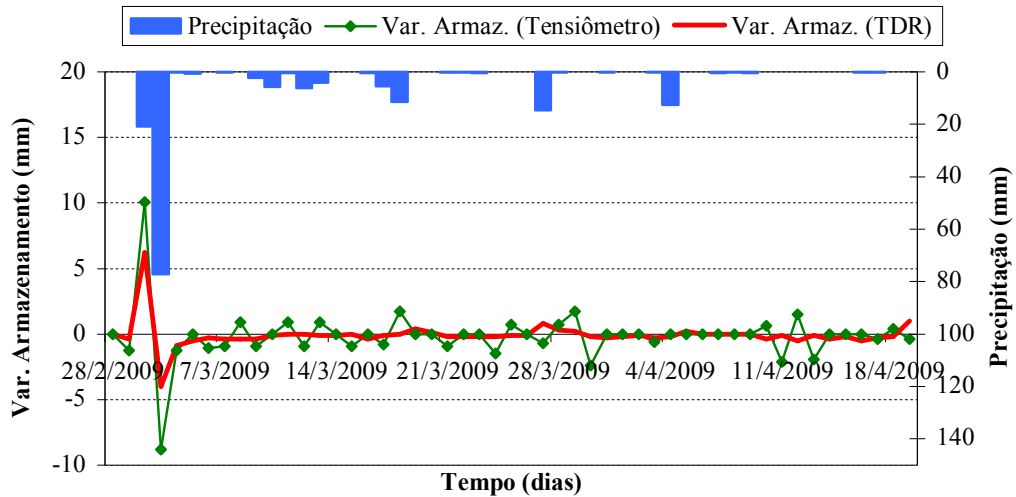
#### 4.4.2.4 Armazenamento de água no solo – Relação entre dados registrados por tensiômetro e TDR

A partir do dia 28 de fevereiro de 2009 a variável armazenamento de água no solo passou a ser monitorada além de tensiômetros, também pelo uso de equipamento TDR. A sonda do equipamento TDR foi instalada fora do lisímetro, nas suas proximidades e a profundidade de 30 cm.

As Figuras 23 e 24 apresentam respectivamente o armazenamento de água no solo e a variação do armazenamento diário de água no solo, para a profundidade de 30 cm, determinada pelo tensiômetro instalado no interior do lisímetro e pelo TDR instalado nas proximidades do lisímetro, localizado na sub-bacia Rancho do Amaral, entre o período de 28 de fevereiro de 2009 e abril de 2009.



**Figura 23** – Armazenamento de água no solo registrado por meio de tensiômetro e TDR, na sub-bacia Rancho do Amaral, entre o período de fevereiro e abril de 2009.



**Figura 24** – Variação diária do armazenamento de água no solo registrado por meio de tensiômetro e TDR, na sub-bacia Rancho do Amaral, entre o período de fevereiro a março de 2009.

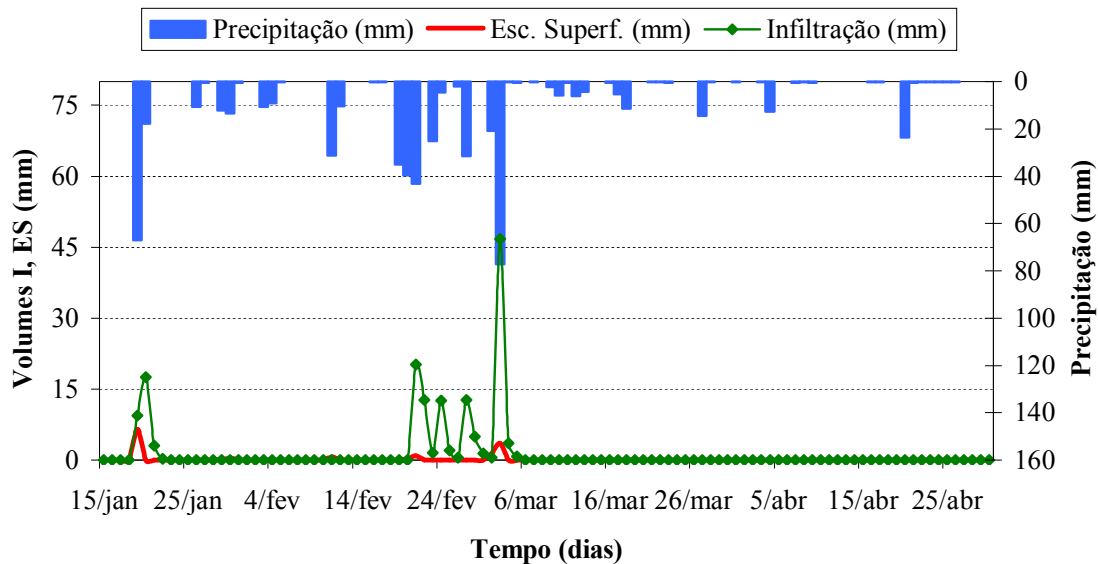
Pela análise das Figuras 23 e 24 observa-se que o armazenamento de água no solo e a variação diária do armazenamento de água no solo, para a profundidade de 30 cm, registrado por meio de tensiômetro no interior do lisímetro e de TDR fora do lisímetro, seguem uma mesma tendência. No entanto o armazenamento registrado pelo tensiômetro foi superior ao armazenamento registrado com auxílio do TDR. Verifica-se também maiores que o armazenamento registrado por meio do TDR apresenta-se mais estável não sofrendo tantas oscilações como no caso do tensiômetro. Apesar do pouco tempo avaliado, tais resultados demonstram que, no caso deste estudo, para a profundidade e tipo de solo considerado e independente da localização do equipamento (dentro ou fora do lisímetro) ambos os métodos empregados para avaliação do conteúdo de água e variação diária do armazenamento de água no solo apresentam desempenho semelhante.

Não é possível determinar se a diferença registrada se deve ao fato do tensiômetro estar localizado dentro do lisímetro e do TDR estar fora deste ou se isto se deve a diferença de sensibilidade entre os diferentes equipamentos. Deve-se ainda levar em consideração a existência de fontes de erro na obtenção dos resultados, tanto no caso do tensiômetro como do TDR. Para o tensiômetro deve-se considerar pequenos erros decorrentes da determinação da curva de retenção de água no solo, relacionados a representatividade das amostras coletadas e ao ajuste da curva. No caso do TDR, apesar da afirmada universalidade da equação de Topp et al. (1980), pequenos erros de estimativa do conteúdo de umidade do solo podem ocorrer devido a não calibração específica do TDR para o tipo de solo estudado.

#### 4.4.3 Escoamento superficial e drenagem

Devido aos problemas ocorridos no lisímetro os dados anteriores a janeiro de 2009 tiveram que ser descartados, sendo utilizados neste estudo apenas os dados referentes ao período posterior ao concerto do lisímetro, ou seja, de janeiro de 2009 a abril de 2009. Para efeito de estudo definiu-se como início de um evento o momento em que iniciou a precipitação e como fim deste evento o momento em que cessou a drenagem.

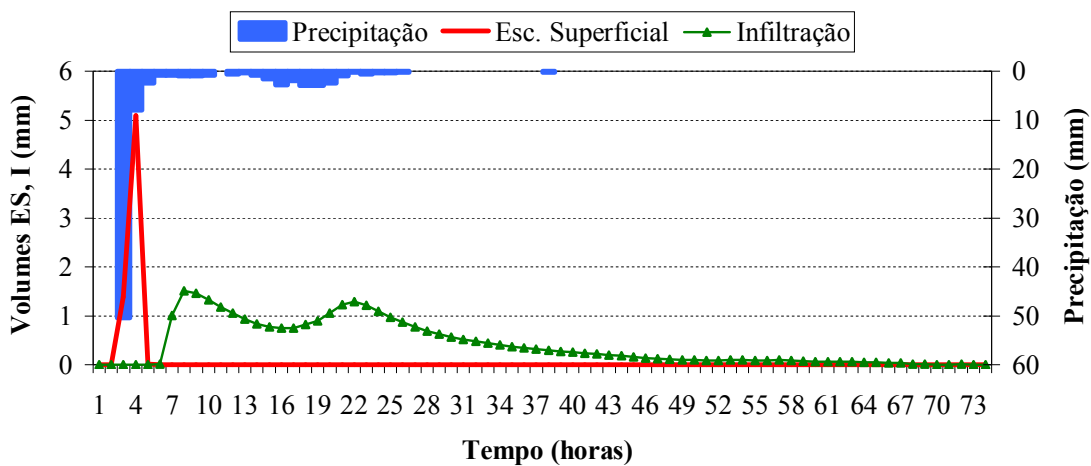
A Figura 25 apresenta o escoamento superficial e a drenagem de água no solo registrada no lisímetro instalado na sub-bacia Rancho do Amaral, entre o período de janeiro de 2009 e abril de 2009.



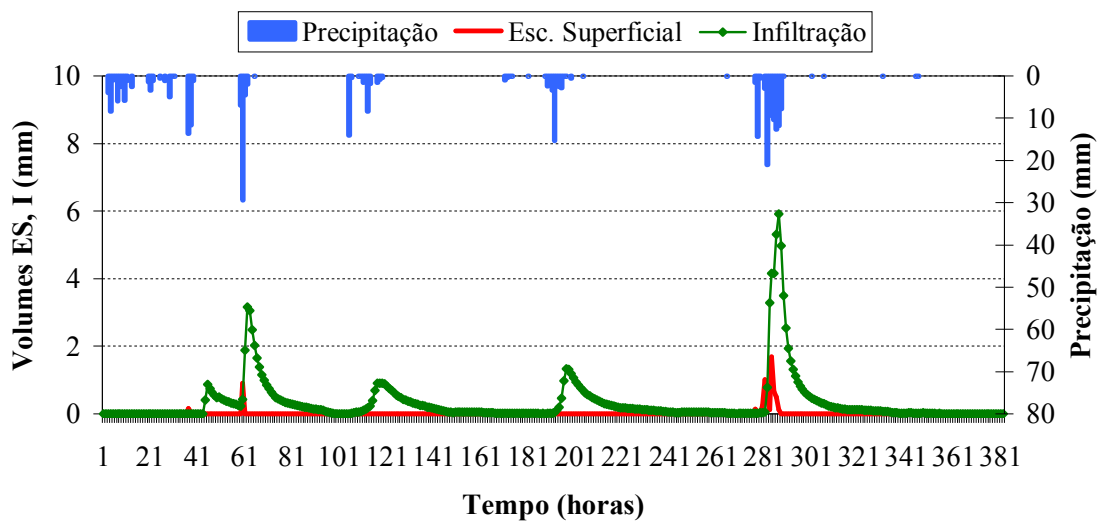
**Figura 25** – Escoamento superficial e drenagem registrada no lisímetro instalado na sub-bacia Rancho do Amaral, para o período entre janeiro e abril de 2009.

Conforme Figura 25, observa-se que devido a ocorrência de um período seco, com chuvas de fraca intensidade e incapazes de produzir escoamento superficial e drenagem de água no solo, a avaliação e caracterização destas variáveis, após o concerto do lisímetro, ficou prejudicada, não sendo possível obterem-se conclusões representativas.

As Figuras 26 e 27 apresentam os eventos, em escala horária, capazes de gerar escoamento superficial e drenagem de água no solo, ocorridos durante o período compreendido entre janeiro e abril de 2009.



**Figura 26** – Escoamento superficial e drenagem registrada no lisímetro instalado na sub-bacia Rancho do Amaral, para o evento ocorrido entre os dias 18/01/2009 e 21/01/2009.



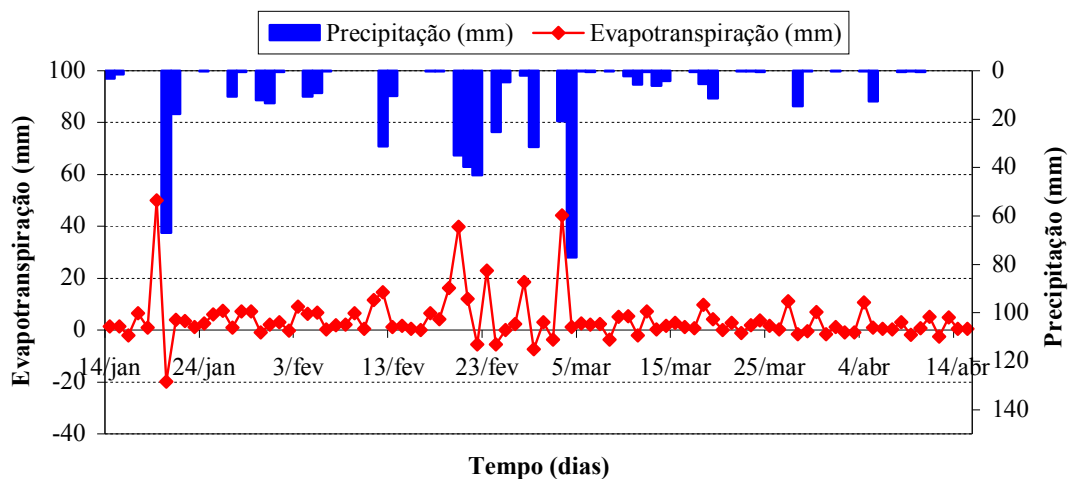
**Figura 27** – Escoamento superficial e drenagem registrada no lisímetro instalado na sub-bacia Rancho do Amaral, para o evento ocorrido entre os dias 18/02/2009 e 06/03/2009.

Analisando-se as Figuras 26 e 27 observa-se que as chuvas concentradas e de maior intensidade são aquelas responsáveis pela produção de escoamento superficial enquanto que chuvas de menor intensidade e bem distribuídas ao longo do evento tem maior capacidade de produzir infiltração e drenagem de água no solo. Percebe-se ainda que após iniciada a drenagem de água no solo, esta segue a tendência da precipitação variando de acordo com a intensidade da mesma.

#### 4.4.5 Balanço hídrico e evapotranspiração

A evapotranspiração foi obtida a partir do cálculo do balanço hídrico, onde se utilizaram dados referentes a períodos diários, períodos de 5 dias (quinquidial) e períodos de 10 dias (decendial), compreendidos entre os meses de janeiro e abril de 2009.

A Figura 28 apresenta a evapotranspiração diária obtida a partir do cálculo do balanço hídrico realizado por meio de determinações lisimétricas, na sub-bacia Rancho do Amaral, no período após concerto do lisímetro, ou seja, entre janeiro e abril de 2009.

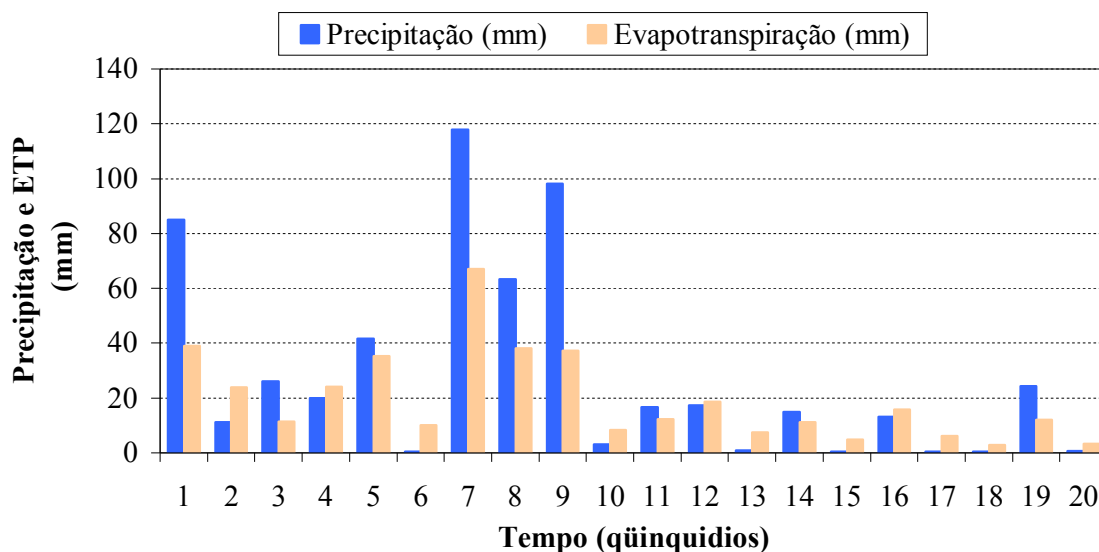


**Figura 28** – Evapotranspiração diária obtida a partir de determinações lisimétricas na sub-bacia Rancho do Amaral, no entre janeiro e abril de 2009.

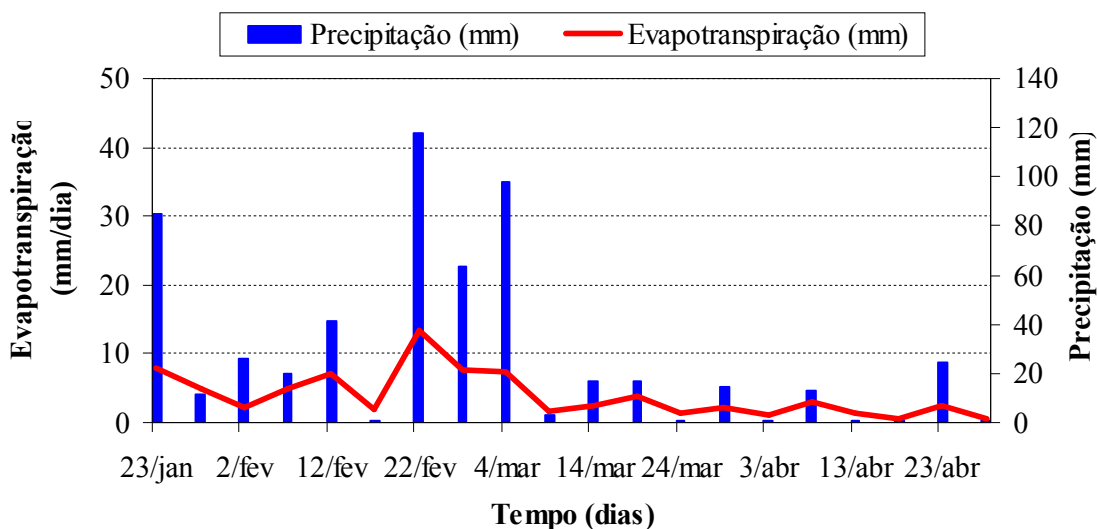
Observa-se que os resultados de evapotranspiração obtidos a partir de determinações lisimétricas na sub-bacia Rancho do Amaral, apresentaram variações diárias que vão desde valores negativos até valores muito elevados. Tais valores variaram de -19,79 mm/dia a 50,10 mm/dia (Anexo 2). Resultados semelhantes foram obtidos por Oliveira (2006), trabalhando com o mesmo tipo de lisímetro na bacia hidrográfica do Rio Potiribu, sob diferentes condições de manejo do solo. Percebe-se que tais resultados tornam-se mais acentuados em períodos de maior precipitação. Já no período seco, a amplitude de variação da evapotranspiração é bem menor, mas mesmo assim observam-se registros de evapotranspiração negativa. Isto pode estar relacionado ao fato dos tensiômetros e do TDR não acompanharem nessa escala a variação do conteúdo de água no solo, necessitando um maior tempo de resposta. Apesar do pouco tempo de avaliação e da comparação com outros trabalhos realizados, conclui-se que o balanço hídrico em escala diária, elaborado a partir de determinações lisimétricas pelo uso do equipamento referido neste estudo, não apresenta bons resultados, principalmente nos períodos em que ocorrem precipitações elevadas, superestimando ou subestimando a evapotranspiração resultante.

As Figuras 29 e 30 apresentam a precipitação acumulada, a evapotranspiração acumulada e a evapotranspiração média diária para períodos de 5 (quinquidial), obtida a partir do cálculo do balanço hídrico realizado por meio de determinações lisimétricas, na sub-bacia Rancho do Amaral, entre janeiro de 2009 e abril de 2009.



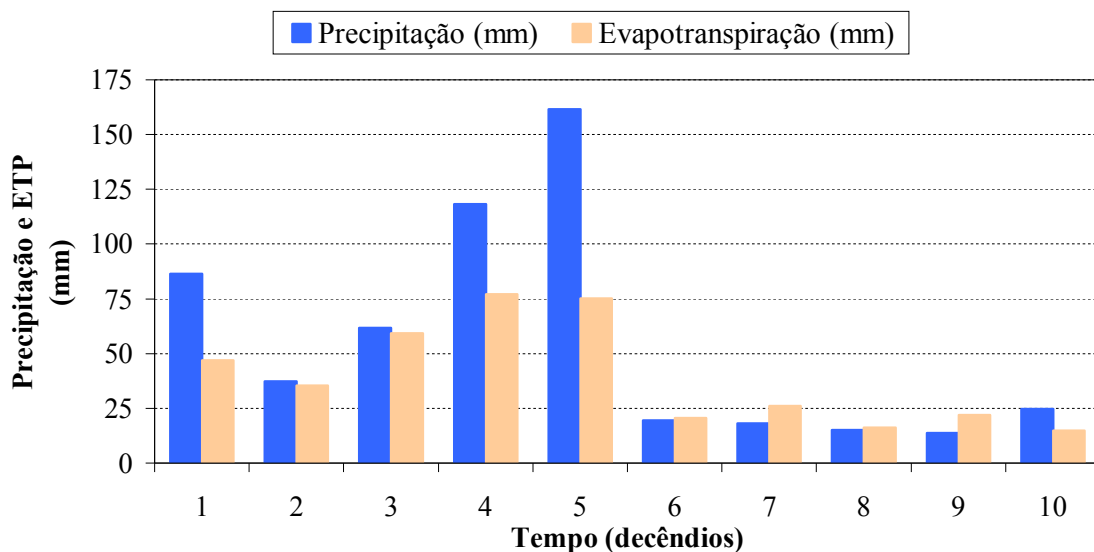


**Figura 29** – Evapotranspiração e precipitação acumulada para períodos de 5 dias, obtida a partir de determinações lisimétricas na sub-bacia Rancho do Amaral, entre janeiro e abril de 2009.

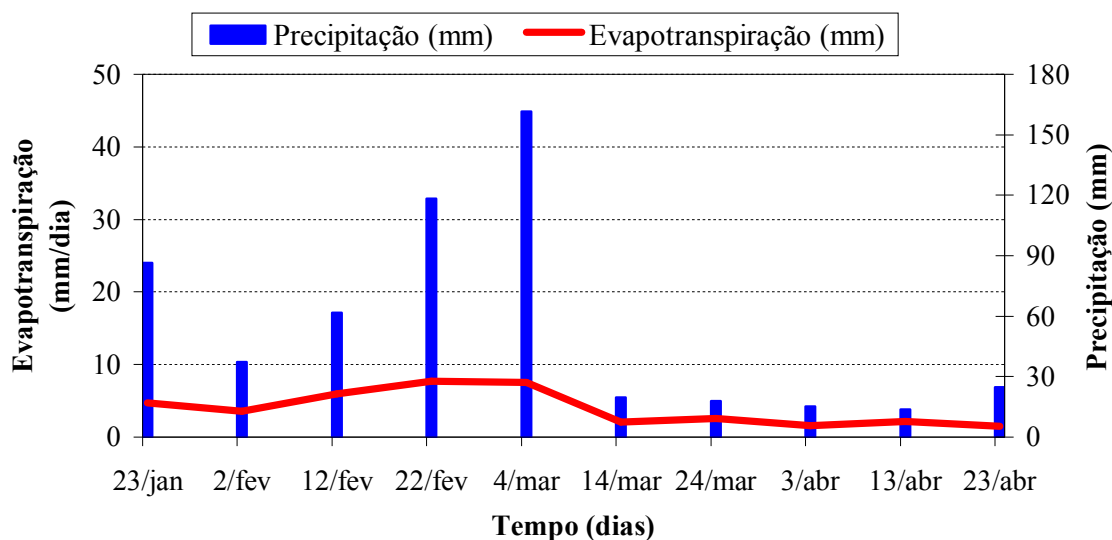


**Figura 30** – Evapotranspiração média diária para o período de 5 dias, obtida a partir de medida lisimétricas na sub-bacia Rancho do Amaral, entre janeiro e abril de 2009.

As Figuras 31 e 32 apresentam a precipitação acumulada, a evapotranspiração acumulada e a evapotranspiração média diária para o período de 10 dias (decendial), obtida a partir do cálculo do balanço hídrico realizado por meio de determinações lisimétricas, na sub-bacia Rancho do Amaral, entre janeiro e abril de 2009.



**Figura 31** – Evapotranspiração e precipitação acumulada para períodos de 10 dias, obtida a partir de determinações lisimétricas na sub-bacia Rancho do Amaral, entre janeiro e abril de 2009.



**Figura 32** – Evapotranspiração média diária para o período de 10 dias obtida a partir de determinações lisimétricas na sub-bacia Rancho do Amaral, entre janeiro de 2009 e abril de 2009.

Observa-se que a evapotranspiração média para os períodos de 5 e 10 dias apresentam melhores resultados quando comparados aos períodos diários. Para o período de 5 dias a evapotranspiração média variou entre 0,6 e 7,8 mm/dia, exceto para o período compreendido

entre 18/02/2009 e 22/02/2009, período este caracterizado por elevada precipitação, em que se registrou uma evapotranspiração média diária de 13,4 mm (Anexo 3). Para o período de 10 dias, a evapotranspiração média variou entre 1,49 e 7,71 mm/dia (Anexo 4). Estes resultados demonstram que ao trabalhar-se com maiores períodos de tempo (escalas de 5 e 10 dias), minimizam-se os problemas decorrentes de pequenos erros de medidas e que ao considerar-se um tempo de resposta maior, contornam-se os efeitos da defasagem nos processos, principalmente no que diz respeito às variáveis escoamento superficial, drenagem e variação do armazenamento de água no solo. Desta forma a grande amplitude de variação da evapotranspiração em escala diária, passa a ser atenuada, fornecendo resultados com maior confiabilidade.

## 5 CONCLUSÕES

Esse trabalho teve por objetivo geral avaliar o comportamento das variáveis hidrológicas (precipitação, escoamento superficial, infiltração, conteúdo de água no solo e evapotranspiração) envolvidas no balanço hídrico, em uma pequena bacia hidrográfica característica do bioma Mata Atlântica na região sul do Brasil. Para isto, utilizou-se um lisímetro de drenagem instalado em área de campo nativo, contendo em seu interior uma amostra de solo não deformado de 1 m<sup>3</sup>.

A partir dos resultados obtidos neste estudo conclui-se que:

A variação da tensão de água no solo e a variação do armazenamento de água no solo diminuem em função da profundidade analisada, apresentando maiores variações durante os períodos secos, sendo a resposta da variação do conteúdo volumétrico de água no solo muito rápida e sensível a ocorrência de precipitações e períodos secos.

As chuvas com intensidades superiores causam escoamento superficial enquanto que chuvas de menor intensidade e bem distribuídas ao longo do evento produzem infiltração e drenagem de água no solo.

O armazenamento de água no solo, determinado por meio de tensiômetro e de TDR, para a profundidade de 30 cm, segue uma mesma tendência de variação, demonstrando que ambos os métodos empregados apresentam desempenho semelhante e são viáveis, nas condições do trabalho aqui descrito.

O balanço hídrico diário, elaborado a partir de determinações lisimétricas, pelo uso do equipamento referido neste estudo, não apresenta bons resultados, principalmente nos períodos em que ocorrem precipitações elevadas, superestimando ou subestimando a evapotranspiração. Já para períodos de 5 e 10 dias, observam-se resultados mais satisfatórios quando comparados a escala diária, devido a atenuação dos possíveis problemas de leitura das variáveis envolvidas no cálculo do balanço hídrico ocorridos na escala diária.

Os resultados obtidos podem ser transferidos para a bacia para estimar o conteúdo volumétrico de água no solo a partir da precipitação, pela aplicação de modelos hidrológicos.

## 6 RECOMENDAÇÕES

- Estudar novas formas de construção e procedimentos de instalação de lisímetros, de maneira a evitar ou minimizar a ocorrência de problemas estruturais como os ocorridos neste trabalho.

- Recomenda-se um maior período de observações onde seja possível avaliar e caracterizar o comportamento de cada uma das variáveis do balanço hídrico junto ao lisímetro bem como em nível de toda a bacia.

- Realizar o monitoramento do balanço hídrico, por meio de lisímetros, em diferentes ambientes (floresta, campo, lavouras) e nos diferentes solos encontrados na bacia hidrográfica.

- Por fim, cabe aqui ressaltar que seria de extrema importância a instalação de uma estação meteorológica na bacia hidrográfica, possibilitando uma melhor caracterização climática da região e o monitoramento das demais variáveis meteorológicas envolvidas na determinação da evapotranspiração e do balanço hídrico.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOUKHALED, A.; ALFARO, A.; SMITH, M. **Lysimeters**. Rome: FAO, 1982. 68p. (Irrigation and Drainage Paper; 39).

AGUILAR, D.J.; KRUKER, J.M.; CALHEIROS, R. DE O.; SILVA, C.A.S. DA. **Determinação da evapotranspiração potencial e balanço hídrico climático da região da Grande Dourados, MS**. Dourados: EMBRAPA-UEPAE. Dourados, 1986. 150p.

ALLEN, R.G., HOWELL, T. A., PRUITT, et al. **Lysimeters for evapotranspiration and environmental measurements**. New York: American Society of Civil Engineers, 1991, 444p.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998, 297p. FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56.

ANGIOLELLA, G.; VASCONCELLOS, V. L. D.; ROSA, J. W. C.; **Estimativa e espacialização do balanço hídrico na mesorregião sul da Bahia**. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21, 2005, INPE, p. 83-90

ARCOVA, F.C S.; CICCIO, V.; ROCHA, P.A.B. **Precipitação efetiva e interceptação das chuvas por floresta de Mata Atlântica em uma microbacia experimental em Cunha - SP**. Revista Árvore, Viçosa - MG, v.27, n.2, p.257-262, 2003.

AZEVEDO NETTO, J. M. **Manual de hidráulica**. São Paulo: Ed. Edgard Blucher, 4a ed., 1966.

AZOLIN, M.A.D.; MUTTI, L.S.M. **Solos da bacia hidrográfica do Vacacaí Mirim**. Relatório Técnico, Porto Alegre, 1988. 20p. (Não publicado).

BACELLAR, L.A.P. **O papel das florestas no regime hidrológico de bacias hidrográficas.** Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto - MG, v.1, p.1-43, 2005. Disponível em: <<http://www.degeo.ufop.br/geobr>>. Acessado em 22 de novembro de 2008.

BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M.A.; MATZENAUER, R.; FONTANA, D.C.; CUNHA, G.R.; SANTOS, M.L.V. dos; FARIAS, J.R.B.; BARNI, N.A. **Agrometeorologia aplicada à irrigação.** Porto Alegre: Ed. Universidade / UFRGS. 1992. 125p.

BERLATO, M.A.; MOLION, L.C.B. **Evaporação e evapotranspiração.** Porto Alegre: IPAGRO/ Secretaria de Agricultura, 1981. 95p. (Boletim Técnico; 7).

BERTONI, J.; LOMBARDI, NETO F. **Conservação do solo.** 3ed. Ícone: São Paulo, 1993. 355p.

BISCARO, G. A. **Meteorologia Agrícola Básica.** 1. ed. Cassilândia: UNI-GRAF Gráfica e Editora União Ltda., 2007. 86 p.

BURMAN, R.D.; NIXON, P.R.; WRIGHT, J.L.; PRUITT, W.O. **Water requirements.** In: JENSEN, M.E. (Ed.) **Design and operation of farm irrigation systems.** St. Joseph: ASAE, 1983. p.189-232.

CAMARGO A.P.; CAMARGO M.B.P. **Uma Revisão Analítica da Evapotranspiração Potencial.** *Bragantina*, Campinas, n.59, v.2, p.125-137, 2000.

CAMARGO, A.P. **A água no solo para a agricultura.** *O Agrônomo*, Campinas, v.57, n.1, p.1-2, 2005.

CAMARGO, A.P. **Contribuição para a determinação da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo.** *Bragantina*, v.21, 1962, p.163-213.

CAMARGO, M.B.P.; CAMARGO, A.P. **Representação gráfica informatizada do extrato do balanço hídrico de Thornthwaite & Mather.** *Bragantina*, Campinas, v.52, n.2, p.169-172, 1993.

CARMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. **Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo.** Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v.5, n.1, p.89-97, 1997.

CARVALHO, D.F.; SILVA, L.D.B.; FOLEGATTI, M.V.; COSTA, J.R.; CRUZ, F.A. **Avaliação da evapotranspiração de referência na região de Seropédica - RJ, utilizando lisímetro de pesagem.** Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v.14, n.2, p.187-95, 2006.

CARVALHO, S.M.; STIPP, N.A.F. **Contribuição ao estudo do balanço hídrico no estado do Paraná - Uma proposta de classificação qualitativa.** Geografia, Londrina, v.13, n.1, 2004. Disponível em: <http://www.geo.uel.br/revista>. Acessado em de outubro de 2008.

CASAGRANDE, L. **Avaliação do parâmetro de propagação de sedimentos do modelo de Williams (1975) na Bacia do rio Vacacaí-Mirim com o auxílio de técnicas de geoprocessamento.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2004. 150p.

COELHO, S.L.; TEIXEIRA, A.S. **Avaliação do tensiômetro eletrônico no monitoramento do potencial matricial de água no solo.** Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.24, n.3, p.536-545, 2004.

COUTO, G.M. **Produção de uma cápsula de tensiômetro** - Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC), 2007. (Resposta Técnica).

CPTEC/INPE - **Normais climatológicas observadas para a região de Santa Maria (RS), entre os períodos de 1960 a 1990.** Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br>> Acessado em 25 de maio de 2008.

DIAS, J.R. **Aplicação do modelo hidrológico AGNPS2001 utilizando dados observados na Bacia do Arroio Vacacaí Mirim.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2003. 120p.



DIRKSEN, C. **Soil physics measurements**. Reiskirchen: Catena-Verlag, 1999, 154 p.

DNAEE – **Manual para Serviços de Hidrometria, Ministério das Minas e Energia**. Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica. São Paulo, SP, Brasil. 977.

DOORENBOS, J., PRUITT, W.O. **Guidelines for predicting crop water requirements**. Rome, FAO, 1977.179p. (Irrigation and Drainage Paper 24).

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação dos solos**. Embrapa, Brasília. 1999. 412 p.

FAO. **Expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements**. Roma: FAO, 1990. (Irrigation and Drainage).

FREITAS, M.M. **Comportamento hidrológico e erosivo de bacias montanhosa sob uso agrícola: estação experimental do rio Boa Vista, Nova Friburgo – RJ**. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1998. 104f.

FUJIEDA, M. et al. **Hydrological processes at two subtropical forest catchments: the Serra do Mar, São Paulo, Brazil**. Journal of Hydrology, Amsterdam, v. 196, n. 1-4, p. 26-46, 1997.

FUSP - Fundação de Apoio à Universidade de São Paulo. **Plano da Bacia do Alto Tietê**. Caderno de irrigação, 2002. Disponível em: <<http://www.sigrh.sp.gov.br/sigrh/ARQS/RELATORIO/CRH/CBH-AT/559/irrigacao.pdf>>  
*Acessado em 10 de dezembro de 2008.*

GALVÍNIO, J.D. **Balanço hídrico à superfície da bacia hidrográfica do açude Epitácio Pessoa utilizando informações digitais do terreno**. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) - Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, 2005. 174f.

GARDNER, C.M.K.; ROBINSON, D.A.; BLYTH, K.; COOPER, J.D. **Soil water content**. In: SMITH, K.A.; MULLINS, C.E. (Ed.). Soil and environmental analysis: Physical methods., New York: Marcel Dekker, p.1-75, 2000.

GENUCHTEN, M.T.V. **A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils.** Soil Science Society of America Journal, Madison, v.44, p.892-898, 1980.

HILLEL, D. **Applications of soil physics.** New York: Academic Press, 1980. 385p.

IMKO. **TRIME-FM User Manual.** IMKO Micromodultechnik GmbH. Germany. 2006. Disponível em <<http://www.imko.de>> Acessado em 14 de janeiro de 2009.

INMET – **Observações Meteorológicas. Dados da Estação Automática: Santa Maria (RS)** Disponível em <<http://www.inmet.gov.br>> Acessado entre Junho de 2008 e Abril de 2009.

JACOBSEN, O.H.; SCHJONNING, P. **A Laboratory calibration of time domain reflectometry for soil water measurement including effects of bulk density and texture.** Journal of Hydrology, v.151, p.147-157, 1993.

KLAR, A.E. **A água no sistema solo-planta-atmosfera.** São Paulo: Nobel, 1984. 408p.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no sistema solo-planta-atmosfera.** Piracicaba: O autor, 1995. 497p.

LIMA, J.E.F.W.; SILVA, C.L.; OLIVEIRA, C.A. da S. **Comparação da evapotranspiração real simulada e observada em uma bacia hidrográfica.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v.5, n.1, p.33-41, 2001.

MACHADO, R.E.; MATTOS, A. **Construção e instalação de um lisímetro com sistema de drenagem.** Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v.9, n.1, p.147-151, 2001.

MARQUES, V.S. **Sobre as limitações dos evapotranspirômetros.** Dissertação (Mestrado em m Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1972. 56f.

MEDEIROS, J.D.F. **Variabilidade Espacial do Conteúdo de Água no Solo na Bacia do Arroio Donato-RS.** Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2004. 139 p.

MELLER, A. **Simulação hidrodinâmica integrada de sistema de drenagem em Santa Maria - RS.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria. 2004. 166 f.

MENDES, R.S. **Determinação da evapotranspiração por métodos direto e indiretos e dos coeficientes de cultura para a soja no Distrito Federal.** Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) - Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília. Brasília, 2006. 58f.

MORAES, M.F. **Estimativa do balanço hídrico na bacia experimental/representativa de Santa Maria/Cambiocó - Município de São José de Ubá – RJ.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2007. 233f.

MORENO, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul.** Porto Alegre, Secretaria da Agricultura. 1961.42p.

MOSCA, A.A.O. **Caracterização hidrológica de duas microbacias visando a identificação de indicadores hidrológicos para o monitoramento ambiental do manejo de florestas plantadas.** Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2003. 88f.

NOBORIO, K. **Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review.** Computers and Electronics in Agriculture, New York, n.31, p. 213–237. 2001.

OLIVEIRA, N.T. **Influência da palha no balanço hídrico em lisímetros.** Dissertação. (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006. 88f.

- OMETTO, J.C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 440p.
- PAIVA, J.B.D. et al. **Monitoramento e modelagem matemática dos recursos hídricos da bacia hidrográfica do arroio Vacacaí Mirim**. (Relatório de Pesquisa). Santa Maria – RS, 1998. 200 p.
- PENMAN, H. L. **Evaporation : an Introductory Survey**. Neth. J. Agric. Sci, n. 4, p. 9 – 29. 1956.
- PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997.183p.
- PINTO, N. L. de S.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J. A.; GOMIDE, F. L. S. **Hidrologia Básica**. São Paulo: Editora Edgar Blücher; Rio de Janeiro, Fundação Nacional de Material Escolar, 1976. 279p.
- RAUDKIVI, A.J. **Hydrology: an advanced introduction to hydrological processes and modelling**. New York: Pergamon, 1979. 479p.
- REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. Piracicaba: Manole, 1987. 188p.
- REICHARDT, K. **Capacidade de campo**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v.12, p.211-216, 1988.
- REICHARDT, K. **Dinâmica da matéria e da energia em ecossistemas**. Piracicaba: Depto. de Física e Meteorologia, USP/ESALQ, 1996. 513p.
- REICHARDT, K; TIMM, L. C. **Solo, Planta e atmosfera: Conceitos, processos e aplicações**. Barueri, SP: Manole, 2004. 478p.
- RESENDE, M.; ALBUQUERQUE, P.E.P. **Métodos e estratégias de manejo de irrigação**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Minas Gerais, 2002, 10p. (Circular Técnica; 19).

ROSSATO, L. **Estimativa da capacidade de armazenamento de água no solo do Brasil.** Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 2002. 145p.

ROTH, K.; SCHULIN, R.; FLUHLER, H.; ATTINGER, W. **Calibration of time domain reflectometry for water content measurement using a composite dielectric** approach. Water Resources Research, v. 26, n. 10, p.2267-2273, 1990.

ROTH, K.; MALICK, M.A.; PLAGGE, R. **Empirical evaluation of the relationship between soil dielectric constant and volumetric water content as the basis for calibrating soil moisture measurements by TDR.** Journal of Soil Science, v.43,p.1-13, 1992.

SANTIAGO, A.V. **Simulação do efeitos da cobertura vegetal no balanço hidrico da bacia do rio Ji-Paraná, RO.** Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba, 2005. 69p.

SANTOS, I.; FILL, H. D.; SUGAI, M. R. B.; BUDA, H.; KISHI, R.; MARONE, E.; LAUTERT, F. L. **Hidrometria aplicada.** Curitiba: LACTEC. 2001. 372p.

SCALOPPI, E.J.; SANTOS, I.A. **Manejo da irrigação através da identificação de deficiência hídrica comparativa em plantas.** In: Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, Reunião Latino-Americana de Agrometeorologia. Florianópolis, Anais... Florianópolis: Sociedade Brasileira de Agrometeorologia, 1999. p. 2603-2607.

SEDIYAMA, G.C. **Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica.** Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria, v.4, n.1, 1996.

SENTELHAS, P.C. **Estimativa diária da evapotranspiração de referência com dados de estação meteorológica convencional e automática.** Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. Piracicaba, 1998. 97f.

SENTELHAS, P.C. et al. **Balances Hídricos Climatológicos do Brasil**. Universidade de São Paulo, Departamento de Ciências Exatas, Piracicaba, 1999 (Boletim Técnico). Disponível em: <<http://www.lce.esalq.usp.br/nurma.html>> Acesso em: 22 de Junho. 2008.

SOUZA, J.L.M. **Modelo de análise de risco econômico aplicado ao planejamento de projetos de irrigação para cultura do cafeeiro**. Piracicaba. Tese de Doutorado. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. 2001. 253 p.

STE. **Avaliação quali-quantitativa das demandas e disponibilidades de água na bacia hidrográfica do Rio Vacacaí. – Cenário Atual.** – Serviços Técnicos de Engenharia S.A. 1998. 220p.

TEIXEIRA, A.S.; COELHO, S.L. **Desenvolvimento e calibração de um tensiômetro eletrônico de leitura automática**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.25, n.2, p.367-376, 2005.

THORNTHWAITE, C.W. **An approach toward a rational classification of climate**. Geogr. Rev, v.38, p.55-94, 1948.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. Publications in Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 104p. 1955.

TOMASELLA, J.T.G.; ROSSATO, L. **Tópicos em Meio Ambiente e Ciências Atmosféricas – Balanço Hídrico**. INPE, São José dos Campos, 2005.

TOMMASELLI, J.T.G. **Influência de algumas características do solo na calibração de um aparelho de TDR (Time-Domain Reflectometry)**. Tese (Doutorado em Engenharia Nuclear na Agricultura) – Centro de Energia Nuclear, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997. 109p.

TOMMASELLI, J.T.G.; BACHI, O.O.S. **Calibração de um equipamento de TDR para medida de umidade de solos**. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.36, n.9, p.1145-1154, 2001.

TOOP, G. C.; DAVIS, J. L.; ANNAN A. P. **Electromagnetic determination of soil water content: measurement in a coaxial transmission lines.** Water Resour. Res., Washington, v.16, p.574-582, 1980.

TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F.C.L. do. **Meteorologia descritiva: fundamentos e aplicações brasileiras.** São Paulo: Nobel, 1986. 374p.

TUCCI, C.E.M. **Hidrologia Ciência e Aplicação.** 2 ed. Porto Alegre: Editora da Universidade: ABRH, 1993. 943p.

TUCCI, C.E.M. **Impactos da variabilidade climática sobre os recursos hídricos do Brasil.** Brasília, ANA, 2002. 70p.

UNESCO. **Guía Metodológica para la Elaboración del Balance Hídrico de América del Sur.** Montevideu, Uruguai. 1982. 130p.

VETTORI, L. **Método de Análise do Solo.** Rio de Janeiro, Ministério da Agricultura. 1969. 24p. (Boletim Técnico nº 7).

VILLAGRA, M.M.; MATSUMOTO, O.M.; BACCHI, O.O.S.; MORAES, S.O.; LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K. **Tensiometria e variabilidade espacial em terra roxa estruturada.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v.12, p.205-210, 1988.

ZEGELIN, S.J.; WHITE, I.; JENKINS, D.R. **Improved field probes for soil water content and electrical conductivity measurement using time domain reflectometry.** Water Resources Research, v.25, n.11, p.2367-2376, 1989.

ZEGELIN, S.J.; WHITE, I.; RUSSEL, G.F. **Acritique of time domain reflectometry technique for determining field soil water content.** In: TOOP, G.C.; REYNOLDS, W.D.; GREEN, R.E. (Ed.). *Advances in measurement of soil physical properties: bringing theory into practice.* Madson: Soil Science Society of America, p.187-208, 1992. (SSSA Special Publication, 30).

## **ANEXOS**



ANEXO 1 – Laudo de análises físicas do solo presente na região do lisímetro.

Identific. da amostra	Densidades (gcm <sup>-3</sup> )		Porosidade (%)			Umidade Volumétrica (cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup> )							
	Solo	Partíc.	Macro	Micro	Total	Satur.	1(-Kpa)	6(-Kpa)	10(-Kpa)	33(-Kpa)	100(-Kpa)	500(-Kpa)	1500(-Kpa)
10 cm	1,41	2,57	24,16	20,94	45,10	43,77	39,42	20,94	15,28	13,42	11,51	9,45	7,89
	1,45	2,57	23,03	20,56	43,59	40,63	38,68	20,56	15,66	12,71	11,21	-	-
	1,46	2,57	20,08	23,11	43,18	44,05	40,42	23,11	17,06	15,41	13,92	-	-
média	1,44	2,57	22,43	21,53	43,96	42,82	39,51	21,53	16,00	13,84	12,21	9,45	7,89
30 cm	1,42	2,57	25,62	19,12	44,74	47,16	43,07	19,12	13,05	9,86	7,53	6,99	5,03
	1,32	2,57	31,51	17,03	48,53	47,99	41,51	17,03	11,33	8,24	7,07	-	-
	1,37	2,57	28,43	18,30	46,73	47,15	43,59	18,30	12,79	9,66	8,24	-	-
média	1,37	2,57	28,52	18,15	46,67	47,44	42,72	18,15	12,39	9,25	7,61	6,99	5,03
70 cm	1,38	2,59	26,09	20,64	46,73	41,47	39,19	20,64	14,23	10,00	8,70	7,03	5,45
	1,43	2,59	23,16	21,77	44,93	41,21	39,37	21,77	15,47	11,42	9,73	-	-
	1,43	2,59	24,33	20,60	44,93	41,49	38,84	20,60	14,78	11,73	9,95	-	-
média	1,41	2,59	24,53	21,00	45,53	41,39	39,13	21,00	14,83	11,05	9,46	7,03	5,45

Metodologia: densidade- solo: anel, partícula: balão volumétrico; porosidades: macro- cálculo, micro: mesa de tensão, total: fórmula; curva de retenção de umidade 1, 6 e 10 Kpa: mesa de tensão, 33 e 100 Kpa: panela de pressão, 500 e 1500 Kpa: medidor de potencial de água- WP4

**ANEXO 2** – Balanço hídrico diário obtido a partir de dados lisimétricos na sub-bacia Rancho do Amaral, no período compreendido entre janeiro e abril de 2009.

<b>Período</b> (dias)	<b>Precipitação</b> (mm)	<b>Esc. Superf.</b> (mm)	<b>Infiltração</b> (mm)	<b>A (0-90)</b> (mm)	<b>Δ A</b> (mm)	<b>ETP diária</b> (mm)
13/1/2009	3,2	0,1	0,9	130,2	-	-
14/1/2009	1,4	0,0	0,0	130,2	0,0	1,4
15/1/2009	0,0	0,0	0,0	128,9	-1,3	1,3
16/1/2009	0,0	0,0	0,0	131,1	2,1	-2,1
17/1/2009	0,0	0,0	0,0	124,6	-6,5	6,5
18/1/2009	0,0	0,0	0,0	123,7	-0,9	0,9
19/1/2009	67,0	6,5	9,4	124,8	1,1	50,1
20/1/2009	17,8	0,0	17,5	144,8	20,0	-19,8
21/1/2009	0,0	0,0	3,0	137,8	-7,0	4,0
22/1/2009	0,0	0,0	0,3	134,1	-3,7	3,4
23/1/2009	0,2	0,0	0,0	133,1	-1,1	1,3
24/1/2009	0,0	0,0	0,0	130,5	-2,5	2,5
25/1/2009	0,0	0,0	0,0	124,6	-5,9	5,9
26/1/2009	10,6	0,0	0,0	127,7	3,1	7,5
27/1/2009	0,6	0,0	0,0	127,4	-0,3	0,9
28/1/2009	0,0	0,0	0,0	120,3	-7,1	7,1
29/1/2009	12,2	0,2	0,0	125,0	4,7	7,3
30/1/2009	13,4	0,4	0,0	138,9	13,9	-1,0
31/1/2009	0,4	0,0	0,0	137,1	-1,8	2,2
1/2/2009	0,0	0,0	0,0	134,1	-3,0	3,0
2/2/2009	0,0	0,0	0,0	134,3	0,2	-0,2
3/2/2009	10,6	0,0	0,0	136,0	1,6	9,0
4/2/2009	9,2	0,0	0,0	138,9	2,9	6,3
5/2/2009	0,2	0,0	0,0	132,3	-6,5	6,7
6/2/2009	0,0	0,0	0,0	132,1	-0,2	0,2
7/2/2009	0,0	0,0	0,0	130,3	-1,8	1,8
8/2/2009	0,0	0,0	0,0	128,2	-2,1	2,1
9/2/2009	0,0	0,0	0,0	121,8	-6,4	6,4
10/2/2009	0,0	0,0	0,0	121,2	-0,6	0,6
11/2/2009	31,2	0,7	0,0	140,2	19,0	11,6
12/2/2009	10,4	0,1	0,0	135,9	-4,3	14,6
13/2/2009	0,0	0,0	0,0	134,7	-1,2	1,2
14/2/2009	0,0	0,0	0,0	133,1	-1,6	1,6
15/2/2009	0,0	0,0	0,0	132,5	-0,5	0,5
16/2/2009	0,2	0,0	0,0	132,7	0,2	0,1
17/2/2009	0,2	0,0	0,0	126,3	-6,4	6,6

Continuação

<b>Período</b> (dias)	<b>Precipitação</b> (mm)	<b>Esc. Superf.</b> (mm)	<b>Infiltração</b> (mm)	<b>A (0-90)</b> (mm)	<b>Δ A</b> (mm)	<b>ETP diária</b> (mm)
18/2/2009	0,0	0,0	0,0	122,0	-4,2	4,2
19/2/2009	35,0	0,0	0,0	140,7	18,7	16,3
20/2/2009	39,6	0,2	0,0	140,1	-0,6	39,9
21/2/2009	43,2	0,9	20,2	150,0	9,9	12,2
22/2/2009	0,0	0,0	12,6	143,0	-7,0	-5,6
23/2/2009	25,2	0,0	1,5	143,8	0,8	22,9
24/2/2009	4,6	0,0	12,5	141,5	-2,3	-5,6
25/2/2009	0,0	0,0	2,1	139,5	-2,0	-0,1
26/2/2009	2,0	0,0	0,5	138,7	-0,8	2,3
27/2/2009	31,6	0,0	12,7	139,1	0,3	18,6
28/2/2009	0,0	0,0	4,9	141,5	2,5	-7,4
1/3/2009	0,0	0,0	1,4	137,1	-4,4	3,0
2/3/2009	20,8	1,4	0,6	159,6	22,5	-3,7
3/3/2009	77,2	3,5	46,7	142,4	-17,2	44,2
4/3/2009	0,2	0,0	3,6	137,9	-4,5	1,1
5/3/2009	0,6	0,0	0,8	135,2	-2,8	2,6
6/3/2009	0,0	0,0	0,0	133,1	-2,1	2,1
7/3/2009	0,2	0,0	0,0	131,0	-2,1	2,2
8/3/2009	0,0	0,0	0,0	134,7	3,7	-3,7
9/3/2009	2,2	0,0	0,0	131,8	-2,9	5,1
10/3/2009	5,8	0,0	0,0	132,2	0,4	5,4
11/3/2009	0,4	0,0	0,0	134,7	2,5	-2,1
12/3/2009	6,2	0,0	0,0	133,8	-0,9	7,1
13/3/2009	4,2	0,0	0,0	137,7	3,9	0,3
14/3/2009	0,0	0,0	0,0	136,1	-1,6	1,6
15/3/2009	0,0	0,0	0,0	133,2	-2,9	2,9
16/3/2009	0,4	0,0	0,0	132,5	-0,7	1,1
17/3/2009	5,4	0,0	0,0	137,2	4,7	0,7
18/3/2009	11,4	0,0	0,0	138,9	1,7	9,7
19/3/2009	0,0	0,0	0,0	134,7	-4,3	4,3
20/3/2009	0,0	0,0	0,0	134,7	0,0	0,0
21/3/2009	0,2	0,0	0,0	132,1	-2,5	2,7
22/3/2009	0,2	0,0	0,0	133,4	1,2	-1,0
23/3/2009	0,4	0,0	0,0	131,8	-1,6	2,0
24/3/2009	0,0	0,0	0,0	128,1	-3,7	3,7
25/3/2009	0,0	0,0	0,0	126,6	-1,6	1,6
26/3/2009	0,0	0,0	0,0	126,2	-0,4	0,4
27/3/2009	14,6	0,0	0,0	129,7	3,5	11,1

Continuação

<b>Período</b> (dias)	<b>Precipitação</b> (mm)	<b>Esc. Superf.</b> (mm)	<b>Infiltração</b> (mm)	<b>A (0-90)</b> (mm)	<b>Δ A</b> (mm)	<b>ETP diária</b> (mm)
28/3/2009	0,2	0,0	0,0	131,4	1,7	-1,5
29/3/2009	0,0	0,0	0,0	131,7	0,4	-0,4
30/3/2009	0,0	0,0	0,0	124,8	-6,9	6,9
31/3/2009	0,2	0,0	0,0	126,5	1,7	-1,5
1/4/2009	0,0	0,0	0,0	125,3	-1,2	1,2
2/4/2009	0,0	0,0	0,0	126,2	0,9	-0,9
3/4/2009	0,2	0,0	0,0	127,2	1,0	-0,8
4/4/2009	12,6	0,0	0,0	129,0	1,8	10,8
5/4/2009	0,0	0,1	0,0	128,1	-0,9	0,9
6/4/2009	0,0	0,0	0,0	127,6	-0,5	0,5
7/4/2009	0,4	0,0	0,0	127,6	0,0	0,4
8/4/2009	0,2	0,0	0,0	124,7	-2,9	3,1
9/4/2009	0,4	0,0	0,0	126,8	2,2	-1,8
10/4/2009	0,0	0,0	0,0	126,2	-0,7	0,7
11/4/2009	0,0	0,0	0,0	121,1	-5,1	5,1
12/4/2009	0,0	0,0	0,0	123,7	2,6	-2,6
13/4/2009	0,0	0,0	0,0	118,9	-4,9	4,9
14/4/2009	0,0	0,0	0,0	118,4	-0,4	0,4
15/4/2009	0,0	0,0	0,0	118,0	-0,4	0,4
16/4/2009	0,2	0,0	0,0	115,9	-2,1	2,3
17/4/2009	0,2	0,0	0,0	117,1	1,1	-0,9
18/4/2009	0,0	0,0	0,0	116,4	-0,6	0,6
19/4/2009	0,0	0,0	0,0	116,7	0,3	-0,3
20/4/2009	23,6	0,0	0,0	128,4	11,7	11,9
21/4/2009	0,4	0,0	0,0	130,0	1,6	-1,2
22/4/2009	0,2	0,0	0,0	129,9	-0,1	0,3
23/4/2009	0,2	0,0	0,0	128,7	-1,2	1,4
24/4/2009	0,2	0,0	0,0	126,5	-2,2	2,4
25/4/2009	0,2	0,0	0,0	125,6	-0,9	1,1
26/4/2009	0,2	0,0	0,0	126,0	0,4	-0,2
27/4/2009	0,0	0,0	0,0	128,0	2,0	-2,0
28/4/2009	0,0	0,0	0,0	126,0	-2,0	2,0
29/4/2009	0,0	0,0	0,0	125,6	-0,4	0,4
30/4/2009	0,0	0,0	0,0	124,4	-1,3	1,3

**ANEXO 3** – Balanço hídrico para o período de 5 dias (quinquidial) obtido a partir de dados lisimétricos na sub-bacia Rancho do Amaral, entre janeiro e abril de 2009.

Período (dias)	Tempo (quinquídio)	Precipitação (mm)	Esc. Superf. (mm)	Infiltração (mm)	A (0-90) (mm)	Δ A (mm)	Evapotranspiração	
							5 dias (mm)	Média/dia (mm)
18/1/2009	0	1,4	0,0	0,0	123,7	-	-	-
23/1/2009	1	85,0	6,5	30,2	133,1	9,3	39,0	7,8
28/1/2009	2	11,2	0,0	0,0	120,3	-12,8	24,0	4,8
2/2/2009	3	26,0	0,6	0,0	134,3	14,1	11,3	2,3
7/2/2009	4	20,0	0,0	0,0	130,3	-4,0	24,0	4,8
12/2/2009	5	41,6	0,8	0,0	135,9	5,6	35,3	7,1
17/2/2009	6	0,4	0,0	0,0	126,3	-9,6	10,0	2,0
22/2/2009	7	117,8	1,2	32,8	143,0	16,8	67,1	13,4
27/2/2009	8	63,4	0,0	29,2	139,1	-4,0	38,1	7,6
4/3/2009	9	98,2	4,9	57,2	137,9	-1,1	37,2	7,4
9/3/2009	10	3,0	0,0	0,8	131,8	-6,2	8,3	1,7
14/3/2009	11	16,6	0,0	0,0	136,1	4,3	12,3	2,5
19/3/2009	12	17,2	0,0	0,0	134,7	-1,4	18,6	3,7
24/3/2009	13	0,8	0,0	0,0	128,1	-6,6	7,4	1,5
29/3/2009	14	14,8	0,0	0,0	131,7	3,6	11,2	2,2
3/4/2009	15	0,4	0,0	0,0	127,2	-4,5	4,9	1,0
8/4/2009	16	13,2	0,1	0,0	124,7	-2,5	15,7	3,1
13/4/2009	17	0,4	0,0	0,0	118,9	-5,8	6,2	1,2
18/4/2009	18	0,4	0,0	0,0	116,4	-2,4	2,8	0,6
23/4/2009	19	24,4	0,0	0,0	128,7	12,3	12,1	2,4
28/4/2009	20	0,6	0,0	0,0	126,0	-2,7	3,3	0,7

**ANEXO 4** – Balanço hídrico para o período de 10 dias (decêndial) obtido a partir de dados lisimétricos na sub-bacia Rancho do Amaral, no período compreendido entre janeiro e abril de 2009.

Período (dias)	Tempo (decêndio)	Precipitação (mm)	Esc. Superf. (mm)	Infiltração (mm)	A <sub>(0-90)</sub> (mm)	Δ A (mm)	Evapotranspiração	
							Decêndio (mm)	Média/dia (mm)
13/1/09	0	-	-	-	130,23	-	-	-
23/1/09	1	86,4	6,5	30,2	133,06	2,82	46,8	4,68
2/2/09	2	37,2	0,6	0,0	134,34	1,29	35,3	3,53
12/2/09	3	61,6	0,8	0,0	135,88	1,54	59,3	5,93
22/2/09	4	118,2	1,2	32,8	143,01	7,13	77,1	7,71
4/3/09	5	161,6	5,0	86,4	137,93	-5,08	75,3	7,53
14/3/09	6	19,6	0,0	0,8	136,05	-1,88	20,6	2,06
24/3/09	7	18,0	0,0	0,0	128,11	-7,95	25,9	2,59
3/4/09	8	15,2	0,0	0,0	127,20	-0,90	16,1	1,61
13/4/09	9	13,6	0,1	0,0	118,85	-8,35	21,9	2,19
23/4/09	10	24,8	0,0	0,0	128,72	9,87	14,9	1,49