

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ**  
**SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**DEPARTAMENTO DE SOLOS E ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**PRECIPITAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA ESTIMADAS  
COM METODOLOGIA ALTERNATIVA, VOLTADAS À REALIZAÇÃO DO  
BALANÇO HÍDRICO DIÁRIO**

**CURITIBA**  
**2009**

**ROSSANA FERRARI SCHÄFER**

**PRECIPITAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA ESTIMADAS  
COM METODOLOGIA ALTERNATIVA, VOLTADAS À REALIZAÇÃO DO  
BALANÇO HÍDRICO DIÁRIO**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre. Curso de Pós-Graduação em Ciências do Solo /DSEA/SCA/UFPR, Área de concentração: Qualidade e Sustentabilidade Ambiental, na linha de pesquisa: Desenvolvimento de tecnologias para sustentabilidade agrícola e urbana.

Orientador: Prof. Dr. Jorge Luiz Moretti de Souza

**CURITIBA  
2009**

Dedico este trabalho ao meu esposo, à minha filha e ao meu orientador por terem me ensinado primeiro a sonhar, e depois a lutar pelos meus sonhos. A estes toda a minha gratidão pelo amor, carinho, atenção, apoio e confiança que nunca me negaram.

## AGRADECIMENTOS

- Primeiramente a Deus, que nos momentos certos, interveio poderosamente na minha vida, possibilitando que este dia finalmente chegasse;
- À Coordenação de Pós-Graduação em Ciência do Solo por ter me aceito no seu quadro de alunos e possibilitado, sempre de maneira excepcional, que eu realizasse este trabalho;
- Ao meu orientador Jorge Luiz Moretti de Souza, que mais do que orientador, foi um verdadeiro amigo;
- Ao meu esposo Herbert, por ter acreditado e investido em mim, ao me persuadir a candidatar-me para o mestrado;
- À diretora Andrea Rissato, do Colégio Estadual Amâncio Moro, e ao diretor Marcos Pereira do Colégio Estadual Alfredo Parodi, ambos em Curitiba-PR, pelo apoio e incentivo;
- Ao Departamento de Solos e Engenharia Agrícola da UFPR como um todo e individualmente a cada um dos professores e funcionários deste departamento pelo apoio e pelas condições de trabalho, sempre muito boas;
- À minha amiga Margareth Schaffer por me fazer acreditar que o mestrado era um sonho possível.
- Aos meus demais amigos (parentes ou não).

## SUMÁRIO

<b>RESUMO</b> .....	<b>ix</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xi</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>2</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	2
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	2
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>3</b>
3.1 BALANÇO HÍDRICO .....	3
3.1.1 Balanço hídrico quanto à escala temporal e procedimentos para sua realização .....	4
3.2 BALANÇO HÍDRICO DE THORNTHWAITE E MATHER (1955) .....	6
3.2.1 Precipitação .....	7
3.2.2 Evapotranspiração .....	11
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>15</b>
4.1 LOCAL DE REALIZAÇÃO DO TRABALHO .....	15
4.2 PRINCIPAIS ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO .....	15
4.3 MÉTODOS PADRÃO E ALTERNATIVOS UTILIZADOS PARA MEDIR OU ESTIMAR A PRECIPITAÇÃO .....	16
4.3.1 Análises comparativas entre o pluviômetro padrão ( <i>Ville de Paris</i> ) e alternativos .....	20
4.3.2 Coleta e avaliação da precipitação pluviométrica .....	24
4.4 MÉTODOS PADRÃO E ALTERNATIVOS UTILIZADOS PARA ESTIMAR A EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA ( <i>ET<sub>o</sub></i> ) .....	25
4.4.1 Método padrão para estimativa da evapotranspiração de referência ( <i>ET<sub>o</sub></i> ) .....	25
4.4.2 Métodos alternativos para estimativa da evapotranspiração de referência ( <i>ET<sub>o</sub></i> ) .....	26
4.4.3 Coleta dos dados climáticos e avaliação da evapotranspiração de referência ( <i>ET<sub>o</sub></i> ) .....	29
4.5 CENÁRIO PARA VERIFICAÇÃO DOS COMPONENTES DO BALANÇO HÍDRICO UTILIZANDO OS MÉTODOS PADRÃO E ALTERNATIVO .....	31
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>34</b>
5.1 RELAÇÃO ENTRE A PRECIPITAÇÃO MEDIDA COM O PLUVIÔMETRO PADRÃO E ESTIMADA COM OS PLUVIÔMETROS ALTERNATIVOS .....	34
5.2 EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA ( <i>ET<sub>o</sub></i> ) .....	39
5.2.1 Variação de alguns elementos climáticos no período de 1998 a 2007 .....	39
5.2.2 Comparação dos valores de <i>ET<sub>o</sub></i> estimados com os métodos alternativos e padrão .....	41
5.3 BALANÇOS HÍDRICOS CALCULADOS COM AS METODOLOGIAS PADRÃO E ALTERNATIVA .....	52
<b>6 CONCLUSÕES</b> .....	<b>61</b>
<b>7 REFERÊNCIAS</b> .....	<b>62</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 4.1 – Pluviômetro tipo <i>Ville de Paris</i> , utilizado para medir a precipitação da área experimental (leitura padrão).....	16
FIGURA 4.2 – Estrutura de sustentação dos pluviômetros, fixados em uma barra de ferro, a 1,5 m de altura da superfície do solo, contendo encaixes construídos de latão rebitado .....	18
FIGURA 4.3 – Distribuição dos pluviômetros na área experimental, sendo: <i>Ville de Paris</i> ; Alternativo 1 a 8; conforme especificações dispostas na Tabela 4.1 .....	19
FIGURA 4.4 – Vista da área experimental onde foram instalados os pluviômetros .....	19
FIGURA 4.5 – Representação gráfica da área de captação da precipitação (seção transversal) dos pluviômetros alternativos, sendo: (a) Alternativo 2; (b) Alternativo 3; e, (c) Alternativo 4 .....	20
FIGURA 4.6 – Pluviômetro Alternativo 1, construído a partir de uma garrafa <i>PET</i> e de um funil plástico de 283,50 cm <sup>2</sup> de área de captação .....	21
FIGURA 4.7 – Pluviômetros Alternativos 2, 3 e 4, construídos a partir de garrafas <i>PET</i> de mesma marca comercial e material, possuindo diferentes áreas de captação .....	21
FIGURA 4.8 – Pluviômetro Alternativo 5, construído a partir de uma garrafas <i>PET</i> e contendo uma mangueira com torneira .....	22
FIGURA 4.9 – Pluviômetro alternativo 6, construído a partir de uma garrafa <i>PET</i> e contendo um funil interno .....	23
FIGURA 4.10 – Pluviômetro alternativo 7, construído a partir de uma garrafa <i>PET</i> e contendo pintura interna e externa com tinta acrílica .....	23
FIGURA 4.11 – Pluviômetro Alternativo 8, comercial, construído de material plástico cristal e PS, possuindo área de captação de 5,72 cm <sup>2</sup> , com escala variando de 5 mm a 150 mm, e obtendo precisão de 2 mm .....	24
FIGURA 5.1 – Regressão linear e seu respectivo coeficiente de correlação (R), índices “d” de WILLMOTT <i>et al.</i> (1985) e “c” de CAMARGO e SENTELHAS (1997), resultante das análises entre os valores de precipitação medidos com o pluviômetro padrão ( <i>Ville de Paris</i> ) e Alternativos, sendo: (a) Alternativo 1; (b) Alternativo 2; (c) Alternativo 3; (d) Alternativo 4; (e) Alternativo 5; (f) Alternativo 6; (g) Alternativo 7; e, (h) Alternativo 8 .....	35
FIGURA 5.2 – Estimativa da evapotranspiração de referência média (mm dia <sup>-1</sup> ), obtida no período de dez anos (série de 1998 a 2007) para os meses do ano, com os métodos de Penman-Monteith ( <i>ET<sub>OPM</sub></i> ), Thornthwaite ( <i>ET<sub>OTW</sub></i> ), Camargo ( <i>ET<sub>OCM</sub></i> ), Hargreaves e Samani ( <i>ET<sub>OHS</sub></i> ), Budyko ( <i>ET<sub>OBK</sub></i> ) e Linacre ( <i>ET<sub>OLC</sub></i> ) .....	42

- FIGURA 5.3 – Estimativa da evapotranspiração de referência média ( $\text{mm dia}^{-1}$ ), obtida no período de dez anos (série de 1998 a 2007) para as estações do ano, com os métodos de Penman-Monteith ( $ET_{OPM}$ ), Thornthwaite ( $ET_{OTW}$ ), Camargo ( $ET_{OCM}$ ), Hargreaves e Samani ( $ET_{OHS}$ ), Budyko ( $ET_{OBK}$ ) e Linacre ( $ET_{OLC}$ ) ..... 43
- FIGURA 5.4 – Análise de regressão linear, coeficiente de correlação (R) e índices “d” de WILLMOTT *et al.* (1985) e “c” de CAMARGO e SENTELHAS (1997), obtidos da relação entre valores diários de  $ET_{OPM}$  e  $ET_{OTW}$ , considerando os anos de 1998 a 2007, para o período: (a) Verão; (b) Outono; (c) Inverno; (d) Primavera; e, (e) Anual ..... 46
- FIGURA 5.5 – Análise de regressão linear, coeficiente de correlação (R), índices “d” de WILLMOTT *et al.* (1985) e “c” de CAMARGO e SENTELHAS (1997), obtidos da relação entre valores diários de  $ET_{OPM}$  e  $ET_{OCM}$ , considerando os anos de 1998 a 2007, para o período: (a) Verão; (b) Outono; (c) Inverno; (d) Primavera; e, (e) Anual ..... 47
- FIGURA 5.6 – Análise de regressão linear, coeficiente de correlação (R), índices “d” de WILLMOTT *et al.* (1985) e “c” de CAMARGO e SENTELHAS (1997), obtidos da relação entre valores diários de  $ET_{OPM}$  e  $ET_{OHS}$ , considerando os anos de 1998 a 2007, para o período: (a) Verão; (b) Outono; (c) Inverno; (d) Primavera; e, (e) Anual ..... 48
- FIGURA 5.7 – Análise de regressão linear, coeficiente de correlação (R), índices “d” de WILLMOTT *et al.* (1985) e “c” de CAMARGO e SENTELHAS (1997), obtidos da relação entre valores diários de  $ET_{OPM}$  e  $ET_{OBK}$ , considerando os anos de 1998 a 2007, para o período: (a) Verão; (b) Outono; (c) Inverno; (d) Primavera; e, (e) Anual ..... 49
- FIGURA 5.8 – Análise de regressão linear, coeficiente de correlação (R), índices “d” de WILLMOTT *et al.* (1985) e “c” de CAMARGO e SENTELHAS (1997), obtidos da relação entre valores diários de  $ET_{OPM}$  e  $ET_{OLC}$ , considerando os anos de 1998 a 2007, para o período: (a) Verão; (b) Outono; (c) Inverno; (d) Primavera; e, (e) Anual ..... 50
- FIGURA 5.9 – Componentes do balanço hídrico diário ( $ARM$ ,  $ER$  e  $DEF$ ), calculados de julho de 2008 a janeiro de 2009 (fechamento em quinzenas), utilizando dados de  $P$  e  $ET_o$  obtidos com metodologia padrão (*Ville de Paris* e  $ET_{OPM}$ ) e alternativa (Alternativo 4 e  $ET_{OCM}$ ), para solos possuindo  $CAD$  igual 30 mm, 60 mm, 90 mm e 120 mm ( $kc = 1,0$  e  $p = 0,5$ ), sendo: (a) armazenamento ( $ARM$ ); (b) evapotranspiração real ( $ER$ ); (c) deficiência hídrica ( $DEF$ ) ..... 57
- FIGURA 5.10 – Erro absoluto (em módulo) no valor da deficiência hídrica ( $DEF$ ), verificada entre os balanços hídricos realizados com metodologia padrão e alternativa para as  $CAD$ 's de 30 mm, 60 mm, 90 mm e 120 mm (com fechamento quinzenal), contraposto ao total de precipitação pluviométrica ( $P_{\text{Ville de Paris}}$ ) ocorrida no período considerado ..... 58

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Área de captação, altura de instalação, características construtivas e capacidade de registro dos pluviômetros utilizados (padrão e alternativos)	18
Tabela 4.2 – Critério de interpretação do desempenho dos métodos de estimativa da $ET_o$ , pelo índice “c” de CAMARGO e SENTELHAS (1997) .....	30
Tabela 5.1 – Coeficiente de correlação (R), índices “d” de WILLMOTT <i>et al.</i> (1985) e “c” de CAMARGO e SENTELHAS (1997), determinados nas análises, contrastando os valores de precipitação medida com o pluviômetro padrão ( <i>Ville de Paris</i> ) e estimada com os pluviômetros alternativos 1 a 8 .....	34
Tabela 5.2 – Médias mensais, desvios padrão e coeficientes de variação (CV) da temperatura média do ar ( $T_{MED}$ ), umidade relativa do ar (UR) e velocidade do vento (VV), a dez metros de altura, para um período de dez anos (série de 1998 a 2007) .....	40
Tabela 5.3 – Médias, desvios padrão e coeficientes de variação (CV) da temperatura média do ar ( $T_{MED}$ ), umidade relativa do ar (UR) e velocidade do vento (VV), a dez metros de altura, para o período de dez anos (série de 1998 a 2007), nas estações do ano .....	40
Tabela 5.4 – Médias mensais, desvios padrão e coeficientes de variação (CV) da radiação solar no topo da atmosfera ( $Q_o$ ) e temperatura de ponto de orvalho ( $T_d$ ), para o período de dez anos (série de 1998 a 2007) .....	41
Tabela 5.5 – Médias, desvios padrão e coeficientes de variação (CV) da radiação solar no topo da atmosfera ( $Q_o$ ) e temperatura de ponto de orvalho ( $T_d$ ), para o período de dez anos (série de 1998 a 2007), nas estações do ano .....	41
Tabela 5.6 – Estimativa da evapotranspiração de referência média ( $\text{mm dia}^{-1}$ ), obtida no período de dez anos (série de 1998 a 2007) para os meses do ano, com os métodos de Penman-Monteith ( $ET_{OPM}$ ), Thornthwaite ( $ET_{OTW}$ ), Camargo ( $ET_{OCM}$ ), Hargreaves e Samani ( $ET_{OHS}$ ), Budyko ( $ET_{OBK}$ ) e Linacre ( $ET_{OLC}$ ) .....	42
Tabela 5.7 – Estimativa da evapotranspiração de referência média ( $\text{mm dia}^{-1}$ ), obtida no período de dez anos (série de 1998 a 2007) para as estações do ano, com os métodos de Penman-Monteith ( $ET_{OPM}$ ), Thornthwaite ( $ET_{OTW}$ ), Camargo ( $ET_{OCM}$ ), Hargreaves e Samani ( $ET_{OHS}$ ), Budyko ( $ET_{OBK}$ ) e Linacre ( $ET_{OLC}$ ) .....	43
Tabela 5.8 – Coeficiente de correlação (R) e índices “d” de WILLMOTT <i>et al.</i> (1985) e “c” de CAMARGO e SENTELHAS (1997), obtidos para os métodos alternativos de Thornthwaite ( $ET_{OTW}$ ), Camargo ( $ET_{OCM}$ ), Hargreaves e Samani ( $ET_{OHS}$ ), Budyko ( $ET_{OHS}$ ) e Linacre ( $ET_{OHS}$ ), tendo o método de Penman-Monteith ( $ET_{OPM}$ ) como padrão .....	45

Tabela 5.9 – Valores diários de $ET_o$ e precipitação, apresentados em agrupamentos quinzenais, utilizados nos balanços hídricos diários, empregando metodologias padrão ( $ET_{oPM}$ e $P_{Ville\ de\ Paris}$ ) e alternativa ( $ET_{oCM}$ e $P_{Alternativo4}$ ), incluindo desvios, verificados no período entre julho de 2008 e janeiro de 2009 .....	53
Tabela 5.10 – Componentes do balanço hídrico diário ( $ARM$ , $ER$ e $DEF$ ), calculados de julho de 2008 a janeiro de 2009 (fechamento em quinzenas), utilizando dados de $P$ e $ET_o$ obtidos com metodologia padrão ( $Ville\ de\ Paris$ e $ET_{oPM}$ ) e alternativa (Alternativo 4 e $ET_{oCM}$ ), para solos possuindo $CAD$ igual 30 mm, 60 mm, 90 mm e 120 mm ( $k_c = 1,0$ e $p = 0,5$ ) .....	56
Tabela 5.11 – Erro no valor da deficiência hídrica ( $DEF$ ), verificada entre os balanços hídricos realizados com metodologia padrão e alternativa para $CAD$ 's de 30 mm, 60 mm, 90 mm e 120 mm (com fechamento quinzenal), contraposto ao total de precipitação pluviométrica ( $P_{Ville\ de\ Paris}$ ) e evapotranspiração de referência ( $ET_{oPM}$ ) ocorrida no período considerado .....	58

# **PRECIPITAÇÃO E EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA ESTIMADAS COM METODOLOGIA ALTERNATIVA, VOLTADAS À REALIZAÇÃO DO BALANÇO HÍDRICO DIÁRIO**

**AUTORA: ROSSANA FERRARI SCHÄFER**

**ORIENTADOR: Prof. Dr. JORGE LUIZ MORETTI DE SOUZA**

## **RESUMO**

O balanço hídrico constitui-se em uma ferramenta fundamental para a agricultura e mesmo os métodos mais simplificados necessitam da entrada de algumas variáveis climáticas que requerem cálculos complexos ou equipamentos de alto custo. O objetivo deste trabalho foi identificar e analisar métodos alternativos para estimativa de duas variáveis de entrada (precipitação e evapotranspiração) em um balanço hídrico diário, em comparação com a metodologia padrão, visando disponibilizar aos profissionais da área ferramentas metodológicas e instrumentais de baixo custo, fácil aquisição ou construção, uso e cálculo, que apresentem precisão aceitável quando comparados aos métodos e instrumentos considerados padrão pela comunidade científica. O trabalho foi realizado no Setor de Ciências Agrárias da UFPR, em Curitiba/PR, entre julho de 2008 e janeiro de 2009. Para medição da precipitação utilizou-se oito modelos de pluviômetros alternativos, nos quais os valores de precipitação foram comparados aos medidos em um pluviômetro tipo *Ville de Paris*, considerado como padrão. Para comparação dos resultados analisou-se os seguintes parâmetros: altura, área de captação, processo de leitura e proteção contra evaporação. A evapotranspiração de referência diária (*ET<sub>o</sub>*) padrão foi estimada com o método de Penman-Monteith (FAO) e cinco modelos alternativos, propostos por: Thornthwaite, Camargo, Hargreaves e Samani, Budyko e Linacre, a partir dos dados climáticos fornecidos pelo SIMEPAR, para Curitiba-PR, no período de 1997 a 2007. Os valores de precipitação e evapotranspiração foram analisados estatisticamente por meio de análises de regressão linear e seu respectivo coeficiente de correlação (*R*), índices “*d*” de concordância de Willmott e índices “*c*” de confiança propostos por Camargo e Sentelhas. Cenários para verificar o desempenho dos balanços hídricos calculados com os métodos alternativos que apresentaram melhor resultado, em relação aos calculados com a metodologia padronizada, foram realizados considerando capacidades de água disponível (*CAD*) de 30 mm, 60 mm, 90 mm e

120 mm,  $kc = 1,0$  e  $p = 0,5$ . Nas análises realizadas verificou-se que: **(a)** As estimativas diárias de precipitação realizadas com os pluviômetros Alternativos 1 a 8 apresentaram “ótimo” desempenho com as medidas diárias de precipitação realizadas no pluviômetro *Ville de Paris*. Com base nos índices de desempenho obtidos e nas características funcionais, os pluviômetros Alternativos 2 e 4 a 7, são os mais recomendados por apresentarem facilidades construtivas e operacionais (manuseio); **(b)** As estimativas diárias da evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) realizadas com os métodos de Thornthwaite e Camargo mostraram desempenho (índice “ $c$ ”) “muito bom” e “ótimo”, respectivamente, para as análises anuais, quando comparados com o método de Penman-Monteith (Padrão FAO). Considerando as estações do ano, as estimativas diárias mostraram desempenho predominantemente “mediano”, tendo maior exatidão ( $0,78 \leq \text{índice “}d\text{”} \leq 0,88$ ) do que associação ( $0,71 \leq R \leq 0,80$ ). Os métodos de Hargreaves e Samani, Budyko e Linacre são inadequados para estimar a  $ET_o$  na região analisada; **(c)** O desempenho do balanço hídrico realizado com a metodologia alternativa, em comparação com a metodologia padrão, depende da água disponível no solo ( $AD$ ) e da combinação do grau de acerto (associação e exatidão) com que os métodos alternativos estimam a  $ET_o$  e a precipitação dentro do período analisado; **(d)** Para um desempenho “ótimo” na estimativa da precipitação (pluviômetro Alternativo 4) e “mediano” na estimativa da  $ET_o$  (método de Camargo), as componentes do balanço hídrico alternativo em relação ao padrão ( $ER$ ,  $ARM$ ,  $DEF$ ) têm maiores desvios para períodos quentes e ocorrência de precipitação pluviométrica insuficiente para manter o armazenamento da água no solo próximo de sua zona úmida ( $CAD \cdot (1-p) < ARM \leq CAD$ ).

**Palavras-chave:** Medida e estimativa; precipitação; evapotranspiração

**PRECIPITATION AND REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION ESTIMATED  
WITH ALTERNATIVE METHODOLOGIES, FOR ATTAINMENT OF A DAILY  
WATER BALANCE**

**AUTHOR: ROSSANA FERRARI SCHÄFER  
SUPERVISER: Prof. Dr. JORGE LUIZ MORETTI DE SOUZA**

**ABSTRACT**

Water balance represents an essential tool for agriculture and even the most simplified methods need some climatic variables input that require complex calculations or expensive equipment. The objective of this research was to identify and analyze alternative methods for estimating two input variables (precipitation and evapotranspiration) in a daily water balance, compared with the standard methodology, to provide professionals of the field with tools and instruments at low cost, of easy acquisition or construction, use and calculation, which have acceptable accuracy when compared to standard methods and instruments considered by the scientific community. For the measurement of precipitation, eight alternative raingauge models were used, in which the values of precipitation were compared to those measured in a *Ville de Paris* raingauge, regarded as standard. To compare results the following parameters were analyzed: height, area of the collector orifice, process of reading and protection against evaporation. The daily reference evapotranspiration ( $ET_o$ ) was estimated with the FAO Penman-Monteith method (standard) and five alternative models, proposed by: Thornthwaite, Camargo, Hargreaves and Samani, Budyko and Linacre. The daily climatic data of Curitiba, in 1997 to 2007 period, were provided by SIMEPAR. The values of precipitation and evapotranspiration were statistically analyzed using linear regression analysis and their correlation coefficient (R), index "d" of agreement of Willmott and index "c" of confidence proposed by Camargo and Sentelhas. Scenarios were carried out to verify the performance of the water balances calculated with the alternative methods that showed better results compared with the standard methods, considering the available water capacity (AWC) of 30 mm, 60 mm, 90 mm and 120 mm,  $kc = 1.0$  and  $p = 0.5$ . The results showed that: (a) The daily estimates of precipitation with the Alternative 1-8 raingauges showed "excellent" performance with measures of daily precipitation carried out with *Ville de Paris* raingauge. Based on the indices of performance (index "c") achieved and functional characteristics, the Alternative 2, 4 and 6 raingauges are the most recommended for their construction simplicity

and operational agility (management); **(b)** Estimates of daily reference of evapotranspiration ( $ET_o$ ) made with the Thornthwaite and Camargo methods showed performance (index "c") "very good" and "excellent", respectively, at the annual reviews, when compared with the FAO Penman-Monteith method. Considering the seasons, the daily estimates showed predominantly "medium" performance, with greater accuracy ( $0.78 \leq \text{index "d"} \leq 0.88$ ) and association ( $0.71 \leq R \leq 0.80$ ). The methods of Hargreaves and Samani, Budyko and Linacre were inadequate to estimate  $ET_o$  in the region analyzed; **(c)** The performance of water balance achieved with the alternative methodology, compared with the standard methodology, depends on the available water ( $AW$ ) in soil and the combination of the degree of accuracy and association with the alternative methods to estimate  $ET_o$  and precipitation within the study period; **(d)** For a "great" performance in the estimation of precipitation (Alternative 4 gauge) and "medium" in the estimation of  $ET_o$  (Camargo method), the components of alternative and standard water balance have larger deviations for warm periods and insufficient rainfall levels to maintain the soil water storage around wet zone ( $AWC \cdot (1 - p) < \text{STORAGE} \leq AWC$ ).

**Keywords:** Measurement and estimation, precipitation, evapotranspiration

## 1 INTRODUÇÃO

A compreensão do balanço hídrico, mesmo que de forma simplificada, é importante para o entendimento dos processos de degradação e conservação dos recursos naturais relacionados ao uso do solo e da água.

A estimativa e medida dos principais processos que constituem o balanço hídrico muitas vezes envolvem a realização de cálculos complexos, ou necessitam da aquisição de equipamentos de alto custo que em raríssimas exceções encontram-se disponíveis aos pequenos produtores rurais, técnicos agrícolas, professores e alunos de escolas públicas. Esta dificuldade é ainda maior quando se analisa os processos da agricultura irrigada aplicada à pequena propriedade rural.

No manejo da irrigação é necessário certo conhecimento da relação planta-solo-clima, além da tecnologia da aplicação da água. Enquanto os componentes planta e solo têm sido alvo de muitos estudos científicos que estão, em maior ou menor grau, acessíveis ao agricultor, o componente clima depende da localização física da propriedade rural e das condições ambientais da região. Por serem específicos do local, os dados climáticos muitas vezes não estão disponíveis ou apresentam pouca precisão, por desconhecimento ou pela falta de acesso do agricultor a instrumentos e métodos práticos capazes de municiá-lo destes dados.

A utilização de instrumentos e métodos alternativos de baixo custo para medir ou estimar parâmetros climáticos, que utilizem materiais acessíveis e que sejam fáceis de empregar e calcular, mesmo por pessoas de baixa especialização, caracteriza-se como uma possibilidade de superação da falta ou imprecisão dos dados. Quer seja para utilização na agricultura ou para a prática do ensino, o uso de materiais e métodos de cálculo alternativos pode tornar viável a observação das principais variáveis envolvidas em um balanço hídrico, sem comprometer a necessária precisão das medidas efetuadas dos fenômenos observados, desde que se conheça e respeite as limitações de cada um destes métodos e instrumentos.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

O presente trabalho teve como objetivo geral identificar e analisar métodos alternativos para estimativa de duas variáveis de entrada (precipitação e evapotranspiração) em um balanço hídrico diário, em comparação com a metodologia padrão, visando disponibilizar aos profissionais da área ferramentas metodológicas e instrumentais de baixo custo, fácil aquisição ou construção, uso e cálculo, que apresentem precisão aceitável quando comparados aos métodos e instrumentos considerados padrão pela comunidade científica.

### **2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Avaliar as características funcionais e práticas dos métodos alternativos desenvolvidos ou utilizados para estimar a precipitação e evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ), com a finalidade de realizar um balanço hídrico diário;
- Comparar os valores de precipitação e evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) estimados com metodologia alternativa com relação aos valores obtidos com a metodologia padrão; e,
- Avaliar estatisticamente os desvios obtidos entre as componentes do balanço hídrico diário realizado com dados de precipitação e  $ET_0$  obtidos com metodologia padrão e alternativa.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Para fins agrícolas, informações quantitativas da precipitação e da evapotranspiração, contabilizadas através do balanço hídrico, são de grande importância na avaliação da severidade, distribuição e frequência dos déficits hídricos, elaboração de projetos e manejo de sistemas de irrigação e drenagem. O balanço hídrico também pode ser utilizado no planejamento agropecuário, auxiliando nas tomadas de decisões quanto às técnicas culturais para conservação da umidade, caracterizações agroclimáticas de uma região, previsões de safras, sendo todos estes fatores dependentes da água.

#### **3.1 BALANÇO HÍDRICO**

O balanço hídrico é um sistema contábil de monitoramento da água do solo (TUCCI, 1997) e resulta da aplicação do princípio da conservação de massa para a água em um volume de solo vegetado (PEREIRA *et al.*, 1997), permitindo observar a dinâmica de água no solo a partir do armazenamento, deficiência e excedentes hídricos (THORNTHWAITE e MATHER, 1955). É o método mais eficiente para quantificar o potencial hídrico de uma região, pois considera a interação entre os fatores edáfico e climático. O fator edáfico interfere no armazenamento de água do solo e o climático, por sua vez, é representado pela precipitação pluvial e evapotranspiração (MOSTER *et al.*, 2003).

O balanço hídrico é uma ferramenta utilizada em diversas áreas do conhecimento tais como a agrícola (PEREIRA *et al.*, 1997), florestal e hidrológica (TUCCI, 1997). Na atividade agrícola, algumas práticas estão diretamente relacionadas à sua realização. Entre elas pode-se mencionar o manejo e mobilização do solo, irrigação, práticas fitossanitárias e colheita (OMETTO, 1981; PEREIRA *et al.*, 1997; TUCCI, 1997; SOUZA, 2001).

O desenvolvimento e a utilização de modelos para a determinação do balanço hídrico voltados às atividades agrícolas têm se intensificado nos últimos anos. A literatura tem mostrado que o desenvolvimento e aprimoramento de modelos de simulação de balanço hídrico têm resultado em interessantes ferramentas para estimar alternativas de planejamento, dimensionamento e manejo da irrigação (SOUZA e GOMES, 2008). GOMES (2005), por

exemplo, cita e descreve uma relação de pelo menos 24 trabalhos que envolveram direta ou indiretamente a realização de balanços hídricos para auxiliar na composição de modelos computacionais, voltados à agricultura irrigada.

Além da atividade agrícola, a exploração florestal também utiliza a contabilidade hídrica, especialmente nas práticas de manejo do solo e para zoneamento de espécies. Em estudos de hidrologia, o balanço hídrico é um indicador da influência do uso do solo sobre a tendência hidrológica de uma bacia hidrográfica. De acordo com TUCCI (1997), o balanço hídrico em bacias hidrográficas geralmente visa estimar a evapotranspiração baseando-se em dados de precipitação, evaporação e escoamento superficial e subterrâneo. É considerado teoricamente preciso para estimativa da evapotranspiração de lagos ou represas, relacionando as dimensões do reservatório, vazão e precipitação pluvial em uma equação de continuidade.

Na área geográfica, o balanço hídrico foi utilizado por WILLMOTT *et al.* (1985) como ferramenta para fundamentar seus trabalhos. Produziram-se cartas de armazenamento de água no solo, cobertura de neve e evapotranspiração real.

### **3.1.1 Balanço hídrico quanto à escala temporal e procedimentos para sua realização**

A contabilização do balanço hídrico pode ser efetuada dentro de qualquer unidade de intervalo de tempo, sendo determinada na sua grande maioria, em função da unidade de tempo adotada para a tomada de decisão. As escalas temporais normalmente utilizadas para a realização do balanço hídrico são em intervalos anuais, mensais, decendiais, semanais ou mesmo diários, conforme a sua aplicação, sendo subdivididas em cíclicos e seqüenciais (contínuos) (PEREIRA *et al.*, 1997). Deve-se ressaltar que, apesar das semelhanças, os balanços hídricos cíclicos e seqüenciais apresentam particularidades matemáticas distintas para a sua determinação.

O balanço hídrico cíclico utiliza normalmente dados médios da região, ou seja, dados climatológicos normais (OMETTO, 1981). Ele reflete a condição normal do local e despreza as eventualidades do tempo atmosférico. Sua utilização é mais intensa em estudos climatológicos onde, evidentemente, a finalidade é a descrição do clima e não do tempo meteorológico. Por sua vez, o balanço hídrico seqüencial ou contínuo normalmente é realizado em pequenos intervalos de tempo e demonstra a variação da condição hídrica do local. Quanto menor for o período de estudo, maior será a interferência das variações do

tempo meteorológico. Esta contabilidade permite verificar a flutuação hídrica em solo agrícola e, conseqüentemente, possibilita o manejo da irrigação.

Baseando-se nos componentes do balanço hídrico, diferentes procedimentos podem ser realizados para determiná-lo, classificando-o como: superficial, aerológico, isotópico, balanços energéticos, balanços hídricos de superfícies líquidas, modelos matemáticos, balanços hídricos agrícolas e climatológicos. As principais características envolvidas nos diferentes procedimentos de cálculo do balanço hídrico podem ser verificadas em OMETTO (1981), PEREIRA *et al.* (1997), TUCCI (1997), SOUZA (2001).

O balanço hídrico agrícola é direcionado à determinação da necessidade ou disponibilidade hídrica real aos cultivos agrícolas, com o objetivo mais comum de quantificar o volume de água a ser reposta ao solo por intermédio de irrigação, para manutenção da umidade do solo cultivado próximo da capacidade de campo. Já o balanço hídrico climatológico, consiste na contabilidade hídrica no solo para fins climatológicos, ou seja, para classificação climática (THORNTHWAITE e MATHER, 1955; OMETTO, 1981; PEREIRA *et al.*, 1997). Com ele delimitam-se intervalos de deficiências e excedentes hídricos para a região em estudo.

Outra classificação de modelos de balanços hídricos pode ser obtida quando o objetivo do monitoramento for quantificar as necessidades de água das culturas nos seus estádios de desenvolvimento. Assim, os modelos podem ser classificados em pedológicos, físicos, fisiológicos, irrigacionistas e climatológicos (CAMARGO e PEREIRA, 1990; SOUZA, 2001).

A escolha do modelo de balanço hídrico mais adequado é determinada principalmente pelo grau de conhecimento do sistema solo-planta-atmosfera (SOUZA, 2001). Modelos mais complexos são mais exigentes em dados do solo, cultura e atmosfera, o que pode inviabilizar a sua utilização. É importante observar que os modelos climatológicos, fundamentados na realização do balanço hídrico consideram apenas a precipitação e a evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) ou da cultura ( $ET_c$ ), para determinar deficiências hídricas e realizar a suplementação de forma racional.

O balanço hídrico climatológico tem sido utilizado em inúmeros trabalhos científicos, sendo adaptado às necessidades de cada área do conhecimento, constituindo-se em ferramenta indispensável à obtenção de dados nos trabalhos de pesquisas agrometeorológicas. Em geral, o balanço hídrico climatológico é realizado com os dados climáticos normais da região, as

normais climatológicas, que estabelecem a condição do clima local. No entanto, nada impede que o mesmo seja determinado a partir de dados instantâneos. A metodologia mais utilizada para a realização do balanço hídrico é a de THORNTHWAITE e MATHER (1955). Autores como FRANKE e SAIBRO (1997), MARIN *et al.* (2000) e SOUZA (2001) adotaram essa metodologia de balanço hídrico climatológico em diversas modalidades de monitoramento.

### 3.2 BALANÇO HÍDRICO DE THORNTHWAITE E MATHER (1955)

O processo mais utilizado de contabilidade hídrica no solo para fins agrícolas é o de THORNTHWAITE e MATHER (1955) (SOUZA, 2001). O método tem se mostrado eficiente para programar e definir diversas atividades agrícolas.

O balanço hídrico proposto por THORNTHWAITE e MATHER (1955) é um método que permite a estimativa da evapotranspiração, sendo que o volume de água armazenada no solo determina a taxa de evapotranspiração real ( $ER$ ). Quanto mais seco estiver o solo, menor será a evapotranspiração. Este balanço hídrico foi desenvolvido para determinar o regime hídrico de um local, sem a necessidade de medidas diretas das condições do solo. Para sua elaboração, há necessidade de se definir, para uma determinada região ou local, a capacidade de água disponível ( $CAD$ ) no solo, os valores de precipitação ( $P$ ) e evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ), para um período considerado. Com essas informações básicas, a metodologia permite estimar, para o mesmo período, o armazenamento da água no solo ( $ARM$ ), a evapotranspiração real ( $ER$ ), deficiência ( $DEF$ ) e excedente hídrico ( $EXC$ ) em uma determinada região (OMETTO, 1981; PEREIRA *et al.*, 1997).

O balanço hídrico contabiliza as entradas e saídas de água em um dado volume de solo vegetado. A entrada da água no sistema pode ser subdividida em: precipitação ( $P$ ); orvalho ( $O$ ); escoamento superficial ( $ES_E$ ); drenagem lateral ( $DL_E$ ); ascensão capilar ( $AC$ ); e, irrigação ( $I$ ). A saída da água, por sua vez, pode ser subdividida em: evapotranspiração ( $ET$ ); escoamento superficial ( $ES_S$ ); drenagem lateral ( $DL_S$ ); e, drenagem profunda ( $DP$ ) (OMETTO, 1981; PEREIRA *et al.*, 1997). O balanço hídrico segue o princípio de conservação de massa, assim, o somatório de todas as suas componentes deverá ser nulo.

$$P + O + ES_E + DL_E + AC + I - ET - ES_S - DL_S - DP \pm ARM = 0 \quad (01)$$

Em sistemas agrícolas, uma componente do balanço hídrico deve ser contabilizada quando interferir no armazenamento ( $ARM$ ) da água no solo, ou ainda, quando puder ser

aproveitada pelas plantas (OMETTO, 1981). Conforme SOUZA (2001) pode-se encontrar na literatura a relação das seguintes afirmações a respeito de algumas componentes do balanço hídrico:

- O orvalho, por exemplo, representa uma contribuição pequena, com um máximo de 0,5 mm.dia<sup>-1</sup> em locais úmidos;
- O escoamento superficial de entrada ( $ES_E$ ) e de saída ( $ES_S$ ), bem como a drenagem lateral de entrada ( $DL_E$ ) e de saída ( $DL_S$ ), geralmente tendem a se anular (PEREIRA *et al.*, 1997);
- Como a variação de armazenamento de água ocorre na camada onde se encontra aproximadamente 80% do sistema radicular da planta (profundidade efetiva) em questão, a drenagem profunda é contabilizada como excesso (OMETTO, 1981);
- A ascensão capilar pode ser desprezível em solos profundos (PEREIRA *et al.*, 1997);
- A chuva e a evapotranspiração são as componentes de entrada e saída mais importantes de água do solo (OMETTO, 1981). A irrigação representa uma prática de manejo que pode ser adotada ou suprimida do sistema conforme a necessidade e não é considerada uma componente de natureza climática.

Desta forma, o balanço hídrico de THORNTHWAITE e MATHER (1955) considera em sua contabilização uma série de simplificações para o sistema agrícola, ficando reduzido aos seguintes componentes,

$$P - ET \pm ARM = 0 \quad (02)$$

Os subitens dispostos a seguir apresentam aspectos importantes sobre as formas de entrada e saída de água mais representativas da dinâmica da água do solo agrícola, ou seja, precipitação, especialmente na forma de chuva ou precipitação pluvial, e a evapotranspiração.

### 3.2.1 Precipitação

A precipitação pluvial representa o retorno da água na forma líquida da atmosfera para o solo. A condensação do vapor de água, evaporado e transpirado para a atmosfera, inicia-se na presença de núcleos de condensação devido à saturação do ar por resfriamento ou descompressão adiabática (OMETTO, 1981; TUBELIS e NASCIMENTO, 1986).

O volume total precipitado em uma determinada região é o fator predominante para quantificar, por exemplo, a necessidade de irrigação. A precipitação pode ocorrer na forma de

chuva, granizo e neve, sendo que no Brasil a maioria absoluta da precipitação ocorre na forma de chuva (OMETTO, 1981; TUBELIS e NASCIMENTO, 1986).

#### **(a) Instrumentos e aparelhos de medida da precipitação**

Respectivamente, o pluviômetro e pluviógrafo são os instrumentos e aparelhos utilizados para determinar a quantidade e intensidade de precipitação de água em uma região, em um determinado período de tempo. A unidade generalizadamente adotada para a medida da precipitação é o milímetro (OMETTO, 1981).

O pluviômetro é um aparelho contendo uma superfície de captação horizontal e um reservatório para acumular a água recolhida ligado à esta área de captação. Os pluviógrafos são aparelhos que registram o volume de água precipitada por unidade de tempo (LIMA e FREIRE, 1976). A Organização Meteorológica Mundial - WMO (2008) sugere que a área de captação dos pluviômetros situe-se entre  $200 \text{ cm}^2$  e  $500 \text{ cm}^2$ , principalmente se formas sólidas de precipitação forem esperadas em quantidade significativa.

Existem diversos modelos de pluviômetros, sendo os mais comuns: o pluviômetro do *United States Weather Bureau* (muito utilizado nos Estados Unidos), *Ville de Paris* (muito utilizado no Brasil), e o pluviômetro de balança, utilizado preferencialmente em estações meteorológicas automáticas (OMETTO, 1981; TUBELIS e NASCIMENTO, 1986; SENTELHAS e CARAMORI, 2002).

O pluviômetro do tipo *Ville de Paris* é usado na rede nacional de postos climatológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Neste tipo de pluviômetro, a superfície de captação da chuva e o recipiente coletor de água formam um único corpo. O aparelho deve ser instalado em um suporte de forma a facilitar seu manuseio, sendo que a superfície de captação deverá permanecer perfeitamente nivelada. A superfície coletora é circular, com  $400 \text{ cm}^2$  de superfície e  $22,57 \text{ cm}$  de diâmetro. O pluviômetro consiste em duas peças cilíndricas que se encaixam. A peça superior define a área de captação na parte superior e possui um funil na parte inferior. A peça inferior contém uma proveta graduada para receber e medir o volume de água coletada. A Organização Meteorológica Mundial recomenda sua instalação a uma altura de  $1,5 \text{ m}$  do solo. No momento da leitura, o observador abre a torneira do receptor e mede o volume de água coletada com uma proveta graduada diretamente em milímetros de precipitação (CEZÁRIO, 2005).

O pluviômetro de báscula   próprio para utiliza o em esta o es metereológicas automáticas, por não necessitar da interven o humana para a sua leitura e esvaziamento. Dotado de um sistema de armazenamento móvel, ele   capaz de gerar automaticamente um pulso elétrico a cada unidade de medida preenchida, findo o qual o mesmo se encontra novamente capaz de efetuar nova coleta e medi o. Este pulso elétrico pode ser enviado para um aparelho denominado *data logger*, que o registra e acumula (CEZÁRIO, 2005).

### **(b) Cuidados necessários para a medida da precipita o**

Segundo WMO (2008), a medida da precipita o, quer através de pluviômetros ou de pluviógrafos, está sujeita a erros, os quais podem ser reduzidos caso sejam tomados cuidados na sua constru o e na sua instala o e manejo. Os principais erros podem ocorrer devido   evapora o, respingo para fora, acúmulo de orvalho, localiza o e aço do vento.

- Evapora o: Quando uma leve chuva começa a cair em um pluviômetro seco, parte da água ficará retida nas paredes do aparelho, levando ao atraso no início do registro da precipita o. Se o pluviômetro encontra-se quente, parte da água será perdida por evapora o. O erro por evapora o geralmente   pequeno, mas o atraso no registro do início da chuva pode ser significativo em estimativas de eventos curtos e pequena intensidade. A perda por evapora o pode ser reduzida se o tubo abaixo do funil for de pequena se o transversal, reduzindo assim a área de evapora o para a água já coletada;
- Respingo para fora: Gotas grandes quando atingem o topo do funil podem respingar para fora do pluviômetro. Desse modo, apenas uma parte da gota   coletada. Para reduzir o erro   necessário que o pluviômetro seja construído de material não higroscópico e que possua bordas finas e altas, perfeitamente lisas e limpas;
- Acumula o de orvalho: A forma o de orvalho pode ser acumulada e provocar um acréscimo no valor da medida. Neste caso, há uma superestimativa da precipita o. Se o orvalho não for suficiente para ser registrado ele normalmente   evaporado durante o dia;
- Localiza o e ocorrência de ventos: Objetos e constru es próximas ao pluviômetro podem interferir na precisão da medida. Os obstáculos podem subestimar até 20% das chuvas de baixa intensidade, com ventos entre  $5 \text{ m s}^{-1}$  e  $10 \text{ m s}^{-1}$ , e até 80% das chuvas com ventos de velocidade superior a  $10 \text{ m s}^{-1}$ . Em chuvas de média intensidade, o surgimento de respingos devido   presença dos obstáculos pode superestimar ou subestimar as medidas. A aço do vento junto a um obstáculo próximo ao pluviômetro pode criar v rtices e redemoinhos que

afetarão a distribuição da água precipitada na área ao redor do pluviômetro, que deixando de ser homogênea, acaba por afetar a medida da precipitação. Para contornar este problema, o pluviômetro deve ser instalado a uma altura de 1,5 m da superfície do solo, totalmente nivelado e a uma distância de pelo menos duas vezes a altura do elemento mais alto (obstáculo ou pluviômetro). Em caso de localizações desfavoráveis, com ocorrência freqüente de vento, pode-se ainda utilizar elementos específicos, denominados “quebra-ventos”, para reduzir a influência do vento no processo de medição.

### **(c) Considerações sobre processos experimentais para medir ou estimar a precipitação**

O uso de pluviômetros “alternativos”, notadamente os construídos a partir de garrafas *PET* (*politereftalato de etila*), possuindo diferentes dimensões, têm-se tornado usual em diferentes situações (MENDES, 2006; MEIRA, 2007), sendo as leituras normalmente realizadas com o auxílio de provetas graduadas (COELHO NETTO, 2003) ou adesivos (MEIRA, 2007; ARBOLEYA e MELLO, 2008). LAREDO e COSTA (2009) apresentaram os procedimentos a serem seguidos para a construção de um pluviômetro utilizando garrafa *PET*, dotado de um funil interno, torneira, pintado interna e externamente.

A UFRPE (2008) salienta a utilidade do convênio firmado entre a Universidade Federal de Pernambuco e a rede pública escolar de Camaragibe-PE, através do qual alunos da rede escolar construíram e instalaram cinquenta pluviômetros de garrafas *PET*, para fins de monitoramento do risco de desabamentos em morros situados em bairros da cidade. Solução semelhante foi adotada pela Prefeitura Municipal de São Paulo-SP. Segundo ARBOLEYA e MELLO (2008), a prefeitura instituiu um plano denominado “Operação Chuvas de Verão”, para ser utilizado pela Defesa Civil da Cidade de São Paulo no período compreendido entre o dia primeiro de novembro de 2008 e 15 de abril de 2009, período crítico de chuvas, ou quando houver necessidade. Geralmente, o monitoramento participativo é feito por meio de pluviômetros construídos com garrafas *PET* e as leituras são realizadas por uma pessoa da própria comunidade três vezes ao dia.

No entanto, os “modelos alternativos” de pluviômetros, descritos em seus aspectos construtivos em alguns projetos de extensão e reportagens, necessitam de comprovação científica que, efetivamente, validem seu procedimento de construção, instalação, precisão e capacidade de medição, bem como identifique suas limitações e erros de mensuração.

Comparações entre o pluviômetro *Ville de Paris* e outros instrumentos definidos pela comunidade científica como “padrões” também são frequentemente realizadas. SENTELHAS e CARAMORI (2002) observaram, ao comparar o pluviômetro *Ville de Paris* com pluviômetros de balança (*rain tipping bucket gauges*), diferenças nos valores medidos as quais foram diretamente relacionadas à intensidade da precipitação, à resolução da balança e à área de captação, assim como à ação de ventos intensos. Para SEIBERT e MORÉN (1999) os erros decorrentes da resolução da balança são os mais comuns e sua origem reside na incapacidade do sistema em computar a chuva na mesma intensidade com que ela ocorre, o que irá depender também da área de captação do pluviômetro. TANNER (1990)<sup>1</sup>, citado por SENTELHAS e CARAMORI (2002), comenta que pluviômetros com diâmetro de 30,5 cm e resolução de 0,2 mm são os que oferecem medidas com melhor precisão e exatidão.

Uma análise comparativa entre os totais mensais de precipitação registrados nos pluviômetros *Ville de Paris* e o modelo DNAEE foi apresentada por CASTILHO (2005), com o objetivo de verificar a existência de perda por evaporação no pluviômetro *Ville de Paris*. Os aparelhos funcionaram simultaneamente ao longo de dez anos em uma mesma estação, localizada na região central do estado de Minas Gerais. O autor não verificou diferenças significativas entre os valores de precipitação coletados pelos dois aparelhos.

### 3.2.2 Evapotranspiração

A evapotranspiração é o processo simultâneo da transpiração vegetal e da evaporação da água da superfície do solo e nas folhas das plantas. A transpiração vegetal ocorre através dos estômatos e da cutícula das plantas, utilizando a água absorvida pelo sistema radicular ao longo do perfil de solo. A evaporação corresponde à perda da água depositada na superfície vegetal e a contida no solo (TUBELIS e NASCIMENTO, 1986). A evapotranspiração pode ser expressa em valores totais, médios ou diários, em volume por unidade de área ou em lâmina de água (mm), no período considerado, e é importante para que se possa realizar o balanço hídrico de uma região (PEREIRA *et al.*, 1997).

Devido às condições de umidade do solo e da cobertura vegetal do mesmo, a evapotranspiração é denominada ou definida na literatura de diferentes maneiras:

– PEREIRA *et al.* (1997) descrevem que a evapotranspiração potencial (*ETp*) é a perda de água para a atmosfera, de uma superfície natural, sem restrição hídrica para transpiração e

---

<sup>1</sup> TANNER, B.D. Automated weather stations. *Remote Sensing Reviews*, v. 5, n. 1, p. 73-98. 1990.

evaporação no solo. A evapotranspiração real ( $ER$ ) é a perda de água de uma superfície natural, em qualquer condição de umidade e cobertura vegetal, sendo a que normalmente ocorre em sistemas agrícolas, devido a variações de umidade e cobertura do solo, sendo um caso especial da  $ETp$ .

– DOORENBOS e PRUITT (1975) estabeleceram a grama batatais (*Paspalum notatum* Flugge) como cobertura vegetal padronizada para o solo, e denominaram a evapotranspiração potencial ( $ETp$ ) sob esta condição de evapotranspiração de referência ( $ETo$ ). A literatura apresenta uma série de metodologias para medir ou estimar a  $ETo$ .

A estimativa da evapotranspiração em uma determinada propriedade é importante para a agricultura irrigada, pois auxilia o agricultor a controlar tanto a quantidade e o momento em que devem fornecer água às culturas agrícolas, uma vez que, conhecendo a evapotranspiração da cultura ( $ETc$ ) e a capacidade do sistema de irrigação, pode-se com muita facilidade calcular o tempo de irrigação ( $Ti$ ) necessário para que a cultura produza o máximo e sem desperdício de água (SOUZA, 2001).

#### **(a) Medida da evapotranspiração**

A evapotranspiração de referência ( $ETo$ ) pode ser medida com lisímetros ou evapotranspirômetros, ou ainda estimada, por modelos teóricos embasados no clima, solo e planta. A medida diária da evapotranspiração, apesar de onerosa e trabalhosa, é, no entanto, essencial para suprir as necessidades de dados para aferição dos modelos de estimativa. A coleta destes dados normalmente é feita em estações meteorológicas de institutos de pesquisa (OMETTO, 1981; SOUZA, 2001).

#### **(b) Estimativa da evapotranspiração**

Conforme relata SOUZA (2001), diversos métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para fins climatológicos são citados na literatura. SEDIYAMA (1987) comenta a existência de mais de 50 métodos de cálculo, descrevendo os 10 mais utilizados na época. PEREIRA *et al.* (1997) detalharam 17 métodos de estimativa da evapotranspiração e os distribuiu nas categorias: empírico, aerodinâmico, balanço de energia, combinado e correlação dos turbilhões.

Dentre os métodos de estimativa, a equação de Penman-Monteith, parametrizada por pesquisadores da FAO (ALLEN *et al.*, 1998), é um dos modelos mais utilizados e

recomendados. O método assume uma superfície cultivada com grama hipotética com altura de 0,12 m, resistência aerodinâmica ( $r_s$ ) de  $70 \text{ s}\cdot\text{m}^{-1}$  e albedo de 0,23, e requer medidas de temperatura do ar (máxima e mínima), umidade relativa do ar, radiação solar medida ou estimada a partir da medida de horas de insolação e velocidade do vento, tomadas a 2 m de altura ou corrigidas para esse patamar. Entretanto, estes dados são de difícil obtenção, devido à diversidade de regiões, locais e a inexistência de séries históricas de dados e, ou, de equipamentos para a medição.

Diante das observações feitas no parágrafo anterior, a literatura apresenta uma série de modelos simplificados, empíricos, com a finalidade de estimar a evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ).

PEREIRA *et al.* (1997) apresenta os seguintes métodos empíricos que se baseiam basicamente na temperatura do ar:

- O método de Thornthwaite baseia-se apenas na temperatura média do ar, sendo esta sua principal vantagem. Foi desenvolvido para condições de clima úmido e, por isso, normalmente apresenta subestimativa da evapotranspiração de referência em condições de clima seco. Apesar dessa limitação, é um método bastante empregado para fins climatológicos, na escala mensal;
- O método proposto por Camargo também se baseia na metodologia de Thornthwaite e apresenta as mesmas vantagens e restrições descritas anteriormente. No entanto, possui a vantagem de não necessitar da temperatura média mensal normal. Contudo, necessita da radiação solar extraterrestre ( $Q_o$ ), a qual pode ser obtida em tabelas ou estimada com equações empíricas;
- Hargreaves e Samani desenvolveram um método próprio para regiões de clima seco. O método baseia-se na temperatura média do ar e na amplitude térmica. Tem como vantagem a sua aplicabilidade em climas áridos e semi-áridos, como no nordeste do Brasil. A desvantagem é sua limitação em condições de clima úmido, apresentando valores superestimados;
- O método de Linacre é uma simplificação do método de Penman e, para a estimativa da evapotranspiração de referência mensal média de uma área bem suprida de umidade, considera algumas aproximações. A partir de alterações na estimativa da temperatura de ponto

de orvalho, o método tem sido usado também para estimar a *ET<sub>o</sub>* em períodos menores que um mês.

O método de BUDYKO é muito simplificado, sendo aconselhado a sua utilização apenas em caso de não existência de dados meteorológicos ou condições em que não se possa estimar a *ET<sub>o</sub>* por outro método mais preciso. O método considera que a *ET<sub>o</sub>* média diária equivale a 1/5 da temperatura média do ar (CASTRO NETO e SOARES, 1989).

HENRIQUE (2006), por sua vez, considerando o conhecimento adquirido através da literatura, constatou a existência de uma relação entre a evapotranspiração de referência (*ET<sub>o</sub>*) e a amplitude térmica diária e, neste sentido, procurou identificar esta relação. Em uma série de análises com modelos simplificados de estimativa de evapotranspiração de referência que propôs, o autor obteve correlações estreitas com o método de Penman-Monteith.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 LOCAL DE REALIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho foi conduzido no Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná (UFPR), em Curitiba, Paraná. A análise dos dados foi realizada no Laboratório de Modelagem de Sistemas Agrícolas (LAMOSA) DSEA/SCA/UFPR.

Curitiba possui uma área de aproximadamente 430,9 km<sup>2</sup>, sendo de clima temperado, relevo levemente ondulado e altitude média de 934,6 m, localizada nas coordenadas 25°25'48" de latitude Sul e 49°16'15" de longitude Oeste. A pluviosidade é de aproximadamente 1500 mm ano<sup>-1</sup>. De forma geral, segundo a classificação de Wladimir Köeppen, o clima do município de Curitiba classifica-se como Cfb – Clima subtropical úmido mesotérmico, de verões frescos e com ocorrência de geadas severas e freqüentes, não apresentando estação seca. A média das temperaturas dos meses mais quentes é inferior a 22 °C e a dos meses mais frios é inferior a 18 °C (AGM, 2001; MAACK, 2002).

### 4.2 PRINCIPAIS ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

O presente trabalho foi desenvolvido em quatro etapas:

**Primeira etapa:** Levantamento dos dados climáticos necessários para estimar os valores de evapotranspiração de referência (*ET<sub>o</sub>*), a partir das metodologias padrão e alternativa para uma longa série de anos.

**Segunda etapa:** Construção dos pluviômetros alternativos e instalação dos mesmos junto ao pluviômetro considerado padrão (*Ville de Paris*), para as respectivas coletas de dados pluviométricos;

**Terceira etapa:** Análise de regressão linear e correlação entre os valores de precipitação e evapotranspiração de referência (*ET<sub>o</sub>*), medidos ou estimados, com as metodologias padrão e alternativa, respectivamente; e,

**Quarta etapa:** Realização de cenários visando verificar estatisticamente os desvios obtidos entre as componentes do balanço hídrico diário realizado com dados de precipitação e *ET<sub>o</sub>*, obtidos com metodologia padrão e alternativa, para a região de Curitiba, PR.

### 4.3 MÉTODOS PADRÃO E ALTERNATIVOS UTILIZADOS PARA MEDIR OU ESTIMAR A PRECIPITAÇÃO

Uma vez que o pluviômetro tipo *Ville de Paris* (Figura 4.1), normalmente é estabelecido na bibliografia como padrão para realizar a medição pluviométrica de um determinado local, optou-se por analisar suas características construtivas, tais como:

- A área de captação da precipitação (embocadura);
- O material do qual é constituído;
- O método utilizado para drenar o volume de água nele retido; e,
- A existência de um anteparo interno de proteção contra a queda de material estranho e, ou, para a redução da evaporação do líquido armazenado.

As características do pluviômetro *Ville de Paris* são bem determinadas, sendo construído de aço inox, possuindo área de captação de 400 cm<sup>2</sup> e contendo um protetor interno na forma de tronco de cone com uma torneira em sua extremidade inferior, para a drenagem do líquido acumulado.

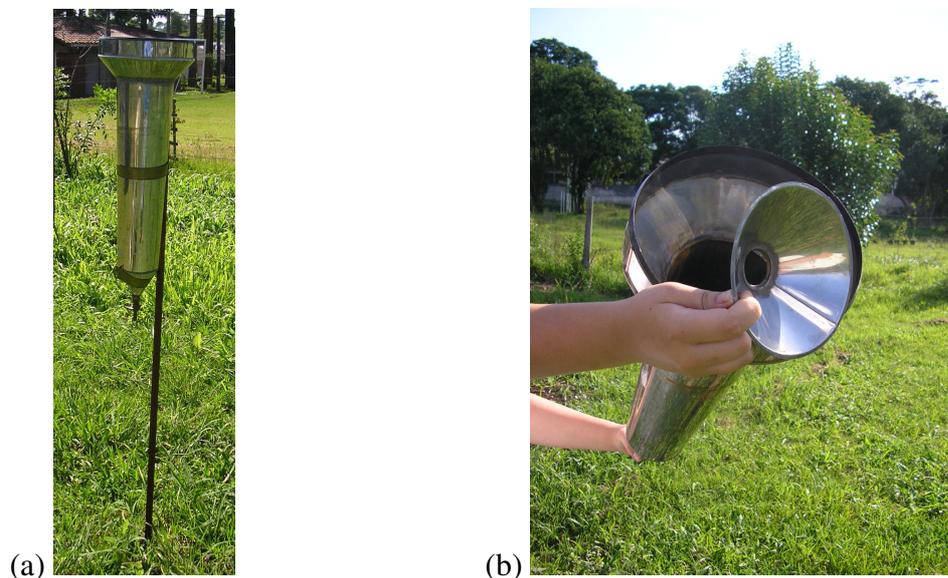


FIGURA 4.1 – Pluviômetro tipo *Ville de Paris*, utilizado para medir a precipitação da área experimental (leitura padrão)

Desta forma, determinou-se também, com igual precisão, os mesmos parâmetros nos pluviômetros apresentados como alternativos. Optou-se por construir sete tipos distintos de pluviômetros para comparar as características de cada um, com aquelas presentes no pluviômetro *Ville de Paris*, de modo a assegurar maior precisão no registro da precipitação. Os parâmetros analisados foram:

- Altura do pluviômetro em relação ao solo;
- Área de captação da precipitação pluviométrica;
- Método de retirada do líquido acumulado; e,
- Proteção contra evaporação e entrada de material estranho.

O pluviômetro do tipo *Ville de Paris* foi utilizado como instrumento padrão para medida da precipitação. Para análise dos resultados, as leituras obtidas com este instrumento foram comparadas com as estimativas das precipitações pluviométricas realizadas com os sete pluviômetros propostos, denominado alternativos, construídos a partir da reciclagem de garrafas *PET* (*politereftalato de etila*), mais um pluviômetro comercial confeccionado em corpo único de plástico cristal e OS. As principais características construtivas dos pluviômetros utilizados (padrão e alternativo) podem ser visualizadas na Tabela 4.1.

Todos os pluviômetros utilizados, com exceção do instalado rente ao solo, foram dispostos na altura de 1,5 m a partir da superfície do solo, fixados em uma barra de ferro, contendo encaixes construídos de latão rebitado (Figura 4.2), no tamanho e formato exato de cada aparelho, para assegurar que intempéries e quaisquer oscilações provocadas pela ação do vento não prejudicasse as medidas de precipitação. Cada pluviômetro encontrava-se afastado a 2 m de distância do pluviômetro vizinho, para evitar possíveis interferências.

Os pluviômetros (padrão e alternativos) foram dispostos em uma área experimental do Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, conforme está apresentado nas Figuras 4.3 e 4.4, nas coordenadas 25° 24' 47" latitude Sul e 49° 14' 59" longitude Oeste.

TABELA 4.1. Área de captação, altura de instalação, características construtivas e capacidade de registro dos pluviômetros utilizados (padrão e alternativos)

Modelo	Área de captação (cm <sup>2</sup> )	Altura em relação ao solo (m)	Características construtivas	Capacidade de registro (lâmina) (mm)
<i>Ville de Paris</i>	400,0	1,5	Pluviômetro comercial padrão, com capacidade de 7,0 L (útil: 5,25 L; medido com o nível da água no início do bico do funil)	131,3
Alternativo 1	283,5	Superfície	Capacidade de 2,0 L. Garrafa <i>PET</i> disposto rente à superfície do solo, contendo um funil plástico circular logo acima	70,5
Alternativo 2	63,9	1,5	Capacidade de 1,5 L (útil: 0,7 L; 18,0 cm de altura da tampa do recipiente até o nível da água)	109,6
Alternativo 3	231,5	1,5	Capacidade de 5,0 L (útil: 3,5 L; 21 cm de altura da tampa do recipiente até o nível da água)	151,2
Alternativo 4	34,6	1,5	Capacidade de 0,5 L (útil: 0,3 L; 14 cm de altura da tampa do recipiente até o nível da água)	86,7
Alternativo 5	61,1	1,5	Capacidade de 1,5 L, contendo uma mangueira tipo utilizado em aquários para fazer o processo de drenagem do volume de água coletado (útil: 0,7 L; 18,0 cm de altura da tampa do recipiente até o nível da água)	114,6
Alternativo 6	62,1	1,5	Capacidade de 1,5 L, contendo um funil interno feito a partir de outra garrafa <i>PET</i> de mesma marca e volume, inserida uma dentro da outra (útil: 0,7 L; 18,5 cm de altura da tampa do recipiente até o nível da água)	112,7
Alternativo 7	64,1	1,5	Capacidade de 1,5 L, contendo pintura interna e externa com tinta acrílica própria para uso em plásticos (útil: 0,7 L, 18,0 cm de altura da tampa do recipiente até o nível da água)	109,2
Alternativo 8*	5,7	1,5	Pluviômetro comercial, capacidade de 0,25 L, confeccionado em corpo único de plástico cristal e OS	150,0



FIGURA 4.2 – Estrutura de sustentação dos pluviômetros, fixados em uma barra de ferro, a 1,5 m de altura da superfície do solo, contendo encaixes construídos de latão rebitado

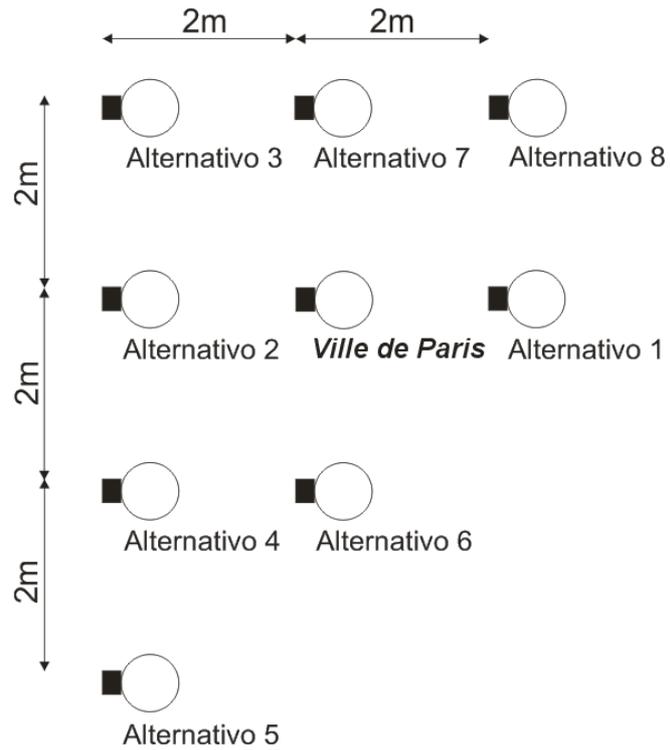


FIGURA 4.3 – Distribuição dos pluviômetros na área experimental, sendo: *Ville de Paris*; Alternativo 1 a 8; conforme especificações dispostas na Tabela 4.1



FIGURA 4.4 – Vista da área experimental onde foram instalados os pluviômetros

Para a determinação da área de captação da precipitação, após o corte transversal, cada garrafa utilizada na confecção dos pluviômetros alternativos foi “*scaneada*” ao lado de uma folha de papel milimetrado (Figura 4.5). Utilizando-se um *software* gráfico, as imagens das áreas transversais tiveram suas bordas destacadas e o seu interior preenchido com a mesma estampa milimetrada da página *scaneada* (para evitar quaisquer distorções nas proporções), após o que foi realizada a contagem manual das quadriculas.

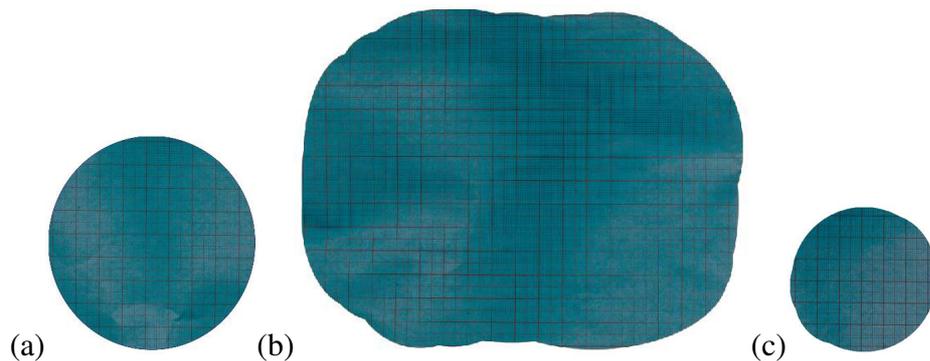


FIGURA 4.5 – Representação gráfica da área de captação da precipitação (seção transversal) dos pluviômetros alternativos, sendo: (a) Alternativo 2; (b) Alternativo 3; e, (c) Alternativo 4

### 4.3.1 Análises comparativas entre o pluviômetro padrão (*Ville de Paris*) e alternativos

#### (a) Altura de instalação e área de captação

Para verificar a influência da área de captação e da altura do pluviômetro em relação ao solo foi instalado um pluviômetro a 10 cm da superfície do solo, construído a partir de uma garrafa *PET* de volume 2,0 L (pluviômetro Alternativo 1). Acima do corte feito na garrafa *PET*, um funil circular de 283,5 cm<sup>2</sup>, disposto rente à superfície do solo, teve a finalidade de servir como área de captação da precipitação e prevenir a entrada de impurezas (Figura 4.6).



FIGURA 4.6 – Pluviômetro Alternativo 1, construído a partir de uma garrafa *PET* e de um funil plástico de 283,5 cm<sup>2</sup> de área de captação

**(b) Área de captação**

Para verificar a influência da área de captação da precipitação, foram confeccionados três diferentes pluviômetros a partir de garrafas *PET*, sendo construídos de garrafa de água mineral de 1,5 L (Alternativo 2), 5,0 L (Alternativo 3) e 0,5 L (Alternativo 4). Todos sendo da mesma marca comercial e material (Figura 4.7).



FIGURA 4.7 – Pluviômetros Alternativos 2, 3 e 4, construídos a partir de garrafas *PET* de mesma marca comercial e material, possuindo diferentes áreas de captação

### (c) Processo de drenagem da água precipitada e armazenada no interior do pluviômetro

Para verificar a influência do processo de drenagem do volume de água coletado no pluviômetro, foi construído um pluviômetro a partir de uma garrafa *PET* de água de 1,5 L, da mesma marca que as demais, porém dotada de mangueira com torneira, do tipo utilizado em aquários, com processo construtivo similar à utilizada no pluviômetro *Ville de Paris* (Figura 4.8). A área de captação foi medida obtendo-se o valor de  $61,1 \text{ cm}^2$  (pluviômetro Alternativo 5). É importante observar que as medidas do volume de água precipitado nos pluviômetros Alternativos 1 a 4 e 6 a 8, foram realizada manualmente, removendo o pluviômetro do seu respectivo suporte e dispendo o volume precipitado em uma proveta.



FIGURA 4.8 – Pluviômetro Alternativo 5, construído a partir de uma garrafas *PET* e contendo uma mangueira com torneira

### (d) Utilização de um funil interno para proteção contra entrada de folhas, insetos, entre outros, no interior do pluviômetro

Para verificar a influência do tronco de cone interno existente no pluviômetro *Ville de Paris*, quanto à precisão da medida, foi construído um pluviômetro a partir de duas garrafas *PET* de água, ambas de 1,5 L, da mesma marca que as demais, inseridas uma dentro da outra (pluviômetro Alternativo 6). A área de captação da precipitação pluviométrica do pluviômetro foi de  $62,1 \text{ cm}^2$  (Figura 4.9).



FIGURA 4.9 – Pluviômetro alternativo 6, construído a partir de uma garrafa *PET* e contendo um funil interno

**(e) Material construtivo**

Para verificar a influência da transparência dos pluviômetros alternativos ou a capacidade de escoamento do material alternativo em relação ao aço inox do pluviômetro *Ville de Paris*, foi construído um pluviômetro a partir de uma garrafa *PET* de água, de 1,5 L, da mesma marca que as demais, porém pintada interna e externamente com tinta acrílica própria para uso em plásticos (pluviômetro Alternativo 7). A área de captação da precipitação pluviométrica foi medida, obtendo-se o valor de  $64,1 \text{ cm}^2$  (Figura 4.10).



FIGURA 4.10 – Pluviômetro alternativo 7, construído a partir de uma garrafa *PET* e contendo pintura interna e externa com tinta acrílica

#### (f) Análises considerando um pluviômetro comercial, constituído de material plástico

Foi verificada também a influência do material e características construtivas de um pluviômetro comercial disponível no mercado. Este pluviômetro é confeccionado em corpo único de plástico cristal e OS, sendo a medição realizada no próprio corpo do instrumento (Figura 4.11). A área de captação do pluviômetro é de 5,7 cm<sup>2</sup> e sua escala varia de 5 mm a 150 mm, com precisão de 2 mm (pluviômetro Alternativo 8).



FIGURA 4.11 – Pluviômetro Alternativo 8, comercial, construído de material plástico cristal e OS, possuindo área de captação de 5,7 cm<sup>2</sup>, com escala variando de 5 mm a 150 mm, e obtendo precisão de 2 mm

#### 4.3.2 Coleta e avaliação da precipitação pluviométrica

A coleta dos dados de precipitação pluviométrica foi realizada nos dias com pluviometria, às 9:00 h da manhã, no período compreendido entre 16 de julho de 2008 e 15 de janeiro de 2009. Para reduzir a possibilidade de erros nas leituras, com exceção do pluviômetro Alternativo 8 (comercial), as medições foram realizadas utilizando a mesma proveta graduada de 250 ml, para todos os pluviômetros utilizados no experimento.

A determinação da altura precipitada foi calculada com expressão,

$$P_i = 10 \cdot \frac{V_i}{A} \quad (03)$$

Sendo,  $P_i$  – altura de precipitação pluviômetro no  $i$ -ésimo dia (mm dia<sup>-1</sup>);  $V_i$  – volume de água captada no pluviômetro considerado, no  $i$ -ésimo dia (ml dia<sup>-1</sup>);  $A$  – área de captação do pluviômetro considerado (cm<sup>2</sup>).

A análise dos resultados foi realizada por meio de ajuste de equações de regressão linear aos dados observados e seu respectivo coeficiente de correlação (R). Assim, foram realizadas análises contrastando precipitação medida (Pluviômetro *Ville de Paris*) vs estimada com os pluviômetros alternativos, confrontado as características: (a) área de captação e altura do pluviômetro em relação o solo; (b) tamanho da área de captação da precipitação pluviométrica; (c) método de retirada do líquido armazenado do pluviômetro; (d) influência do funil quanto às perdas por evaporação devido ao material construtivo e a existência ou não de funil interno; e, (e) relação aos produtos comerciais existentes.

Para avaliar a exatidão entre os valores de precipitação pluviométrica medida com o pluviômetro tipo *Ville de Paris* e os pluviômetros alternativos, foi utilizado o índice “*d*” de concordância de WILLMOTT *et al.* (1985), cuja equação é apresentada abaixo. Os valores deste índice podem variar de zero a 1 (um), sendo que quanto mais próximo da unidade, melhor será a exatidão das estimativas do modelo.

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{P}_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|\hat{P}_i - \bar{P}| + |P_i - \bar{P}|)^2} \right] \quad (04)$$

Sendo: *d* – índice de concordância de WILLMOTT *et al.* (1985);  $\hat{P}_i$  – precipitação pluviométrica estimada no *i*-ésimo dia ( $\text{mm dia}^{-1}$ );  $P_i$  – precipitação medida no pluviômetro tipo *Ville de Paris* no *i*-ésimo dia ( $\text{mm dia}^{-1}$ );  $\bar{P}$  – média das precipitações pluviométricas medidas no pluviômetro *Ville de Paris*, no período considerado ( $\text{mm dia}^{-1}$ ); *n* – número de dias.

#### 4.4 MÉTODOS PADRÃO E ALTERNATIVOS UTILIZADOS PARA ESTIMAR A EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (*ET<sub>o</sub>*)

##### 4.4.1 Método padrão para estimativa da evapotranspiração de referência (*ET<sub>o</sub>*)

A evapotranspiração de referência padrão (*ET<sub>o</sub>*), diária, foi estimada para a região de Curitiba-PR com o método de Penman-Monteith, utilizando uma planilha desenvolvida por ARAUJO e SOUZA (2008). Esta planilha emprega a parametrização recomendada pela FAO – *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (ALLEN *et al.*, 1998), cuja equação geral é dada por:

$$ET_{oPMi} = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (Rn - G) + \gamma \cdot \frac{900}{(T_{MED} + 273)} \cdot U_2 \cdot (es - ea)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot U_2)} \quad (05)$$

sendo:  $ET_{oPMi}$  – evapotranspiração de referência estimada com o método de Penman-Monteith para um  $i$ -ésimo dia ( $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ );  $\Delta$  – declividade da curva de pressão de vapor da água à temperatura do ar ( $\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ );  $Rn$  – radiação líquida na superfície ( $\text{MJm}^{-2} \text{d}^{-1}$ );  $G$  – balanço do fluxo de calor no solo ( $\text{MJm}^{-2} \text{d}^{-1}$ );  $\gamma$  – constante psicrométrica ( $\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ );  $T_{MED}$  – temperatura média do ar ( $^\circ\text{C}$ );  $U_2$  – velocidade do vento a dois metros de altura ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $es$  – tensão de saturação de vapor ( $\text{kPa}$ );  $ea$  – tensão parcial de vapor ( $\text{kPa}$ ).

O trabalho de ARAUJO (2008) traz todos os detalhes sobre a equação de Penman-Monteith parametrizada pela FAO (ALLEN *et al.*, 1998) e os passos seguidos para constituir a planilha eletrônica desenvolvida por ARAUJO e SOUZA (2008), para se chegar ao cálculo da  $ET_o$  com o referido método.

#### 4.4.2 Métodos alternativos para estimativa da evapotranspiração de referência ( $ET_o$ )

Para a estimativa da evapotranspiração da referência ( $ET_o$ ) foram utilizados modelos alternativos, empíricos e simplificados, que consideram basicamente a temperatura do ar e a radiação solar extraterrestre do local. Desta forma, foram utilizados os métodos propostos por THORNTHWAITE (1948), CAMARGO (1971), HARGREAVES e SAMANI (1985), LINACRE (1977), BUDYKO (CASTRO NETO e SOARES, 1989) e modelos ajustados a partir de correlações entre  $ET_{oPM}$  (Penman-Monteith) diária vs temperatura máxima ( $T_{Max}$ ) e mínima ( $T_{Min}$ ) diária, com as equações linear, exponencial, logarítmica e potencial.

##### (a) Método de THORNTHWAITE (1948)

O método de THORNTHWAITE (1948) estima a  $ET_o$  para um mês de 30 dias e 12 horas de fotoperíodo. No presente estudo o cálculo foi realizado utilizando-se uma planilha denominada “MORETTI – Módulo: Estimativa da evapotranspiração de referência com o método de THORNTHWAITE (1948)”, desenvolvida por SOUZA (2007). Basicamente o módulo estima a  $ET_o$  conforme a metodologia de THORNTHWAITE (1948) descrita por PEREIRA *et al.* (1997). No entanto, seguindo o procedimento adotado por SOUZA *et al.* (1994), a estimativa da  $ET_o$  diária foi realizada considerando a temperatura média diária do ar ( $T_{MEDi}$ ), conforme descrito a seguir:

$$ETo_{TWi} = \frac{N_i}{12} \cdot \frac{1}{30} \cdot 16 \cdot \left( \frac{10 \cdot T_{MEDi}}{I} \right)^a, \quad \text{sendo: } T_{MEDi} > 0^\circ C \quad (06)$$

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1,7912 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0,49239 \quad (07)$$

$$I = \sum_{i=1}^{12} (0,2 \cdot T_m)^{1,514}, \quad \text{sendo: } T_m > 0^\circ C \quad (08)$$

Sendo:  $ETo_{TWi}$  – evapotranspiração de referência estimada com o método de THORNTHWAITE (1948) para o  $i$ -ésimo dia ( $\text{mm dia}^{-1}$ );  $N_i$  – fotoperíodo do  $i$ -ésimo dia (h);  $T_{MEDi}$  – temperatura média do ar no  $i$ -ésimo dia ( $^\circ\text{C}$ );  $a$  – função cúbica do índice de calor ( $I$ ) da região (adimensional);  $I$  – índice de calor da região (adimensional);  $T_m$  – temperatura média normal do  $m$ -ésimo mês do ano ( $^\circ\text{C}$ ).

#### (b) Método de CAMARGO (1971)

A estimativa da  $ETo$  foi realizada conforme a metodologia de CAMARGO (1971) descrita por PEREIRA *et al.* (1997). No entanto, os cálculos da  $ETo$  não foram realizados para um período de 10 a 30 dias conforme sugerido, mas sim para um período diário, conforme está apresentado abaixo:

$$ETo_{CMi} = Qo_i \cdot F \cdot T_{MEDi} \quad (09)$$

Sendo:  $ETo_{CMi}$  – evapotranspiração de referência estimada com o método de CAMARGO (1971) para o  $i$ -ésimo dia ( $\text{mm dia}^{-1}$ );  $Qo_i$  – radiação solar extraterrestre do  $i$ -ésimo dia, expressa em equivalente de evaporação ( $\text{mm dia}^{-1}$ );  $F$  – fator de ajuste que varia com a temperatura média anual do local (como a região de Curitiba possui temperatura média anual inferior a  $23^\circ\text{C}$ , o valor de  $F$  utilizado foi igual a 0,01);  $T_{MEDi}$  – temperatura média do ar no  $i$ -ésimo dia ( $^\circ\text{C}$ ).

Os valores de radiação solar extraterrestre do  $i$ -ésimo dia, expressa em  $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ , foram calculados utilizando a planilha eletrônica desenvolvida por ARAUJO e SOUZA (2008). A transformação dos valores de radiação solar extraterrestre do  $i$ -ésimo dia em equivalente de evaporação ( $Qo_i$  –  $\text{mm dia}^{-1}$ ) foi realizada a partir da relação:

$$Qo_{i(\text{mm.dia}^{-1})} = \frac{Qo_{i(\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1})}}{2,45} \quad (10)$$

Sendo:  $Qo_{i(mm.dia^{-1})}$  – radiação solar extraterrestre do  $i$ -ésimo dia em equivalente de evaporação, contendo a unidade  $mm\ dia^{-1}$ ;  $Qo_{i(MJ.m^{-2}.dia^{-1})}$  – radiação solar extraterrestre do  $i$ -ésimo dia contendo a unidade  $MJ\ m^{-2}\ dia^{-1}$ .

### (c) Método de HARGREAVES e SAMANI (1985)

A estimativa da  $ETo$  com o método de HARGREAVES e SAMANI (1985) foi realizada conforme a metodologia descrita por PEREIRA *et al.* (1997):

$$ETo_{HS\ i} = 0,0023 \cdot Qo_i \cdot (T_{MED\ i} + 17,8) \cdot (T_{MAX\ i} - T_{MIN\ i})^{0,5} \quad (11)$$

Sendo:  $ETo_{HS\ i}$  – evapotranspiração de referência estimada com o método de HARGREAVES e SAMANI (1985) para o  $i$ -ésimo dia ( $mm\ dia^{-1}$ );  $Qo_i$  – radiação solar extraterrestre do  $i$ -ésimo dia expressa em equivalente de evaporação ( $mm\ dia^{-1}$ );  $T_{MED\ i}$  – temperatura média do ar no  $i$ -ésimo dia ( $^{\circ}C$ );  $T_{MAX\ i}$  – temperatura máxima do ar no  $i$ -ésimo dia ( $^{\circ}C$ );  $T_{MIN\ i}$  – temperatura mínima do ar no  $i$ -ésimo dia ( $^{\circ}C$ ).

Os valores de  $Qo_i$ , na unidade  $mm\ dia^{-1}$ , foram calculados conforme descrito no subitem anterior, para o método de CAMARGO (1971).

### (d) Método de BUDYKO

Segundo CASTRO NETO e SOARES (1989), a equação simplificada e empírica de BUDYKO estima o valor da  $ETo$  diária a partir da expressão:

$$ETo_{BK\ i} = 0,20 \cdot T_{MED\ i} \quad (12)$$

Sendo:  $ETo_{BK\ i}$  – evapotranspiração de referência estimada com o método de Budyko para o  $i$ -ésimo dia ( $mm\ dia^{-1}$ );  $T_{MED\ i}$  – temperatura média do ar no  $i$ -ésimo dia ( $^{\circ}C$ ).

### (e) Método de LINACRE (1977)

A estimativa da  $ETo$  foi realizada conforme a metodologia de Linacre descrita por PEREIRA *et al.* (1997):

$$ETo_{LC\ i} = \frac{700 \frac{T_{MED\ i} + 0,006z}{100 - \phi} + 15(T_{MED\ i} - Td_i)}{80 - T_{MED\ i}} \quad (13)$$

Sendo:  $ETo_{LC\ i}$  – evapotranspiração de referência estimada com o método de Linacre para o  $i$ -ésimo dia ( $mm\ dia^{-1}$ );  $T_{MED\ i}$  – temperatura média do ar no  $i$ -ésimo dia ( $^{\circ}C$ );  $z$  – altitude do

local (m);  $\varphi$  – latitude do local (Graus);  $Td_i$  – temperatura de ponto de orvalho no  $i$ -ésimo dia ( $^{\circ}\text{C}$ ).

**(f) Método ajustado a partir dos dados de temperatura máxima e mínima com a  $ET_o$  estimada pelo método de Penman-Monteith**

Baseando-se nas considerações de HENRIQUE (2006), a partir de correlações entre os valores de  $ET_{OPM}$  (Penman-Monteith) diária vs temperatura máxima ( $T_{MAX}$ ) e mínima ( $T_{MIN}$ ) diária, buscou-se também ajustes com as equações do tipo linear, exponencial, logarítmica e potencial. Relações que permitissem a estimativa da  $ET_o$ .

**4.4.3 Coleta dos dados climáticos e avaliação da evapotranspiração de referência ( $ET_o$ )**

Os dados climáticos necessários para as estimativa da  $ET_o$  com os métodos descritos anteriormente foram obtidos na estação climatológica de Curitiba, localizada nas coordenadas 25°26'03" latitude Sul, 49°13'49" longitude Oeste e 935 m de altitude. Os dados foram fornecidos pelo Instituto Meteorológico do Paraná (SIMEPAR) e compreendem o período entre 21 de dezembro de 1997 a 31 de dezembro de 2007. Foram necessários dados diários como: temperaturas máxima ( $T_{max}$ ), média ( $T_{med}$ ) e mínima ( $T_{min}$ ) diárias do ar; velocidade ( $U_z$ ) e altura ( $z$ ) da medida do vento. O número médio de horas de insolação ( $n$ ) foi retirado de BRASIL (1992).

A comparação dos valores de  $ET_o$  estimados com os métodos alternativos estudados e obtidos com o método de Penman-Monteith, foram realizadas empregando análises de regressão linear e seu respectivo coeficiente de correlação (R). Assim, foram realizadas análises contrastando as estimativas diárias de evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) entre o método de Penman-Monteith (FAO – ALLEN *et al.*, 1998) e os demais métodos apresentados anteriormente (THORNTHWAITE, 1948, CAMARGO, 1971; HARGREAVES e SAMANI, 1985; BUDYKO; LINACRE, 1977; e, Modelos ajustados no presente trabalho com as equações linear, exponencial, logarítmica, potencial).

Para avaliar o grau de exatidão entre valores de  $ET_o$  estimada com o método de Penman-Monteith e os demais métodos estudados, foi utilizado o índice “ $d$ ” de concordância de WILLMOTT *et al.* (1985), cuja equação é apresentada abaixo.

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (ETo_{Alternativo\ i} - ETo_{PM\ i})^2}{\sum_{i=1}^n \left( \left| ETo_{Alternativo\ i} - \overline{ETo_{PM}} \right| + \left| ETo_{PM\ i} - \overline{ETo_{PM}} \right| \right)^2} \right] \quad (14)$$

Sendo:  $d$  – índice de concordância de WILLMOTT *et al.* (1985);  $ETo_{Alternativo\ i}$  – evapotranspiração de referência estimada no  $i$ -ésimo dia com o método alternativo ( $\text{mm dia}^{-1}$ );  $ETo_{PM\ i}$  – evapotranspiração de referência estimada com o método de Penman-Monteith no  $i$ -ésimo dia ( $\text{mm dia}^{-1}$ );  $\overline{ETo_{PM}}$  – média das evapotranspirações de referência estimada com o método de Penman-Monteith no período considerado ( $\text{mm dia}^{-1}$ );  $n$  – número de dias.

Como parâmetro estatístico de comparação, utilizou-se o índice “ $c$ ” adotado por CAMARGO e SENTELHAS (1997), que serve como indicador de desempenho dos métodos alternativos, sendo expresso da seguinte forma:

$$“c” = “R” \cdot “d” \quad (15)$$

Sendo: “ $c$ ” – índice “ $c$ ” proposto por CAMARGO e SENTELHAS (1997) (adimensional); “ $R$ ” – coeficiente de correlação (R) calculado para a regressão linear (adimensional); “ $d$ ” – índice “ $d$ ” de exatidão proposto por WILLMOTT *et al.* (1985) (adimensional).

O critério adotado para interpretar o desempenho dos métodos estudados, usando o índice “ $c$ ” para os valores médios diários de evapotranspiração conforme apresentado por CAMARGO e SENTELHAS (1997), encontra-se disposto na Tabela 4.2.

TABELA 4.2. Critério de interpretação do desempenho dos métodos de estimativa da  $ETo$ , pelo índice “ $c$ ” de CAMARGO e SENTELHAS (1997)

Valor de índice “ $c$ ”	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito Bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
≤ 0,40	Péssimo

#### 4.5 CENÁRIO PARA VERIFICAÇÃO DOS COMPONENTES DO BALANÇO HÍDRICO UTILIZANDO OS MÉTODOS PADRÃO E ALTERNATIVO

As análises e estimativas dos componentes do balanço hídrico seqüencial para periodicidade diária, tais como armazenamento (*ARM*) evapotranspiração real (*ER*), deficiência hídrica (*DEF*) e excedente hídrico (*EXC*), foram realizadas com auxílio do programa computacional denominado “*MORETTI* – Módulo: Balanço hídrico seqüencial (Periodicidade: 1, 5, 7, 10 15 e 30 dias), Versão 1.0” (SOUZA, 2008), extraído e melhorado a partir dos modelos realizados por SOUZA (2001) – Modelo para a análise de risco econômico aplicado ao planejamento de projetos de irrigação para a cultura do cafeeiro – e SOUZA (2005) – *MORETTI* - Módulo: Balanço hídrico climatológico decendial irrigacionista, Versão 2.0.

As simulações com o modelo de balanço hídrico seqüencial (SOUZA, 2008) foram realizadas no Laboratório de Modelagem de Sistemas Agrícolas (LAMOSA), Departamento de Solos e Engenharia Agrícola (DSEA), Setor de Ciências Agrárias (SCA) da Universidade Federal do Paraná (UFPR). Como qualquer programa destinado à realização de um balanço hídrico seqüencial, o modelo desenvolvido por SOUZA (2008) também necessita de uma série de dados climáticos, atributos físico-hídricos do solo e coeficientes da cultura em estudo. No presente trabalho, os principais dados foram: precipitação pluviométrica (*P*), evapotranspiração de referência (*ET<sub>o</sub>*), coeficiente de cultivo (*kc*), fração água disponível (*p*) e capacidade de água disponível no solo (*CAD*).

Foram realizados balanços hídricos utilizando valores diários de *P* e *ET<sub>o</sub>*, medidos e, ou, estimados com os métodos padrão e alternativo (o que apresentou o melhor desempenho nas análises realizadas) entre o período de 15 de julho de 2008 a 15 de janeiro de 2009. Os dados de precipitação pluviométrica foram coletados na área experimental do Departamento de Solos e Engenharia Agrícola (DSEA) / SCA / UFPR. Os dados climáticos para proceder as estimativa da *ET<sub>o</sub>*, são da estação climatológica de Curitiba, localizada a 25°26'03" latitude Sul, 49°13'49" longitude Oeste 935 m de altitude. Os dados foram fornecidos pelo Instituto Meteorológico do Paraná (SIMEPAR)

Os valores de evapotranspiração da cultura (*ET<sub>c</sub>*) foram calculados no programa balanço hídrico com a equação:

$$ET_c = ET_o \cdot kc \quad (16)$$

Sendo:  $ETc$  – a evapotranspiração da cultura ( $\text{mm dia}^{-1}$ );  $ETo$  – evapotranspiração de referência ( $\text{mm dia}^{-1}$ );  $kc$  – coeficiente de cultivo (adimensional) – Foi considerado no presente trabalho um valor único de  $kc$ , sendo igual a um ao longo de todo o período analisado, pois a cultura de referência é a grama.

Nas análises, foi considerada a realização do balanço hídrico diário para quatro capacidades de água disponível ( $CAD$ ) do solo: 30 mm, 60 mm, 90 mm e 120 mm. Os valores de água disponível ( $AD$ ) foram obtidos no programa de balanço hídrico (SOUZA, 2008) com a equação,

$$AD = CAD \cdot p \quad (17)$$

Sendo:  $AD$  – água disponível no solo (mm);  $CAD$  – capacidade de água disponível do solo (mm);  $p$  – fração de água disponível no solo para um determinado tipo de cultura (adimensional) – Foi considerado no presente trabalho um valor de  $p = 0,5$  ao longo de todo o período analisado.

Conforme recomendação de SOUZA e GOMES (2007), a estimativa do armazenamento de água no solo e, ou, “negativo acumulado”, para o cálculo do balanço hídrico diário, foi realizado utilizando a opção “Equação Co-senoidal”, apresentada no programa desenvolvido por SOUZA (2008), que realiza os cálculos a partir das seguintes condições,

– Quando  $CAD \cdot (1 - p) < ARM \leq CAD$ , ou seja, na zona úmida,

$$ARM = CAD - L \quad (18)$$

– Quando  $0 < ARM \leq CAD \cdot (1 - p)$ , ou seja, na zona seca,

$$ARM = (1 - p) \cdot CAD \cdot \left\{ 1 - \frac{2}{\pi} \cdot \arctg \left[ \frac{\pi}{2} \left( \frac{|L| - CAD \cdot p}{(1 - p) \cdot CAD} \right) \right] \right\} \quad (19)$$

Sendo:  $CAD$  – a capacidade de água disponível (mm);  $ARM$  – o armazenamento de água do solo (mm);  $L$  – o valor do negativo acumulado no decêndio (mm);  $p$  – a fração água disponível no solo para uma determinada cultura (adimensional).

Para o início do cálculo dos balanços hídricos a partir de 15 de Julho de 2008, o armazenamento de água no solo foi determinado a partir de um balanço hídrico diário preliminar, tendo como entrada valores de  $P$  e  $ETo$  obtidos com metodologia padrão, entre o dia primeiro de janeiro de 2008 e 14 de julho de 2008. Nestas análises, foram considerados os

valores de  $P$  (*Ville de Paris*) e  $ET_o$  (Penman-Monteith) obtidos com dados do SIMEPAR,  $kc = 1,0$ ,  $p = 0,5$  e  $CAD$ 's de 30 mm, 60 mm, 90 mm e 120 mm.

As análises para verificar os componentes do balanço hídrico ( $ARM$ ,  $ER$ ,  $DEF$  e  $EXC$ ) calculados com os métodos alternativo de melhor desempenho ( $P_{alternativo}$  e  $ET_{oalternativo}$ ) em relação as componentes do balanço hídrico ( $ARM$ ,  $ER$ ,  $DEF$  e  $EXC$ ) calculadas com os métodos padrão ( $P_{Ville de Paris}$  e  $ET_{oPM}$ ), foram realizadas da seguinte forma:

- Realização dos balanços hídricos diários considerando os dados de  $P_{Ville de Paris}$  e  $ET_{oPM}$  do SIMEPAR,  $kc = 1,0$  e  $p = 0,5$ , entre os dias 01/01/2008 a 14/07/2008 para estimativa dos valores de  $ARM$  inicial, considerando  $CAD$ 's de 30 mm, 60 mm, 90 mm e 120 mm;
- Realização dos balanços hídricos diários considerando os dados de  $P_{Ville de Paris}$  (área experimental) e  $ET_{oPM}$ ,  $kc = 1,0$  e  $p = 0,5$ , entre os dias 15/07/2008 a 15/01/2009 para estimativa dos valores de  $ARM$ ,  $ER$ ,  $DEF$  e  $EXC$ , considerando  $CAD$ 's de 30 mm, 60 mm, 90 mm e 120 mm;
- Realização dos balanços hídricos diários considerando os dados de  $P_{Alternativo}$  e  $ET_{oalternativo}$  (ambos de melhor desempenho),  $kc = 1,0$  e  $p = 0,5$ , entre os dias 15/07/2008 a 15/01/2009 para estimativa dos valores de  $ARM$ ,  $ER$ ,  $DEF$  e  $EXC$ , considerando  $CAD$ 's de 30 mm, 60 mm, 90 mm e 120 mm;
- Contabilização e fechamento quinzenal dos valores de  $ARM$ ,  $ER$  e  $DEF$ , realizado para os oito balanços hídricos realizados entre 15/07/2008 a 15/01/2009 com metodologia padrão ou alternativa;
- Apresentação dos resultados de  $ARM$ ,  $ER$  e  $DEF$  obtidos quinzenalmente em tabelas e gráficos para fins de comparação;
- Obtenção do erro absoluto no valor da deficiência hídrica ( $DEF$ ) a partir dos valores quinzenais originados dos balanços hídricos diários realizados com metodologia padrão e alternativa.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 RELAÇÃO ENTRE A PRECIPITAÇÃO MEDIDA COM O PLUVIÔMETRO PADRÃO E ESTIMADA COM OS PLUVIÔMETROS ALTERNATIVOS

Na Tabela 5.1 encontram-se apresentados os respectivos valores de coeficiente de correlação (R), índices “*d*” de WILLMOTT *et al.* (1985) e “*c*” de CAMARGO e SENTELHAS (1997), obtidos por meio de ajuste das retas de regressão linear, contrastando os valores de precipitação medida com o pluviômetro padrão (*Ville de Paris*) e estimada com os pluviômetros Alternativos 1 a 8. Além dos indicadores mencionados, na Figura 5.1 encontram-se apresentadas as equações e diagramas de dispersão das análises de regressão linear realizadas.

TABELA 5.1 Coeficiente de correlação (R), índices “*d*” de WILLMOTT *et al.* (1985) e “*c*” de CAMARGO e SENTELHAS (1997), determinados nas análises, contrastando os valores de precipitação medida com o pluviômetro padrão (*Ville de Paris*) e estimada com os pluviômetros alternativos 1 a 8

Pluviômetro	R	Índice “ <i>d</i> ”	----- Índice “ <i>c</i> ” -----	
			Valor	Desempenho
Alternativo 1	0,9690	0,9833	0,9528	Ótimo
Alternativo 2	0,9955	0,9970	0,9925	Ótimo
Alternativo 3	0,9965	0,9981	0,9946	Ótimo
Alternativo 4	0,9950	0,9975	0,9925	Ótimo
Alternativo 5	0,9950	0,9971	0,9921	Ótimo
Alternativo 6	0,9985	0,9993	0,9978	Ótimo
Alternativo 7	0,9955	0,9969	0,9924	Ótimo
Alternativo 8	0,9960	0,9917	0,9877	Ótimo

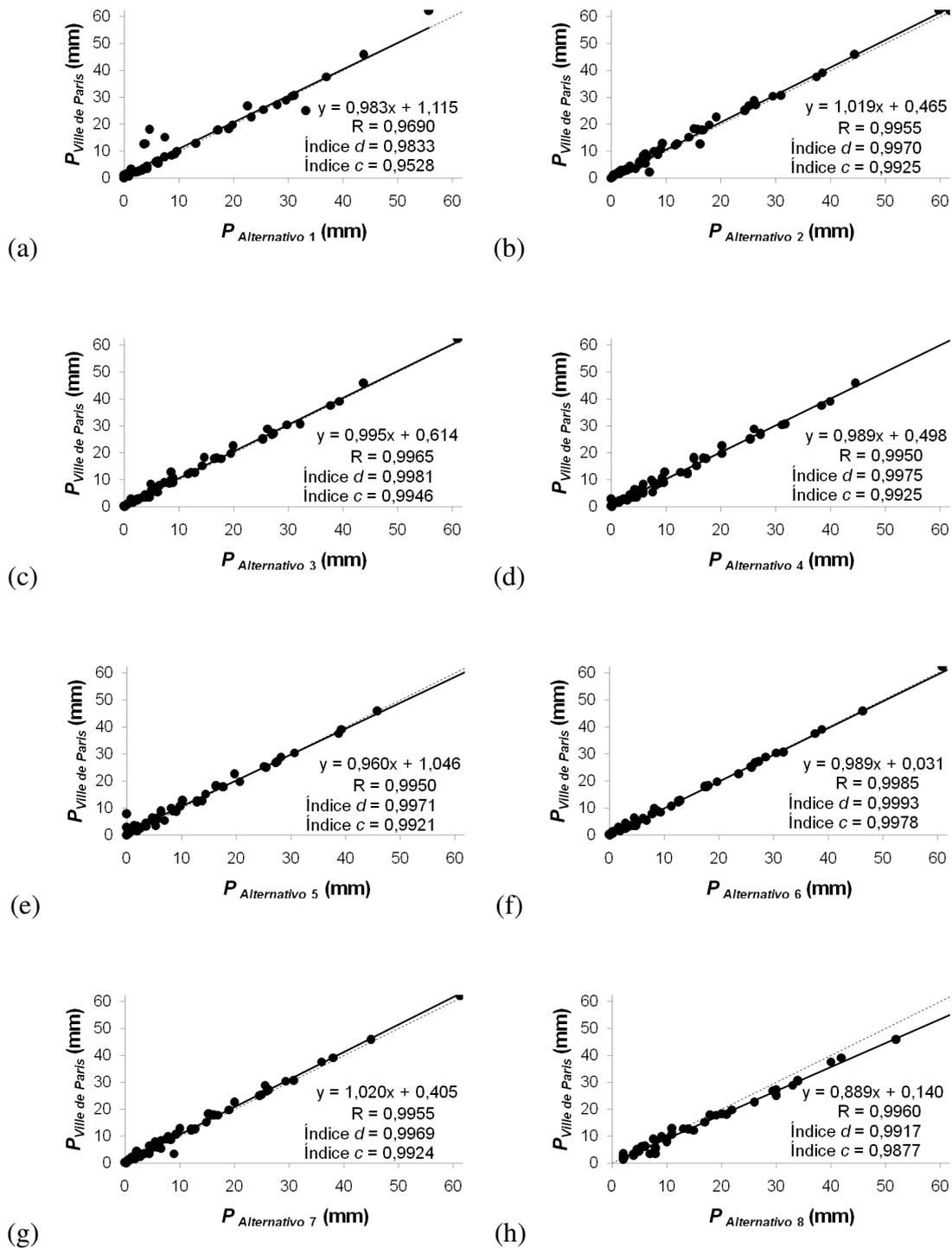


FIGURA 5.1 – Regressão linear e seu respectivo coeficiente de correlação (R), índices “ $d$ ” de WILLMOTT *et al.* (1985) e “ $c$ ” de CAMARGO e SENTELHAS (1997), resultante das análises entre os valores de precipitação diária medidos com o pluviômetro padrão (*Ville de Paris*) e Alternativos, sendo: (a) Alternativo 1; (b) Alternativo 2; (c) Alternativo 3; (d) Alternativo 4; (e) Alternativo 5; (f) Alternativo 6; (g) Alternativo 7; e, (h) Alternativo 8

As estimativas realizadas com os pluviômetros Alternativos 1 a 8 mostraram ter boa associação com as medidas realizadas no *Ville de Paris*. Na Tabela 5.1 e Figura 5.1 é possível verificar que o melhor valor de coeficiente de correlação ocorreu para o pluviômetro Alternativo 6 ( $R = 0,9985$ ) e o pior para o Alternativo 1 ( $R = 0,9690$ ), evidenciando que os pontos estão muito próximos da reta de regressão linear em todas as análises realizadas.

As retas de regressão linear ajustadas aos dados de precipitação estimados pelos pluviômetros Alternativos de 2 a 7 também aproximaram-se consideravelmente da linha de  $45^\circ$ , evidenciando, em média, que registraram valores exatos em relação ao pluviômetro padrão (Tabela 5.1 e Figura 5.1). O maior índice “ $d$ ” encontrado foi para o pluviômetro Alternativo 6 (“ $d$ ” = 0,9993) e o menor ocorreu para o Alternativo 1 (“ $d$ ” = 0,9833).

Considerando o índice “ $c$ ” de desempenho (Tabela 5.1) e seguindo a escala de CAMARGO E SENTELHAS (1997), verificou-se que os pluviômetros Alternativos 1 a 8 apresentaram desempenho “ótimo”, variando entre 0,9528 (Alternativo 1) a 0,9978 (Alternativo 6). Os pluviômetros Alternativos 1 e 8 obtiveram valores de desempenho (índice “ $c$ ”) menor que os demais pluviômetros alternativos testados. O resultado obtido pelo pluviômetro Alternativo 1 deveu-se a associação ( $R = 0,9690$ ) e exatidão (“ $d$ ” = 0,9833), enquanto o pluviômetro 8 deveu-se a exatidão (“ $d$ ” = 0,9917).

À parte dos resultados obtidos, principalmente para o índice de desempenho “ $c$ ” de CAMARGO e SENTELHAS (1997), obtido para os pluviômetros Alternativos 1 a 8 (Tabela 5.1), cabe ressaltar algumas questões referentes aos aspectos construtivos dos mesmos, que também influenciam na operacionalização das medições:

(a) Com relação à altura de instalação dos pluviômetros, pode-se observar que o pluviômetro Alternativo 1 ( $R = 0,9690$ ), por ter sido instalado próximo a superfície do solo, acabou por sofrer maior influência da ação do vento e do escoamento horizontal das águas precipitadas também proporcionou maior esforço mecânico sobre o pluviômetro, bem como o acúmulo de detritos dentro do recipiente. Apesar de ser um fator presente em todos os pluviômetros testados, a presença de insetos no pluviômetro Alternativo 1 foi maior do que nos demais, principalmente nas estações da primavera e do verão. Em períodos de chuva diária com alta intensidade e duração, verificou-se por oito vezes perda da leitura, tendo como motivo: volumes de água superiores a 1500 ml, com o nível da água atingindo a área do funil; água entrando na cavidade onde o pluviômetro se encontra instalado, virando o recipiente de coleta;

(b) Quanto ao tamanho da área de captação do pluviômetro, observou-se que a sua variação não afetou de modo significativo a sua precisão. Porém, o manuseio do pluviômetro Alternativo 3, cuja área é de  $231,5 \text{ cm}^2$ , foi mais difícil devido ao seu tamanho e ao material plástico, muito flexível. Observou-se que ao longo do tempo o mesmo sofreu deformações, mas que não afetaram a sua área total;

(c) Em relação ao processo de coleta do volume de água dentro do pluviômetro, verificou-se que a utilização de uma mangueira contendo torneira aumentou o tempo necessário para se realizar a leitura do pluviômetro Alternativo 5 e não introduziu melhora significativa na precisão. Em diversas ocasiões ocorreram acúmulos de sujeira no interior da mangueira e entupimentos. Sempre que o volume de água coletada foi maior que o volume da proveta utilizada (250 ml) para a coleta, foi necessário fechar a torneira da mangueira com uma das mãos e segurar a proveta com a outra, dificultando o seu manuseio;

(d) Quanto à existência do funil interno (Alternativo 6) ou de pintura interna e externa (Alternativo 7) no pluviômetro para fins de redução da evaporação, também não se verificou diferenças significativas. No entanto, é interessante observar que no pluviômetro Alternativo 6 observou-se o processo de condensação de água na parte interna do funil interior. Como o pluviômetro *Ville de Paris* também apresenta um funil interno, este fato talvez tenha determinado a pequena superioridade do pluviômetro Alternativo 6 em relação aos demais;

(e) Nas medições com o pluviômetro Alternativo 8 (comercial), utilizou-se a escala impressa no próprio corpo do instrumento. No entanto, observou-se após as análises dos dados experimentais, que o seu corpo não possui as paredes paralelas. Assim, o mesmo não apresentava forma cilíndrica, mas sim, em forma de tronco de cone, com a área da base menor que a área de captação. Aparentemente, a escala impressa na parede do pluviômetro não levou em consideração o seu aspecto geométrico, o que explica o resultado obtido na análise de índice “ $d$ ” (“ $d$ ” = 0,9917), que dá uma idéia da exatidão das leituras, ser inferior ao resultado alcançado na análise de regressão ( $R = 0,9960$ ), que mede apenas o grau de associação entre as leituras (Figura 5.1h). Este tipo de pluviômetro apresentou também as bordas mais grossas dentre todos os pluviômetros testados ( $\cong 3,3 \text{ mm}$ ), possibilitando o pouso de pássaros, os quais acabaram por promover a perda de seis medições devido ao acúmulo de excrementos em seu interior. Os pluviômetros Alternativos 2 a 7 tiveram espessura das bordas com aproximadamente  $0,4 \text{ mm}$  e não apresentaram este tipo de problema.

Entre todos os pluviômetros testados, o Alternativo 4 foi o que apresentou maiores facilidades operacionais, devido ao seu pequeno tamanho (0,5 L) e área de captação (34,6 cm<sup>2</sup>), menor custo e facilidade de construção. Desta forma, como os coeficientes e índices obtidos pelo pluviômetro Alternativo 4 ( $R = 0,9950$ ;  $“d” = 0,9975$ ;  $“c” = 0,9925$ ) estão muito próximos dos obtidos pelo Alternativo 6 ( $R = 0,9985$ ;  $“d” = 0,9993$ ;  $“c” = 0,9978$ ), optou-se por selecionar o pluviômetro Alternativo 4 para ser utilizado nos cenários para verificação dos componentes do balanço hídrico utilizando os métodos padrão e alternativo. No entanto, é oportuno e importante considerar que o pluviômetro Alternativo 4 tem limitação quanto a sua capacidade, conseguindo armazenar uma altura de precipitação inferior a 86,7 mm dia<sup>-1</sup>, 34% inferior a capacidade do pluviômetro *Ville de Paris* (131,3 mm dia<sup>-1</sup> - Tabela 4.1).

Assim, em locais ou situações em que a perda de leituras possam proporcionar problemas, o uso dos pluviômetros constituídos de garrafas *PET* de água mineral de 1,5 L é mais interessante, pois as características de facilidade operacional, construtiva e menor custo ainda permaneceriam, e os pluviômetros não estariam propensos as perdas de leitura devido a precipitações diárias mais intensas, de longo período de retorno, superior a 110 mm dia<sup>-1</sup> (capacidade aproximada do pluviômetro alternativo de 1,5 L).

FARIA *et al.* (2005), também testaram um modelo de pluviômetro alternativo de “baixo custo” (R\$ 60,00), construído com tubo de PVC (50 cm de altura, 100 mm de diâmetro, 165 cm<sup>2</sup> de área de captação, mais conexões e registros para a retirada da água) no Campus Universitário de Jataí-GO (UFG). Nas análises de regressão realizadas, os autores obtiveram bons resultados entre as leituras do pluviômetro padrão (Estação Meteorológica principal pertencente ao 10<sup>o</sup> DISME/INME) e o pluviômetro de PVC ( $R = 0,9949$ ), proporcionando margem de erro de apenas 0,2%. Baseando-se nos resultados obtidos, os autores concluíram que um pluviômetro de PVC teve excelente desempenho na obtenção de dados pluviométricos.

Contudo, é interessante observar que alguns modelos de pluviômetro alternativo, construídos e testados no presente estudo, possuem vantagens em relação ao estudado por FARIA *et al.* (2005). Os pluviômetros Alternativos 2 e 4 a 7, por exemplo, além de apresentarem bons resultados estatisticamente e serem mais simples (instalação, leitura, manutenção), possuem custo praticamente simbólico, limitando-se a haste para sua fixação e proveta, não sendo necessária a compra de materiais como tubo de PVC, conexões, registros, entre outros.

## 5.2 EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA ( $ETo$ )

### 5.2.1 Variação de alguns elementos climáticos no período de 1998 a 2007

Os métodos padrão e alternativos de estimativa de evapotranspiração de referência ( $ETo$ ) foram aplicados na região de Curitiba-PR para um período de 10 anos (1998 – 2007). Observa-se nas Tabelas 5.2 e 5.3 que a temperatura média dos meses mais quentes (verão) foi inferior a 21,3 °C, e a dos meses mais frios (inverno), foi inferior a 14,9 °C. A distribuição da umidade relativa média foi uniforme durante todo o ano ( $UR$  entre 78,1% e 80,7%), com exceção do mês de agosto ( $UR = 74,5%$ ). A velocidade média do vento é maior na primavera ( $VV = 2,4 \text{ m s}^{-1}$ ) e menor no outono ( $VV = 1,9 \text{ m s}^{-1}$ ).

Baseando-se na média, desvio padrão (Tabelas 5.2 e 5.3) e coeficiente de variação (CV), verificou-se para a temperatura, umidade relativa e velocidade do vento, que:

- (a) as menores variações da temperatura ocorreram nos meses do verão (CV entre 9,3% e 11,0%) e as maiores variações ocorreram nos meses de maio a setembro (CV entre 19,7% e 25,2%). O mês de julho apresentou as maiores variações (CV = 25,2%) nos valores de temperatura, e o mês de fevereiro, a menor variação (CV = 9,3%);
- (b) Como a umidade relativa e a velocidade do vento estão relacionadas à temperatura, os resultados obtidos para estas variáveis ao longo dos meses do ano (maiores e menores variações do CV), seguem a mesma tendência estacional verificada para a temperatura;
- (c) A menor variação da umidade relativa ocorreu no mês de março (CV = 8,1%) e a maior variação no mês de agosto (CV = 15,4%). O período de verão apresentou CV = 8,6%, contra CV = 14,5% no período do inverno, que apresenta maior variabilidade devido à entrada de maior número de frentes frias;
- (d) Dentre as três variáveis analisadas, a velocidade do vento apresentou as maiores variações (CV entre 22,7% e 42,1%). A menor variação ocorreu no mês de janeiro (CV = 22,7%) e a maior variação no mês de maio (CV = 42,1%).

TABELA 5.2. Médias mensais, desvios padrão e coeficientes de variação ( $CV$ ) da temperatura média do ar ( $T_{MED}$ ), umidade relativa do ar ( $UR$ ) e velocidade do vento ( $VV$ ), a dez metros de altura, para um período de dez anos (série de 1998 a 2007)

Mês	$T_{MED}$ (°C)	$s_{T_{MED}}$ (°C)	$CV_T$ (%)	$UR$ (%)	$s_{UR}$ (%)	$CV_{UR}$ (%)	$VV$ (m s <sup>-1</sup> )	$s_{VV}$ (m s <sup>-1</sup> )	$CV_{VV}$ (%)
Janeiro	21,3	2,2	10,3	79,8	7,2	9,0	2,2	0,5	22,7
Fevereiro	21,4	2,0	9,3	79,0	6,6	8,4	2,1	0,6	28,6
Março	21,0	2,3	11,0	79,2	6,4	8,1	1,9	0,5	26,3
Abril	19,1	2,5	13,1	79,8	7,5	9,4	2,0	0,6	30,0
Mai	15,2	3,0	19,7	79,7	8,8	11,0	1,9	0,8	42,1
Junho	15,1	3,0	19,9	79,3	8,4	10,6	1,9	0,7	36,8
Julho	13,9	3,5	25,2	78,4	10,5	13,4	2,0	0,7	35,0
Agosto	15,4	3,5	22,7	74,5	11,5	15,4	2,0	0,7	35,0
Setembro	15,9	3,6	22,6	79,1	11,5	14,5	2,3	0,7	30,4
Outubro	17,7	2,8	15,8	80,7	8,6	10,7	2,3	0,6	26,1
Novembro	18,7	2,8	15,0	78,1	8,3	10,6	2,4	0,7	29,2
Dezembro	20,4	2,6	12,7	78,6	8,4	10,7	2,3*	0,7*	30,4

\* Para efeitos de cálculo da média e desvio padrão da velocidade do vento, nos meses de dezembro, foram desconsiderados os valores observados no período de 10/12/2007 a 16/12/2007.

TABELA 5.3. Médias, desvios padrão e coeficientes de variação ( $CV$ ) da temperatura média do ar ( $T_{MED}$ ), umidade relativa do ar ( $UR$ ) e velocidade do vento ( $VV$ ), a dez metros de altura, para o período de dez anos (série de 1998 a 2007), nas estações do ano

Mês	$T_{MED}$ (°C)	$s_{T_{MED}}$ (°C)	$CV_T$ (%)	$UR$ (%)	$s_{UR}$ (%)	$CV_{UR}$ (%)	$VV$ (m s <sup>-1</sup> )	$s_{VV}$ (m s <sup>-1</sup> )	$CV_{VV}$ (%)
Verão	21,3	2,2	10,3	79,2	6,8	8,6	2,1	0,6	28,6
Outono	17,1	3,5	20,5	79,7	8,1	10,2	1,9	0,7	36,8
Inverno	14,9	3,6	24,2	77,0	11,2	14,5	2,1	0,7	33,3
Primavera	18,3	3,1	16,9	79,4	8,8	11,1	2,4*	0,6*	25,0

\* Para efeitos de cálculo da média e desvio padrão da velocidade do vento, nos meses de dezembro, foram desconsiderados os valores observados no período de 10/12/2007 a 16/12/2007.

Os valores médios da radiação solar no topo da atmosfera e a temperatura de ponto de orvalho podem ser visualizados nas Tabelas 5.4 e 5.5. Como esperado, o maior valor de radiação solar média ocorreu no mês de dezembro ( $Q_o = 43,1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ , início do verão) e a menor média ocorreu no mês de junho ( $Q_o = 21,2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ , início do inverno). No entanto, a maior variabilidade ocorreu no mês de agosto ( $CV = 6\%$ ), seguida do mês de abril ( $CV = 5,8\%$ ), e a menor variação ocorreu no mês de dezembro ( $CV = 0,2\%$ ), seguida do mês de junho ( $CV = 0,9$ ). As temperaturas médias de ponto de orvalho ( $T_d$ ) ficaram em 19,1 °C, 14,8 °C, 12,3 °C e 16,1 °C para o verão, outono, inverno e primavera, respectivamente. A

magnitude e período em que ocorreram os maiores e menores valores de CV da  $T_d$  e muito semelhante aos obtidos para a temperatura média ( $T_{MED}$ ). As menores variações da  $T_d$  ocorreram nos mês de janeiro e fevereiro (CV = 10,5%), e a maior variação, ocorreu no mês de julho (CV = 29,8%).

TABELA 5.4 Médias mensais, desvios padrão e coeficientes de variação (CV) da radiação solar no topo da atmosfera ( $Q_o$ ) e temperatura de ponto de orvalho ( $T_d$ ), para o período de dez anos (série de 1998 a 2007)

Mês	$Q_o$ (MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup> )	$s_{Q_o}$ (MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup> )	$CV_{Q_o}$ (%)	$T_d$ (°C)	$s_{T_d}$ (°C)	$CV_{T_d}$ (%)
Janeiro	42,5	0,5	1,2	19,1	2,0	10,5
Fevereiro	39,9	1,0	2,5	19,1	2,0	10,5
Março	35,2	1,7	4,8	18,8	2,2	11,7
Abril	29,1	1,7	5,8	16,8	2,8	16,7
Mai	23,8	1,2	5,0	12,8	3,3	25,8
Junho	21,2	0,2	0,9	12,9	2,9	22,5
Julho	22,4	0,9	4,0	11,4	3,4	29,8
Agosto	26,8	1,6	6,0	12,3	3,1	25,2
Setembro	32,8	1,7	5,2	13,6	3,6	26,5
Outubro	38,2	1,4	3,7	15,8	2,7	17,1
Novembro	41,7	0,7	1,7	16,2	2,8	17,3
Dezembro	43,1	0,1	0,2	17,9	2,5	14,0

TABELA 5.5 Médias, desvios padrão e coeficientes de variação (CV) da radiação solar no topo da atmosfera ( $Q_o$ ) e temperatura de ponto de orvalho ( $T_d$ ), para o período de dez anos (série de 1998 a 2007), nas estações do ano

Mês	$Q_o$ (MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup> )	$s_{Q_o}$ (MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup> )	$CV_{Q_o}$ (%)	$T_d$ (°C)	$s_{T_d}$ (°C)	$CV_{T_d}$ (%)
Verão	40,4	2,7	6,7	19,1	2,1	11,0
Outono	26,1	4,2	16,1	14,8	3,6	24,3
Inverno	25,8	4,0	15,5	12,3	3,4	27,6
Primavera	40,1	2,8	7,0	16,1	2,9	18,0

### 5.2.2 Comparação dos valores de $ET_o$ estimados com os métodos alternativos e padrão

Na Tabela 5.6 e Figura 5.2 encontram-se apresentadas as estimativas dos valores médios de evapotranspiração de referência (mm dia<sup>-1</sup>) para a região de Curitiba-PR, obtida no período de 10 anos (série de 1998 a 2007), para as análises considerando os meses do ano. Na Tabela 5.7 e Figura 5.3 podem ser visualizadas as análises para a mesma região e período considerando as estações do ano.

TABELA 5.6 Estimativa da evapotranspiração de referência média ( $\text{mm dia}^{-1}$ ), obtida no período de dez anos (série de 1998 a 2007) para os meses do ano, com os métodos de Penman-Monteith ( $ET_{OPM}$ ), Thornthwaite ( $ET_{OTW}$ ), Camargo ( $ET_{OCM}$ ), Hargreaves e Samani ( $ET_{OHS}$ ), Budyko ( $ET_{OBK}$ ) e Linacre ( $ET_{OLC}$ )

Mês	Métodos de estimativa da $ET_o$					
	$ET_{OPM}$	$ET_{OTW}$	$ET_{OCM}$	$ET_{OHS}$	$ET_{OBK}$	$ET_{OLC}$
	----- (mm dia <sup>-1</sup> ) -----					
Janeiro	3,4	3,4	3,7	7,7	4,3	3,1
Fevereiro	3,2	3,2	3,5	7,3	4,3	3,2
Março	2,8	3,0	3,0	6,4	4,2	3,1
Abril	2,3	2,4	2,3	4,8	3,8	2,8
Mai	1,7	1,5	1,5	3,2	3,0	2,4
Junho	1,5	1,4	1,3	2,9	3,0	2,3
Julho	1,6	1,3	1,3	2,9	2,8	2,2
Agosto	2,1	1,6	1,7	3,8	3,1	2,6
Setembro	2,2	1,8	2,1	4,6	3,2	2,4
Outubro	2,6	2,3	2,8	5,9	3,5	2,6
Novembro	3,1	2,7	3,2	6,8	3,7	2,8
Dezembro	3,3	3,2	3,6	7,4	4,1	3,1
Média	2,5	2,3	2,5	5,3	3,6	2,7

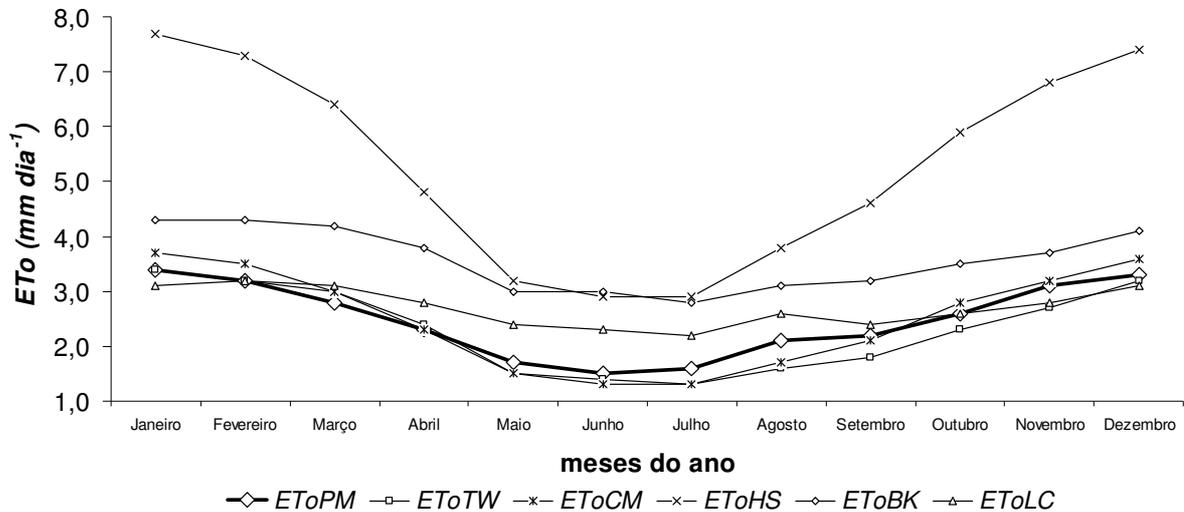


FIGURA 5.2 Estimativa da evapotranspiração de referência média ( $\text{mm dia}^{-1}$ ), obtida no período de dez anos (série de 1998 a 2007) para os meses do ano, com os métodos de Penman-Monteith ( $ET_{OPM}$ ), Thornthwaite ( $ET_{OTW}$ ), Camargo ( $ET_{OCM}$ ), Hargreaves e Samani ( $ET_{OHS}$ ), Budyko ( $ET_{OBK}$ ) e Linacre ( $ET_{OLC}$ )

TABELA 5.7 Estimativa da evapotranspiração de referência média ( $\text{mm dia}^{-1}$ ), obtida no período de dez anos (série de 1998 a 2007) para as estações do ano, com os métodos de Penman-Monteith ( $ET_{OPM}$ ), Thornthwaite ( $ET_{OTW}$ ), Camargo ( $ET_{OCM}$ ), Hargreaves e Samani ( $ET_{OHS}$ ), Budyko ( $ET_{OBK}$ ) e Linacre ( $ET_{OLC}$ )

Estação do ano	Métodos de estimativa da $ET_o$					
	$ET_{OPM}$	$ET_{OTW}$	$ET_{OCM}$	$ET_{OHS}$	$ET_{OBK}$	$ET_{OLC}$
Verão	3,2	3,3	3,5	7,3	4,3	3,1
Outono	1,9	1,9	1,9	4,0	3,4	2,6
Inverno	1,9	1,5	1,6	3,5	3,0	2,4
Primavera	2,9	2,5	3,0	6,4	3,7	2,7
Média	2,5	2,3	2,5	5,3	3,6	2,7

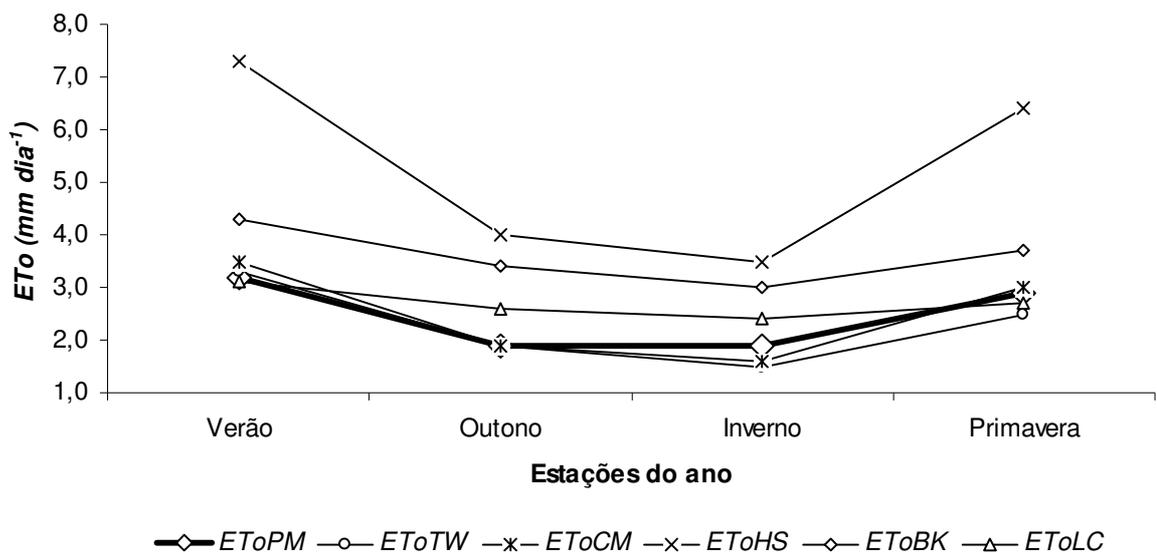


FIGURA 5.3 Estimativa da evapotranspiração de referência média ( $\text{mm dia}^{-1}$ ), obtida no período de dez anos (série de 1998 a 2007) para as estações do ano, com os métodos de Penman-Monteith ( $ET_{OPM}$ ), Thornthwaite ( $ET_{OTW}$ ), Camargo ( $ET_{OCM}$ ), Hargreaves e Samani ( $ET_{OHS}$ ), Budyko ( $ET_{OBK}$ ) e Linacre ( $ET_{OLC}$ )

Os métodos baseados na temperatura do ar, como os testados no presente trabalho geralmente limitam a representatividade das condições climáticas para efeito de estimativa da evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ). Conforme as condições de umidade e ventos, a demanda hídrica da atmosfera será diferente para os mesmos valores da temperatura do ar. Ainda assim, pode-se observar nas Tabelas 5.6 e 5.7 que os métodos de Thornthwaite e

Camargo apresentaram valores médios de  $ET_o$  ( $\text{mm dia}^{-1}$ ) próximos daqueles estimados com a metodologia padrão ( $ET_{oPM}$ ).

Assim como foi verificado nas análises do presente trabalho, o método de Thornthwaite também apresentou bom desempenho para as condições subtropicais úmidas do interior paulista, quando comparado a dados obtidos em evapotranspirômetros (CAMARGO e SENTELHAS, 1997).

Nas análises realizadas, o método de Camargo apresentou seus melhores resultados nas estações de verão e outono e seus piores resultados nas estações do inverno e primavera. Para o período analisado, os resultados indicaram que o método de Camargo apresentou os melhores resultados quando foram examinados os períodos anuais. CAMARGO e SENTELHAS (1997) também obtiveram resultados satisfatórios pra o método de Camargo quando compararam os valores estimados pelo modelo com os valores medidos em evapotranspirômetros no interior de São Paulo.

Nas condições climáticas da região de Curitiba, as estimativas da  $ET_o$  com o método Hargreaves e Samani superestimaram as estimativas realizadas com o método padrão ( $ET_{oPM}$ ). Acredita-se que o método de Hargreaves e Samani superestimou os valores médios diários devido ao clima úmido da região, comprovando as observações de REIS *et al.* (2007) nas regiões norte, sul e serrana do Espírito Santo, e OLIVEIRA (2001), que verificou superestimativas especialmente nas estações chuvosas. O método de Hargreaves e Samani foi desenvolvido na Califórnia, em condições semi-áridas, a partir de dados obtidos em lisímetros com superfície gramada (PEREIRA *et al.*, 1997). A equação empregada utiliza um coeficiente empírico fixo para regiões costeiras e outro para regiões continentais.

Os valores de  $ET_{oBK}$  obtidos pelo método de Budyko também superestimaram, em média, os valores de  $ET_{oPM}$  estimados com o método de Penman-Monteith, comprovando as observações de MAGALHÃES (2008), quando estudou o método para a região de Lavras-MG. O método de Budyko relaciona a  $ET_o$  somente com a temperatura média do ar, sendo indicado apenas em caso de inexistência de dados meteorológicos mais completos ou condições para que se possa estimar a  $ET_o$  por outro método possuindo melhor embasamento teórico. No presente trabalho, o método de Budyko apresentou resultados mais precisos que o método de Hargreaves e Samani devido ao fato do clima da região ser úmido e, assim, apresentar menor amplitude térmica.

O método de Linacre é uma simplificação do método de Penman, onde variáveis como radiação líquida e déficit de saturação, foram substituídas por funções da temperatura do ar. Além das simplificações adotadas há, também, uma expressão empírica usada para calcular a diferença entre a temperatura média e a temperatura de ponto de orvalho, que foi desenvolvida a partir de dados obtidos em diferentes localidades da África e América do Sul (PEREIRA *et al.*, 1997). Para a região de Curitiba, observou-se melhores resultado para as estações mais quentes (verão e primavera), com tendência a superestimar os valores, principalmente nas estações mais frias (outono e inverno).

Na Tabela 5.8 e Figuras 5.4 a 5.8, encontram-se apresentados para o período anual e estações do ano, os valores dos coeficientes de correlação (R) e os índices “*d*” de WILLMOTT *et al.* (1985) e desempenho “*c*” de CAMARGO e SENTELHAS (1997), para cada um dos métodos alternativos de estimativa da *ET<sub>o</sub>*, obtidos a partir da comparação com o método padrão (*ET<sub>oPM</sub>*).

TABELA 5.8 Coeficiente de correlação (R) e índices “*d*” de WILLMOTT *et al.* (1985) e “*c*” de CAMARGO e SENTELHAS (1997), obtidos para os métodos alternativos de Thornthwaite (*ET<sub>oTW</sub>*), Camargo (*ET<sub>oCM</sub>*), Hargreaves e Samani (*ET<sub>oHS</sub>*), Budyko (*ET<sub>oHS</sub>*) e Linacre (*ET<sub>oHS</sub>*), tendo o método de Penman-Monteith (*ET<sub>oPM</sub>*) como padrão

Período	Método de estimativa da evapotranspiração de referência ( <i>ET<sub>o</sub></i> )				
	Thornthwaite	Camargo	Hargreaves e Samani	Budyko	Linacre
<b>Coeficiente de correlação (R) (adimensional)</b>					
Anual	0,85	0,89	0,86	0,77	0,62
Verão	0,74	0,79	0,52	0,65	0,66
Outono	0,76	0,79	0,76	0,70	0,53
Inverno	0,71	0,72	0,73	0,62	0,75
Primavera	0,78	0,80	0,71	0,48	0,75
<b>Índices “<i>d</i>” de WILLMOTT <i>et al.</i> (1985) (adimensional)</b>					
Anual	0,90	0,94	0,41	0,63	0,84
Verão	0,83	0,80	0,16	0,45	0,86
Outono	0,85	0,88	0,38	0,44	0,69
Inverno	0,78	0,79	0,46	0,54	0,76
Primavera	0,81	0,88	0,26	0,64	0,90
<b>Índices de desempenho “<i>c</i>” de CAMARGO e SENTELHAS (1997) (adimensional)</b>					
Anual	0,77 (muito bom)	0,83 (ótimo)	0,35 (péssimo)	0,49 (mau)	0,62 (mediano)
Verão	0,62 (mediano)	0,63 (mediano)	0,08 (péssimo)	0,30 (péssimo)	0,66 (bom)
Outono	0,65 (mediano)	0,70 (bom)	0,29 (péssimo)	0,31 (péssimo)	0,53 (sofrível)
Inverno	0,55 (sofrível)	0,57 (sofrível)	0,34 (péssimo)	0,33 (péssimo)	0,60 (sofrível)
Primavera	0,63 (mediano)	0,70 (mediano)	0,18 (péssimo)	0,48 (mau)	0,75 (bom)

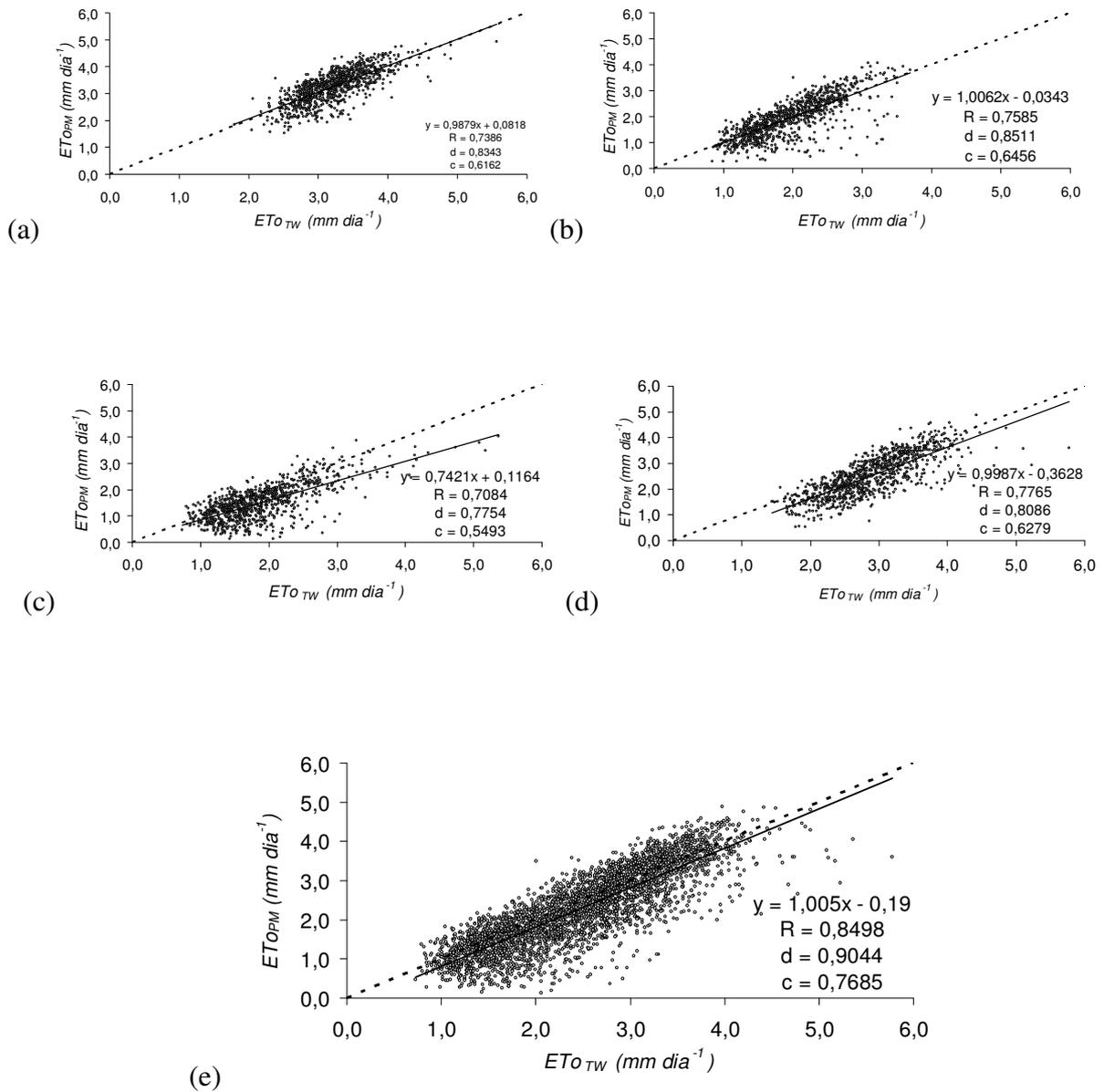


FIGURA 5.4 – Análise de regressão linear, coeficiente de correlação (R) e índices “d” de WILLMOTT *et al.* (1985) e “c” de CAMARGO e SENTELHAS (1997), obtidos da relação entre valores diários de  $ET_{OPM}$  e  $ET_{OTW}$ , considerando os anos de 1998 a 2007, para o período: (a) Verão; (b) Outono; (c) Inverno; (d) Primavera; e, (e) Anual

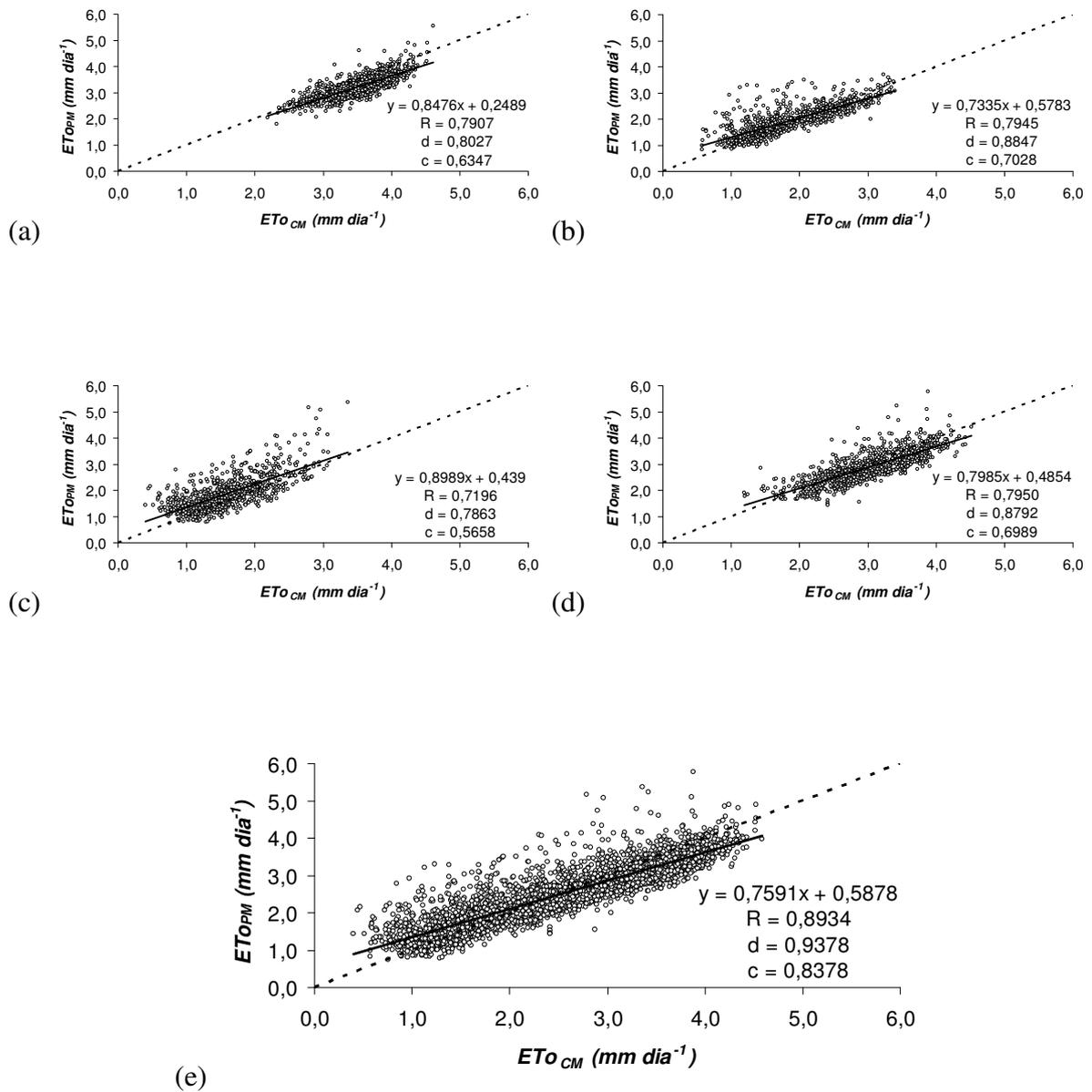


FIGURA 5.5 – Análise de regressão linear, coeficiente de correlação (R), índices “d” de WILLMOTT *et al.* (1985) e “c” de CAMARGO e SENTELHAS (1997), obtidos da relação entre valores diários de  $ET_{0PM}$  e  $ET_{0CM}$ , considerando os anos de 1998 a 2007, para o período: (a) Verão; (b) Outono; (c) Inverno; (d) Primavera; e, (e) Anual

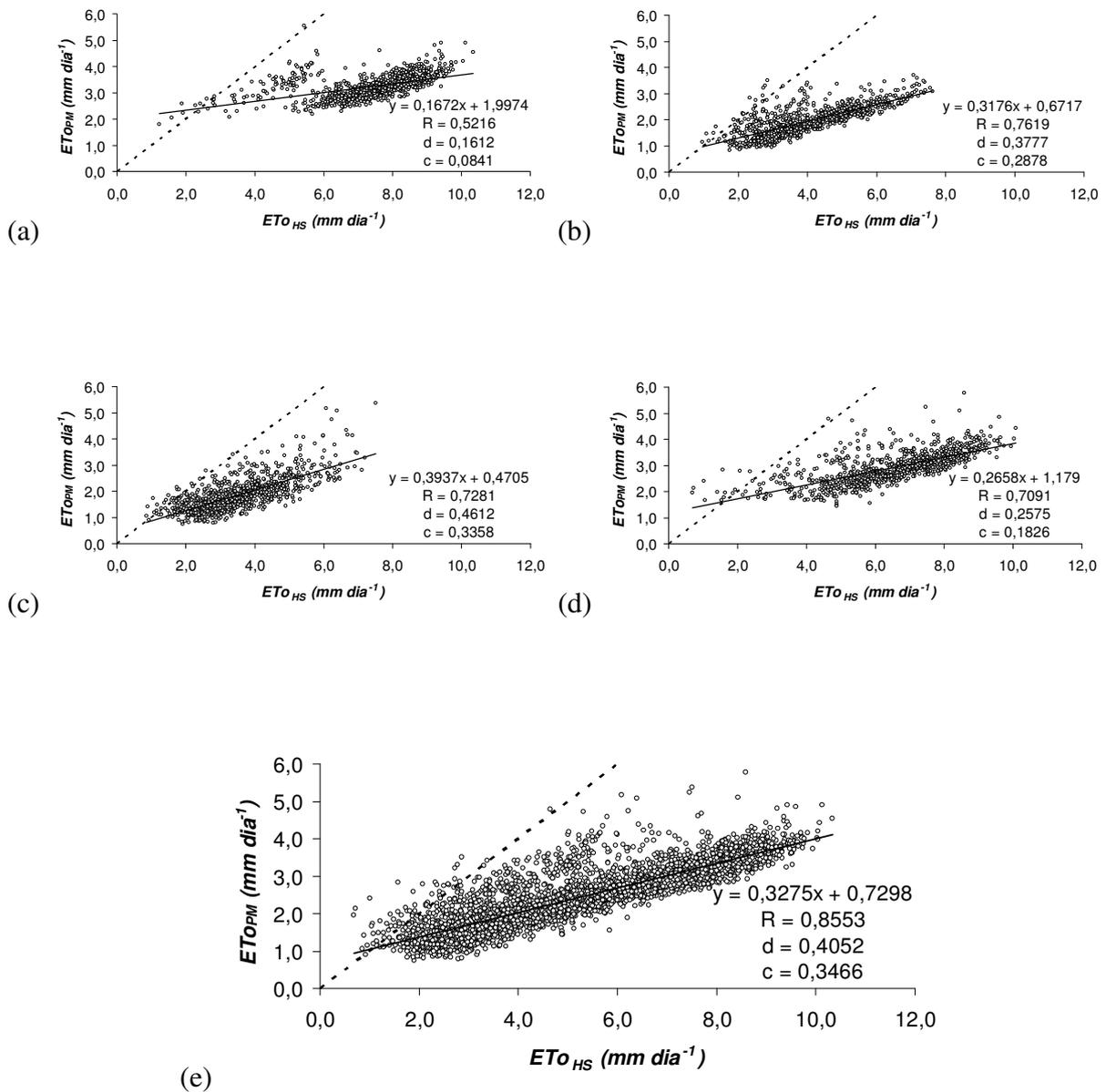


FIGURA 5.6 – Análise de regressão linear, coeficiente de correlação (R), índices “d” de WILLMOTT *et al.* (1985) e “c” de CAMARGO e SENTELHAS (1997), obtidos da relação entre valores diários de  $ET_{OPM}$  e  $ET_{OHS}$ , considerando os anos de 1998 a 2007, para o período: (a) Verão; (b) Outono; (c) Inverno; (d) Primavera; e, (e) Anual

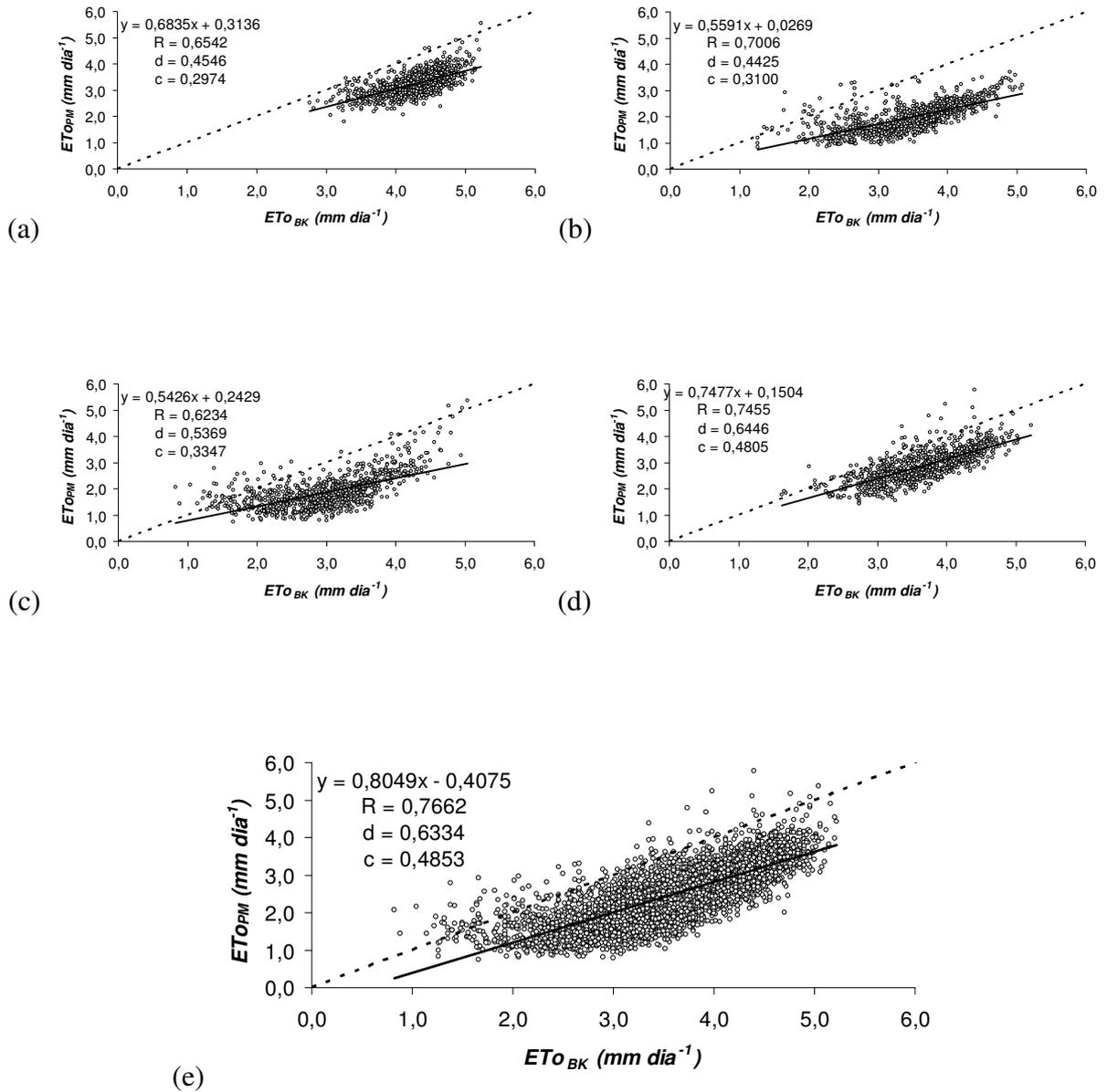


FIGURA 5.7 – Análise de regressão linear, coeficiente de correlação (R), índices “d” de WILLMOTT *et al.* (1985) e “c” de CAMARGO e SENTELHAS (1997), obtidos da relação entre valores diários de  $ET_{OPM}$  e  $ET_{OBK}$ , considerando os anos de 1998 a 2007, para o período: (a) Verão; (b) Outono; (c) Inverno; (d) Primavera; e, (e) Anual

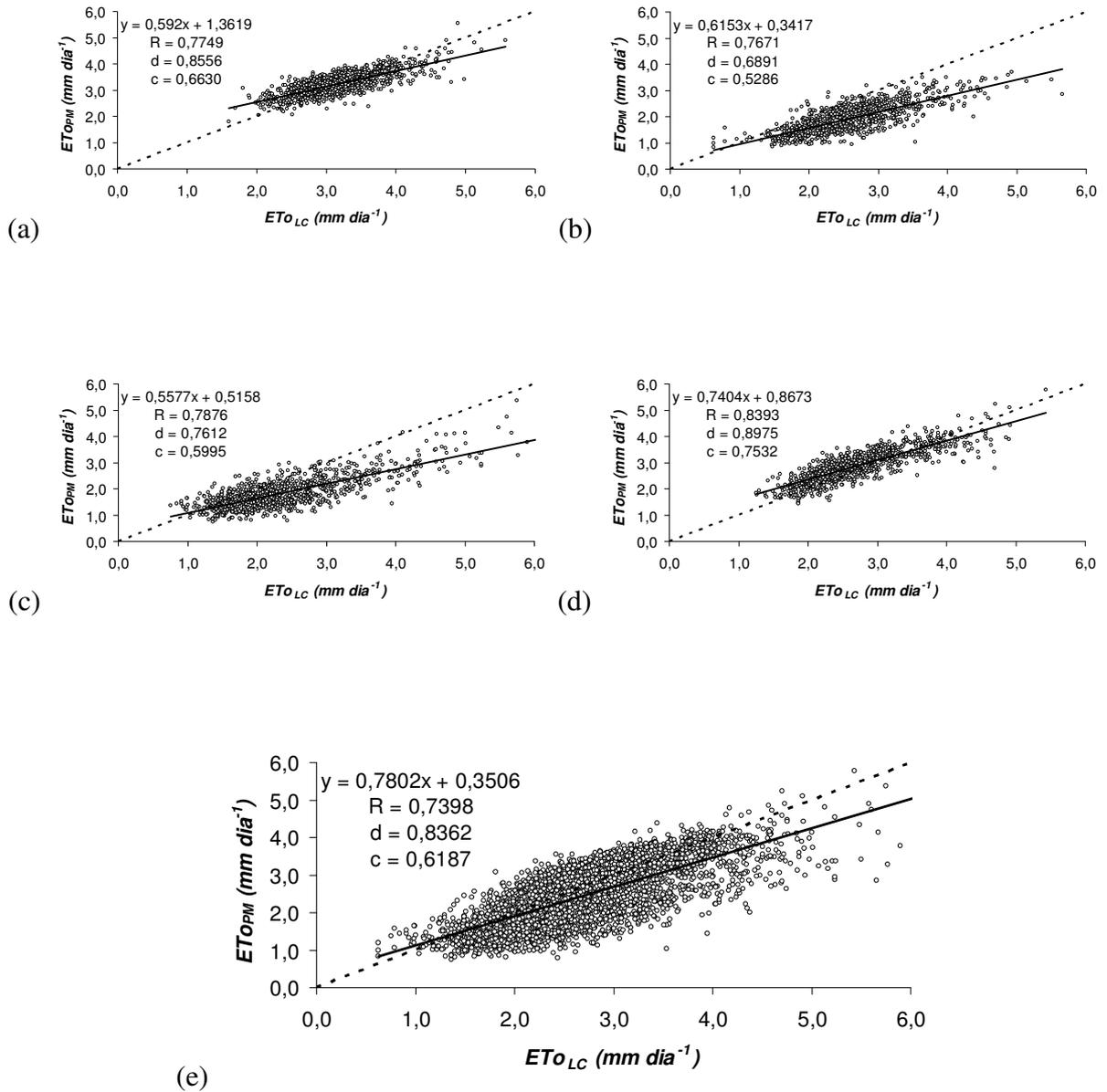


FIGURA 5.8 – Análise de regressão linear, coeficiente de correlação (R), índices “d” de WILLMOTT *et al.* (1985) e “c” de CAMARGO e SENTELHAS (1997), obtidos da relação entre valores diários de  $ET_{OPM}$  e  $ET_{OLC}$ , considerando os anos de 1998 a 2007, para o período: (a) Verão; (b) Outono; (c) Inverno; (d) Primavera; e, (e) Anual

Quando analisados os coeficientes de correlação (R) dos diferentes métodos, para o período anual, pode-se perceber que os métodos de Thornthwaite ( $ET_{OTW}$ ), Camargo ( $ET_{OCM}$ ) e Hargreaves e Samani ( $ET_{OHS}$ ) se destacaram pelos altos valores obtidos. Porém, quando os métodos foram analisados em função do respectivo índice de determinação “ $d$ ”, percebe-se que apenas os métodos de Thornthwaite e Camargo apresentaram comportamento similar, tendo inclusive o método de Hargreaves e Samani apresentado o pior resultado dentre todos analisados. Os índices de desempenho “ $c$ ” também mostraram grande similaridade entre os resultados obtidos pelos métodos de Thornthwaite e Camargo.

O método de Thornthwaite é, sem dúvida, em comparação com o método de Camargo, muito mais conhecido pela comunidade científica. Porém, acredita-se no presente trabalho que o método de Camargo provavelmente é mais adequado para realizar as estimativas da evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) na região de Curitiba. O método de Thornthwaite, apesar de simples, ainda apresenta para usuários não especializados certa complexidade no cálculo e ainda necessita previamente da temperatura média mensal normal dos meses do ano, que é uma informação de difícil acesso.

Resultados similares também foram obtidos em outros trabalhos. CAMARGO e SENTELHAS (1997) avaliaram o desempenho de vinte métodos de estimativas da  $ET_o$ , usando como comparação as medições lisimétricas realizadas no período de 1954 a 1960, em três localidades do Estado de São Paulo. Baseando-se no coeficiente de correlação, índices “ $d$ ” de WILLMOTT et al. (1985) e na proposição de um índice de confiança “ $c$ ”, os autores obtiveram desempenho muito bom (0,78 a 0,91) para os métodos de Thornthwaite e Camargo.

SYPERRECK (2006), comparando estimativas da  $ET_o$  realizadas com métodos alternativos e padrão (Penman-Monteith) na região de Palotina-PR, verificou também que o método de Camargo apresentou os melhores índices “ $c$ ” de desempenho proposto por CAMARGO e SENTELHAS (1997). Porém, resultados distintos foram obtidos por: CONCEIÇÃO (2003), para a Região do Baixo Rio Grande-SP, no qual o método de Hargreaves e Samani foi o que apresentou o melhor resultado.

As considerações dispostas nos parágrafos anteriores confirmam as considerações de PEREIRA et al. (1997), de que os métodos de estimativa da evapotranspiração são desenvolvidos em condições climáticas específicas, segundo a disponibilidade de dados e a realidade física do local, o que torna necessária a verificação da tendência de cada método na região para a qual venha a ser aplicado.

A obtenção de modelos comumente utilizados a partir de análises de regressão simples e correlação, quando possível, é uma excelente forma de realizar estimativas sobre um determinado fenômeno, baseando-se no conhecimento de apenas uma variável descritora. No entanto, a tentativa de ajustar os dados de evapotranspiração de referência estimada com o método de Penman-Monteith ( $ET_{OPM}$ ) vs temperatura máxima ( $T_{MAX}$ ) e mínima ( $T_{MIN}$ ) diária, a partir das considerações de HENRIQUE (2006), apresentaram baixíssimos coeficientes de determinação e índices “ $d$ ” e “ $c$ ” para as equações do tipo linear, exponencial, logarítmica e potencial. Assim, dada à simplicidade das equações mencionadas, a existência de um provável ajustamento entre os dados de  $ET_{OPM}$  vs  $T_{MAX}$ ,  $T_{MIN}$  ou  $(T_{MAX} - T_{MIN})$ , seria interessante, mas não foi possível.

### **5.3 BALANÇOS HÍDRICOS CALCULADOS COM AS METODOLOGIAS PADRÃO E ALTERNATIVA**

Para fins de comparação entre as metodologias padrão (pluviômetro *Ville de Paris* e  $ET_{OPM}$ ) e alternativa (pluviômetro Alternativo 4 e  $ET_{OCM}$ ) foram calculados oito balanços hídricos diários, considerando solos possuindo  $CAD$ 's igual a 30 mm, 60 mm, 90 mm e 120 mm ( $kc = 1,0$  e  $p = 0,5$ ), realizados da segunda quinzena de julho de 2008 até a primeira quinzena de janeiro de 2009. Para comparação dos resultados alcançados ao longo do tempo, os balanços hídricos diários tiveram fechamento de seus componentes em períodos quinzenais. Os dados de  $ET_o$  e precipitação utilizados como entrada no balanço hídrico (apresentado em quinzenas), incluindo parâmetros estatísticos, podem ser visualizados na Tabela 5.9. Os resultados dos componentes do balanço hídrico diário ( $ARM$ ,  $ER$  e  $DEF$ ) e o erro absoluto no valor da deficiência hídrica ( $DEF$ ) encontram-se na Tabela 5.10 e Figura 5.9.

Tabela 5.9 Valores diários de  $ET_o$  e precipitação, apresentados em agrupamentos quinzenais, utilizados nos balanços hídricos diários, empregando metodologias padrão ( $ET_{oPM}$  e  $P_{Ville de Paris}$ ) e alternativa ( $ET_{oCM}$  e  $P_{Alternativo4}$ ), incluindo desvios, verificados no período entre julho de 2008 e janeiro de 2009

Mês	Quin-zena	$P_{Ville de Paris}$	$P_{Alternativo 4}$	$ET_{oPM}$	$ET_{oCM}$	Desvios			
						“ $P_{Ville de Paris} - P_{Alternativo 4}$ ”		“ $ET_{oPM} - ET_{oCM}$ ”	
		(mm quinzena <sup>-1</sup> )				Quinzena	Diário	Quinzena	Diário
		(mm período <sup>-1</sup> )							
Jul.	2 <sup>a</sup>	32,7	32,8	27,1	25,2	-0,10	-0,01	1,90	0,12
Ago.	1 <sup>a</sup>	147,2	141,2	21,8	23,5	6,00	0,40	-1,70	-0,11
Ago.	2 <sup>a</sup>	0,1	0,1	36,2	32,5	0,00	0,00	3,70	0,23
Set.	1 <sup>a</sup>	15,9	16,6	30,6	31,9	-0,70	-0,05	-1,30	-0,09
Set.	2 <sup>a</sup>	22,5	20,7	28,0	29,0	1,80	0,12	-1,00	-0,07
Out.	1 <sup>a</sup>	114,6	107,9	34,7	39,7	6,70	0,45	-5,00	-0,33
Out.	2 <sup>a</sup>	138,2	136,0	41,7	48,7	2,20	0,14	-7,00	-0,44
Nov.	1 <sup>a</sup>	34,6	30,7	41,4	48,3	3,90	0,26	-6,90	-0,46
Nov.	2 <sup>a</sup>	13,3	14,0	41,6	46,4	-0,70	-0,05	-4,80	-0,32
Dez.	1 <sup>a</sup>	33,2	34,2	46,2	51,3	-1,00	-0,07	-5,10	-0,34
Dez.	2 <sup>a</sup>	24,7	21,3	50,0	57,9	3,40	0,21	-7,90	-0,49
Jan.	1 <sup>a</sup>	92,5	85,4	47,2	53,6	7,10	0,47	-6,40	-0,43
<b>Total</b>		669,5	640,9	446,5	448,0	28,6		-41,5	

Considerações sobre os valores da precipitação e desvios verificados entre o pluviômetro padrão (*Ville de Paris*) e alternativo (Alternativo 4), no período entre julho de 2008 e janeiro de 2009 (Tabela 5.9):

(a) De forma geral, no período analisado, o pluviômetro Alternativo 4 subestimou a precipitação pluviométrica em 28,6 mm no período de 6 meses, em relação ao pluviômetro *Ville de Paris*. As subestimativas foram maiores na primeira quinzena dos meses de agosto/2008 (6 mm quinzena<sup>-1</sup>), outubro/2008 (6,7 mm quinzena<sup>-1</sup>) e janeiro/2009 (7,1 mm quinzena<sup>-1</sup>). Nestas quinzenas verificou-se que as precipitações ocorridas foram superiores a 92,5 mm quinzena<sup>-1</sup> no pluviômetro *Ville de Paris*, o que pode ter prejudicado a estimativa realizada com o pluviômetro Alternativo 4. Este pluviômetro possui pequena área de captação (34,6 cm<sup>2</sup>) e menor volume de reservatório (aproximadamente 0,3 L), o que pode ocasionar maiores perdas quando as precipitações diárias são maiores (respingos) e, ou, acompanhadas de ventos;

(b) Com exceção das três quinzenas comentadas anteriormente, em que os desvios diários entre o pluviômetro padrão e alternativo foram de 0,40 mm dia<sup>-1</sup>; 0,45 mm dia<sup>-1</sup> e 0,47 mm

dia<sup>-1</sup> para a primeira quinzena de agosto/2008, outubro/2008 e janeiro/2009, respectivamente, as demais quinzenas apresentaram desvios inferiores a 0,27 mm dia<sup>-1</sup>.

Considerações sobre os valores de *ET<sub>o</sub>* e desvios verificados entre o método de Penman-Monteith (padrão) e o método de Camargo (Alternativo), no período entre julho de 2008 e janeiro de 2009 (Tabela 5.9):

(a) De forma geral, o método de Camargo superestimou em 41,5 mm período<sup>-1</sup> a *ET<sub>o</sub>* estimada em relação ao método de Penman-Monteith (padrão) no período analisado. Os valores de *ET<sub>o</sub>* estimados pelo método de Penman-Monteith foram maiores que os estimados pelo método de Camargo apenas na primeira quinzena de julho/2008 e segunda quinzena de agosto/2008;

(b) Os maiores desvios diários (*ET<sub>o</sub>* em mm dia<sup>-1</sup>) entre os valores de *ET<sub>o</sub>* estimada com o método padrão (Penman-Monteith) e alternativo (Camargo) foram observados a partir da primeira quinzena de outubro/2008. Neste período, merecem destaque a primeira quinzena de novembro/2008 e janeiro/2009 e a segunda quinzena de outubro/2008 e dezembro/2008, em que os desvios do método de Camargo superestimam a *ET<sub>oPM</sub>* em 0,46 mm dia<sup>-1</sup>, 0,43 mm dia<sup>-1</sup>, 0,44 mm dia<sup>-1</sup> e 0,49 mm dia<sup>-1</sup>, respectivamente. Os desvios verificados no período entre julho/2008 e janeiro/2009 ocorreram dentro do que era esperado, visto que os resultados apresentados na Tabela 5.6 e Figura 5.2, evidenciaram, em média (anos 1998 a 2007), que o método de Camargo, superestima os valores de *ET<sub>o</sub>* em relação ao método de Penman-Monteith nos meses de janeiro, fevereiro, março, outubro e dezembro, e subestima nos meses de maio, junho, julho, agosto e setembro.

Considerações sobre os valores de evapotranspiração de referência (*ER*) e desvios verificados nos balanços hídricos utilizando metodologia padrão e alternativa como entrada, no período de julho de 2008 e janeiro de 2009, para água disponível (*AD*) no solo igual a 15 mm, 30 mm, 45 mm ou 60 mm (Tabela 5.10 e Figura 5.9):

(a) Considerando a metodologia **padrão**, os valores de *ER* obtidos no período analisado, com os balanços hídricos possuindo água disponível de 15 mm, 30 mm, 45 mm e 60 mm, foram de 329,9 mm, 388,0 mm, 425,6 mm e 440,3 mm, respectivamente. Como se trata do balanço hídrico padrão, a diferença observada nos valores de *ER* provavelmente ocorreu em razão da capacidade de água disponível no solo (*CAD*) e da água disponível para a cultura (*AD*). Abaixo do armazenamento “*CAD (1 - p)*” o solo passa a limitar exponencialmente a liberação da água para a cultura, aumentando a diferença entre a *ET<sub>o</sub>* e *ER* no período e promovendo

maior deficiência ( $DEF = ETo - ER$ ). É importante observar que nas análises o valor de  $kc$  considerado foi igual a 1,0, logo  $ETo = ETc$ ;

(b) Considerando a metodologia **alternativa**, os valores de  $ER$  obtidos no período analisado, com os balanços hídricos tendo capacidade de água disponível no solo de 15 mm, 30 mm, 45 mm e 60 mm, foram de 342,9 mm, 394,5 mm, 434,0 mm e 455,8 mm, respectivamente;

(c) Como o método de Camargo superestimou os valores de  $ETo$ , principalmente no período entre a primeira quinzena de setembro/2008 a primeira quinzena de dezembro/2009, verifica-se na Figura 5.9 que independente do valor de  $AD$  do solo (15 mm, 30 mm, 45 mm ou 60 mm), as curvas da  $ER$  obtidas com o balanço hídrico utilizando o método alternativo na maior parte do período estiveram acima das curvas da  $ER$  obtidas com a metodologia padrão (Figura 5.9b). Este fato provavelmente contribuiu para que as curvas de armazenamento da água no solo (Figura 5.9a) apresentasse tendência inversa, ou seja, o armazenamento nos balanços hídricos utilizando metodologia padrão foram, de forma geral, maiores do que os valores de armazenamento dos balanços hídricos utilizando metodologia alternativa. Além desse fato, cabe ressaltar que o pluviômetro Alternativo 4 apresentou precipitação pluviométrica  $28,6 \text{ mm período}^{-1}$  menor, no período analisado, o que também contribuiu para a redução do armazenamento de água no solo, pois a entrada de água no sistema foi menor, principalmente nas três quinzenas já discutidas para a precipitação (primeira quinzena de agosto/2008, outubro/2008 e janeiro/2009);

(d) O regime pluviométrico da região no período analisado e a limitação imposta pelo solo com  $AD$  igual a 15 mm, 30 mm, 45 mm e 60 mm contribuíram para que os valores de  $ER$  determinados com base no balanço hídrico **padrão** ( $ET_{OPM}$  e  $P_{Vile\ de\ Paris}$ ) apresentassem valores 26,1%, 13,1%, 4,7% e 1,4% menores que os valores da  $ET_{OPM}$ , respectivamente;

(e) Da mesma forma, a utilização dos métodos alternativos para estimar a evapotranspiração e precipitação ( $ET_{OCM}$  e  $P_{Alternativo\ 4}$ ), bem como o regime pluviométrico da região no período analisado e a limitação imposta pelo solo com  $AD$  igual a 15 mm, 30 mm, 45 mm e 60 mm, contribuíram para que os valores de  $ER$  proveniente do balanço hídrico **alternativo** ( $ET_{OCM}$  e  $P_{Alternativo\ 4}$ ) ficassem 23,2%, 11,6%, 2,8% menores e 2,1% maior que o valor da  $ET_{OPM}$ ;

(f) Os desvios entre os valores de  $ER$  estimados a partir dos balanços hídricos utilizando metodologia padrão e alternativa ( $ER_{padr\tilde{a}o} - ER_{Alternativa}$ ) ficaram em: -13,0 mm, -6,5 mm, -8,4 mm e -15,5 mm, para valores de  $AD$  igual a 15 mm, 30 mm, 45 mm e 60 mm, respectivamente.

TABELA 5.10 Componentes do balanço hídrico diário (*ARM*, *ER* e *DEF*), calculados de julho de 2008 a janeiro de 2009 (fechamento em quinzenas), utilizando dados de *P* e *ET<sub>o</sub>* obtidos com metodologia padrão (*Ville de Paris* e *ET<sub>oPM</sub>*) e alternativa (Alternativo 4 e *ET<sub>oCM</sub>*), para solos possuindo *CAD* igual 30 mm, 60 mm, 90 mm e 120 mm (*kc* = 1,0 e *p* = 0,5)

<i>CAD</i> (mm)	<i>AD</i> (mm)	Componentes	Anos										2009 Jan.	Total	
			2008												
			Jul.	Ago.		Set.		Out.		Nov.		Dez.			
			quinzenas												
2 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>		
<b>Metodologia padrão</b>															
—	—	<i>P<sub>Ville de Paris</sub></i> (mm quinzena <sup>-1</sup> )	32,7	147,2	0,1	15,9	22,5	114,6	138,2	34,6	13,3	33,2	24,7	92,5	669,5
—	—	<i>ET<sub>oPM</sub></i> (mm quinzena <sup>-1</sup> )	27,1	21,8	36,2	30,6	28,0	34,7	41,7	41,4	41,6	46,2	50,0	47,2	415,9
30	15	<i>ARM</i> (mm)	18,6	30,0	4,1	8,5	9,7	24,0	27,6	22,5	7,1	8,6	2,9	30,0	—
30	15	<i>ER</i> (mm quinzena <sup>-1</sup> )	15,9	21,8	26,0	11,5	21,3	34,1	41,7	39,7	28,7	31,7	30,4	27,1	329,9
30	15	<i>DEF</i> (mm quinzena <sup>-1</sup> )	11,2	0,0	10,2	19,1	6,7	0,6	0,0	1,7	12,9	14,5	19,6	12,1	108,6
60	30	<i>ARM</i> (mm)	33,8	60,0	24,1	18,4	19,0	54,0	57,6	50,8	23,4	18,5	9,4	60,0	—
60	30	<i>ER</i> (mm quinzena <sup>-1</sup> )	23,6	21,8	36,0	21,6	21,9	34,1	41,7	41,4	40,7	38,1	33,8	33,3	388,0
60	30	<i>DEF</i> (mm quinzena <sup>-1</sup> )	3,5	0,0	0,2	9,0	6,1	0,6	0,0	0,0	0,9	8,1	16,2	13,9	58,5
90	45	<i>ARM</i> (mm)	60,2	90,0	53,9	39,6	35,6	84,0	87,6	80,8	52,5	39,8	21,7	78,3	—
90	45	<i>ER</i> (mm quinzena <sup>-1</sup> )	27,1	21,8	36,2	30,2	26,5	34,5	41,7	41,4	41,6	45,9	42,8	35,9	425,6
90	45	<i>DEF</i> (mm quinzena <sup>-1</sup> )	0,0	0,0	0,0	0,4	1,5	0,2	0,0	0,0	0,0	0,3	7,2	11,3	20,9
120	60	<i>ARM</i> (mm)	61,4	120,0	83,9	69,2	63,7	114,0	117,6	110,8	82,5	69,5	45,0	94,5	—
120	60	<i>ER</i> (mm quinzena <sup>-1</sup> )	25,9	21,8	36,2	30,6	28,0	34,7	41,7	41,4	41,6	46,2	49,2	43,0	440,3
120	60	<i>DEF</i> (mm quinzena <sup>-1</sup> )	1,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	4,2	6,2
<b>Metodologia Alternativa</b>															
—	—	<i>P<sub>Alternativo 4</sub></i> (mm quinzena <sup>-1</sup> )	32,8	141,2	0,1	16,6	20,7	107,9	136,0	30,7	14,0	34,2	21,3	85,4	640,9
—	—	<i>ET<sub>oCM</sub></i> (mm quinzena <sup>-1</sup> )	25,2	23,5	32,5	31,9	29,0	39,7	48,7	48,3	46,4	51,3	57,9	53,6	488,0
30	15	<i>ARM</i> (mm)	18,8	30,0	4,8	9,2	8,3	18,4	27,3	15,3	5,9	6,9	2,1	30,0	—
30	15	<i>ER</i> (mm quinzena <sup>-1</sup> )	15,6	23,5	25,3	12,2	21,6	38,5	48,7	42,7	23,4	33,2	26,1	32,1	342,9
30	15	<i>DEF</i> (mm quinzena <sup>-1</sup> )	9,6	0,0	7,2	19,6	7,4	1,2	0,0	5,6	23,0	18,1	31,8	21,4	144,9
60	30	<i>ARM</i> (mm)	35,0	60,0	27,6	19,6	17,7	48,3	57,3	39,7	15,5	15,1	7,0	60,0	—
60	30	<i>ER</i> (mm quinzena <sup>-1</sup> )	22,5	23,5	32,5	24,6	22,6	38,7	48,7	48,3	38,2	34,6	29,4	30,9	394,5
60	30	<i>DEF</i> (mm quinzena <sup>-1</sup> )	2,7	0,0	0,0	7,2	6,4	1,0	0,0	0,0	8,2	16,7	28,5	22,6	93,3
90	45	<i>ARM</i> (mm)	62,2	90,0	57,6	42,4	35,2	78,3	87,3	69,7	37,7	27,6	14,2	67,9	—
90	45	<i>ER</i> (mm quinzena <sup>-1</sup> )	25,2	23,5	32,5	31,8	27,9	39,4	48,7	48,3	46,0	44,3	34,7	31,7	434,0
90	45	<i>DEF</i> (mm quinzena <sup>-1</sup> )	0,0	0,0	0,0	0,1	1,1	0,3	0,0	0,0	0,4	7,0	23,2	21,9	54,0
120	60	<i>ARM</i> (mm)	63,1	120,0	87,6	72,3	64,0	108,3	117,3	99,7	67,3	50,6	26,6	76,7	—
120	60	<i>ER</i> (mm quinzena <sup>-1</sup> )	24,3	23,5	32,5	31,9	29,0	39,7	48,7	48,3	46,4	50,9	45,3	35,3	455,8
120	60	<i>DEF</i> (mm quinzena <sup>-1</sup> )	0,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,4	12,6	18,2	32,1

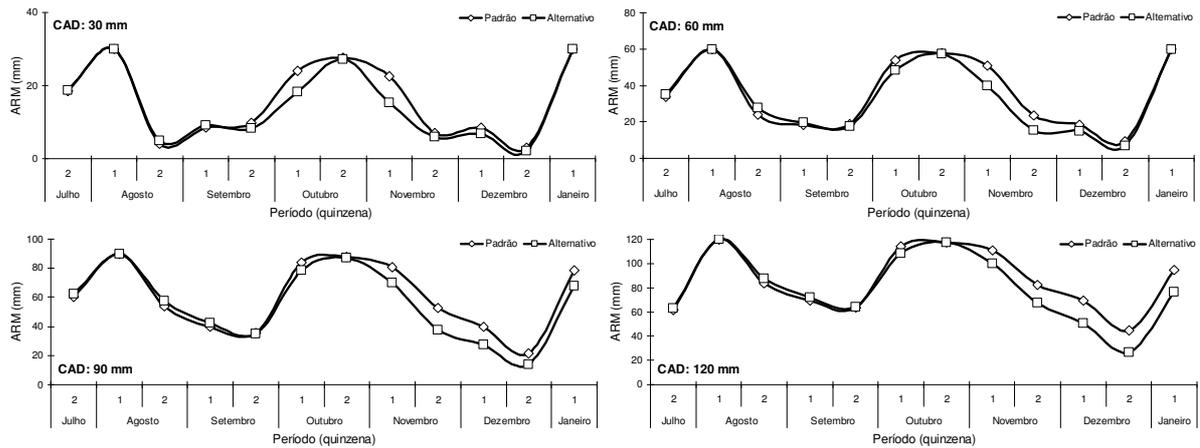
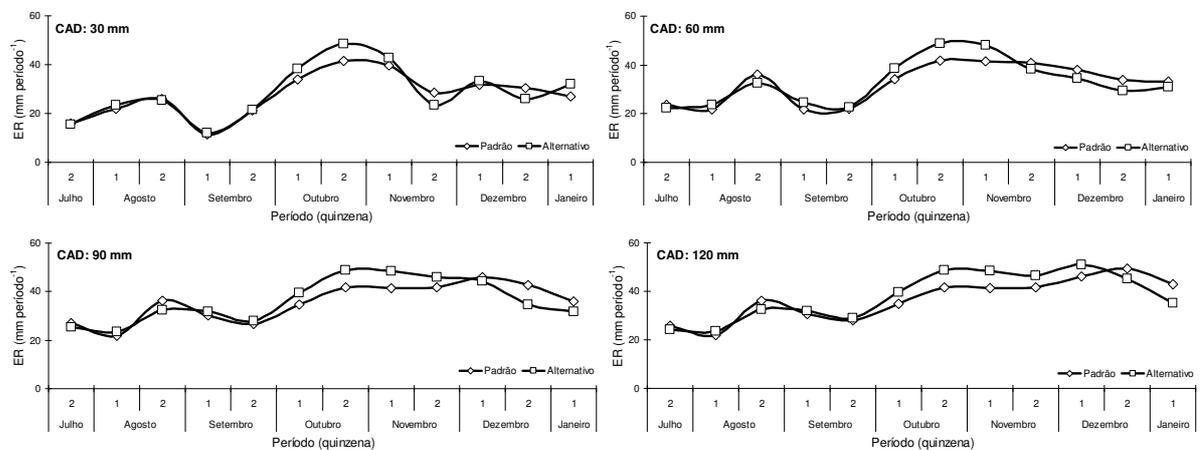
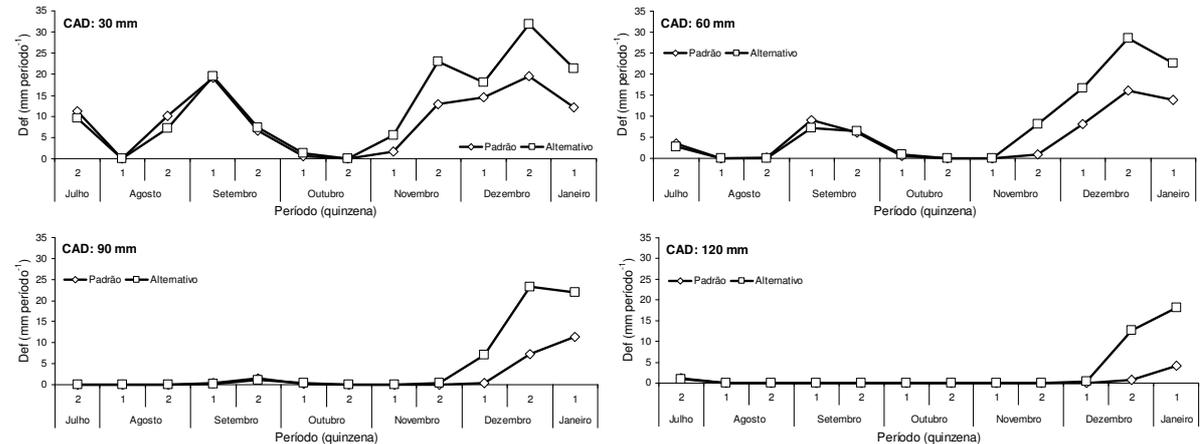
(a) Armazenamento de água no solo (*ARM*)(b) Evapotranspiração Real (*ER*)(c) Deficiência de água no solo (*DEF*)

FIGURA 5.9 – Componentes do balanço hídrico diário (*ARM*, *ER* e *DEF*), calculados de julho de 2008 a janeiro de 2009 (fechamento em quinzenas), utilizando dados de *P* e *ET<sub>o</sub>* obtidos com metodologia padrão (*Ville de Paris* e *ET<sub>oPM</sub>*) e alternativa (Alternativo 4 e *ET<sub>oCM</sub>*), para solos possuindo *CAD* igual 30 mm, 60 mm, 90 mm e 120 mm ( $k_c = 1,0$  e  $p = 0,5$ ), sendo: (a) armazenamento (*ARM*); (b) evapotranspiração real (*ER*); (c) deficiência hídrica (*DEF*)

TABELA 5.11 Erro no valor da deficiência hídrica ( $DEF$ ), verificada entre os balanços hídricos realizados com metodologia padrão e alternativa para  $CAD$ 's de 30 mm, 60 mm, 90 mm e 120 mm (com fechamento quinzenal), contraposto ao total de precipitação pluviométrica ( $P_{Ville\ de\ Paris}$ ) e evapotranspiração de referência ( $ET_{OPM}$ ) ocorrida no período considerado

CAD (mm)	AD (mm)	Componentes	Anos												Total
			2008						2009						
			Jul.	Ago.		Set.		Out.		Nov.		Dez.		Jan.	
			quinzenas												
			2 <sup>a</sup>	1 <sup>a</sup>											
<b>Precipitação (mm quinzena<sup>-1</sup>)</b>															
—	—	$P_{Ville\ de\ Paris}$	32,7	147,2	0,1	15,9	22,5	114,6	138,2	34,6	13,3	33,2	24,7	92,5	669,5
—	—	$P_{Alternativo\ 4}$	32,8	141,2	0,1	16,6	20,7	107,9	136,0	30,7	14,0	34,2	21,3	85,4	640,9
<b>Evapotranspiração de referência (mm quinzena<sup>-1</sup>)</b>															
—	—	$ET_{OPM}$	27,1	21,8	36,2	30,6	28,0	34,7	41,7	41,4	41,6	46,2	50,0	47,2	446,5
—	—	$ET_{OCM}$	25,2	23,5	32,5	31,9	29,0	39,7	48,7	48,3	46,4	51,3	57,9	53,6	488,0
<b>Erro nos valores de DEF (mm quinzena<sup>-1</sup>)</b>															
30	15	$DEF_{Padrão} - DEF_{Alternativa}$	1,6	0,0	3,0	-0,5	-0,7	-0,6	0,0	-3,9	-10,1	-3,6	-12,2	-9,3	-36,3
60	30	$DEF_{Padrão} - DEF_{Alternativa}$	0,8	0,0	0,2	1,8	-0,3	-0,4	0,0	0,0	-7,3	-8,6	-12,3	-8,7	-34,8
90	45	$DEF_{Padrão} - DEF_{Alternativa}$	0,0	0,0	0,0	0,3	0,4	-0,1	0,0	0,0	-0,4	-6,7	-16,0	-10,6	-33,1
120	60	$DEF_{Padrão} - DEF_{Alternativa}$	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-0,4	-11,8	-14,0	-25,9

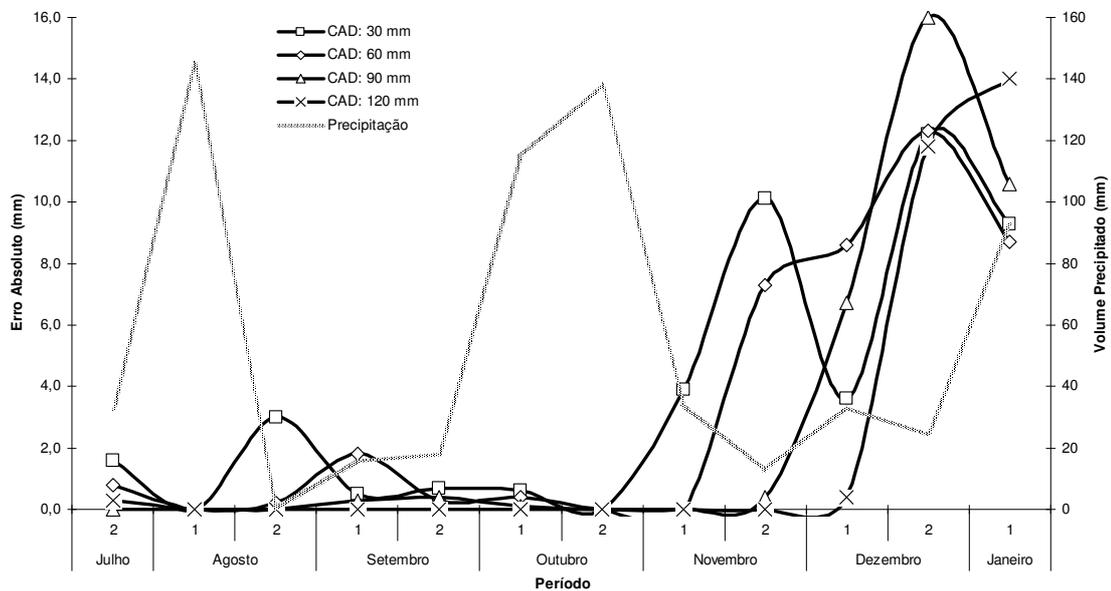


FIGURA 5.10 – Erro absoluto (em módulo) no valor da deficiência hídrica ( $DEF$ ), verificada entre os balanços hídricos realizados com metodologia padrão e alternativa para as  $CAD$ 's de 30 mm, 60 mm, 90 mm e 120 mm (com fechamento quinzenal), contraposto ao total de precipitação pluviométrica ( $P_{Ville\ de\ Paris}$ ) ocorrida no período considerado

Considerações sobre os valores de *DEF* e desvios verificados nos balanços hídricos utilizando metodologia padrão e alternativa como entrada, no período de julho de 2008 a janeiro de 2009, para água disponível (*AD*) no solo igual a 15 mm, 30 mm, 45 mm ou 60 mm (Tabelas 5.10 e 5.11 e Figuras 5.9 e 5.10):

(a) Para a metodologia **padrão**, os valores de *DEF* obtidos no período analisado, com os balanços hídricos considerando água disponível no solo de 15 mm, 30 mm, 45 mm e 60 mm, foram de 108,6 mm, 58,5 mm, 20,9 mm e 6,2 mm, respectivamente. Considerando a metodologia **alternativa**, os valores de *DEF* obtidos no período analisado com água disponível de 15 mm, 30 mm, 45 mm e 60 mm, foram de 144,9 mm, 93,3 mm, 54,0 mm e 32,1 mm, respectivamente. Os valores de deficiência reduziram com o aumento da *CAD* e *AD*, visto que maiores quantidades de água provenientes das precipitações pluviométricas ficaram armazenadas no perfil do solo;

(b) O desvio total entre os valores de *DEF* estimados a partir de balanços hídricos utilizando metodologias padrão e alternativa ( $DEF_{padr\tilde{a}o} - DEF_{Alternativa}$ ), no período analisado, foram de:  $-36,3 \text{ mm per\tilde{a}odo}^{-1}$ ,  $-34,8 \text{ mm per\tilde{a}odo}^{-1}$ ,  $-33,1 \text{ mm per\tilde{a}odo}^{-1}$  e  $-25,9 \text{ mm per\tilde{a}odo}^{-1}$ , para valores de *AD* igual a 15 mm, 30 mm, 45 mm e 60 mm, respectivamente. Como o somatório da  $ET_{oCM}$  no período analisado foi  $41,5 \text{ mm per\tilde{a}odo}^{-1}$  maior do que o somatório da  $ET_{oPM}$ , e a precipitação pluviométrica total medida com o pluviômetro *Ville de Paris* foi  $28,6 \text{ mm per\tilde{a}odo}^{-1}$  maior que a precipitação estimada com o pluviômetro Alternativo 4, verificou-se que o balanço hídrico realizado com a metodologia alternativa teve um saldo de  $-70,1 \text{ mm per\tilde{a}odo}^{-1}$  ( $41,5 \text{ mm per\tilde{a}odo}^{-1} + 28,6 \text{ mm per\tilde{a}odo}^{-1}$ ) menor na contabilização da água no perfil do solo, em relação ao balanço hídrico padrão. Os resultados obtidos com os desvios da deficiência ( $DEF_{padr\tilde{a}o} - DEF_{Alternativa}$ ), evidenciaram que a *CAD* e *AD* do solo foram importantíssimos na atenuação do valor de  $-70,1 \text{ mm per\tilde{a}odo}^{-1}$  para o balanço hídrico alternativo. Este fato pode ser observado nas Figuras 5.9 e 5.10, em que a superestimativa da *ET<sub>o</sub>* e subestimativa da precipitação influenciaram negativamente a contabilidade do balanço hídrico alternativo a partir da 2<sup>a</sup> quinzena de outubro/2008, 1<sup>a</sup> quinzena de novembro/2008, 2<sup>a</sup> quinzena de novembro/2008 e 1<sup>a</sup> quinzena de dezembro/2008, para valores de *AD* iguais a 15 mm, 30 mm, 45 mm e 60 mm, respectivamente. Enquanto os valores de precipitação pluviométrica foram suficientes para manter o armazenamento da água no solo próximo da zona úmida ( $CAD \cdot (1-p) < ARM \leq CAD$ ), as superestimativas da  $ET_{oCM}$  e subestimativas da precipitação com o pluviômetro Alternativo 4 não foram suficientes para prejudicar a

contabilidade do balanço hídrico alternativo (2<sup>a</sup> quinzena de julho/2008 a 2<sup>a</sup> quinzena de outubro/2008). No entanto, a partir deste ponto, quando houve um período com menor pluviometria (1<sup>a</sup> quinzena de novembro/2008 a 2<sup>a</sup> quinzena de dezembro/2008), os desvios entre os valores de alguns componentes (*ER*, *ARM* e *DEF*) dos balanços hídricos padrão e alternativo aumentaram, e o valor de sua amplitude dependeu bastante da *CAD* e *AD* do solo.

Os pontos discutidos para as componentes do balanço hídrico (*ER*, *ARM* e *DEF*) mostram que cuidados devem ser tomados com a utilização de métodos alternativos, como foi realizado no presente trabalho. Mesmo havendo desempenho (índice “*c*”) “ótimo” para as estimativas da precipitação e “mediano” para a estimativa da *ET<sub>o</sub>*, verificou-se que os desvios entre os valores das componentes de um balanço hídrico padrão e alternativo podem ser expressivos, principalmente nos períodos quentes, combinados com valores de precipitação pluviométrica decrescente. O resultado do balanço hídrico alternativo piora bastante quando a superestimativa dos valores da *ET<sub>o</sub>* se somam a subestimativa da precipitação do pluviômetro. Desta forma, os resultados obtidos no presente trabalho indicam, para diferentes regiões, que métodos alternativos devem ser testados individualmente, e quando bem avaliados, deve-se ter o cuidado de também avaliá-los quando forem utilizados em conjunto em algum tipo de metodologia, como foi o caso do presente trabalho com a utilização do balanço hídrico.

## 6 CONCLUSÕES

As estimativas diárias de precipitação realizadas com os pluviômetros Alternativos 1 a 8 apresentaram “ótimo” desempenho com as medidas diárias de precipitação realizadas no pluviômetro *Ville de Paris*. Com base nos índices de desempenho obtidos e nas características funcionais, os pluviômetros Alternativos 2 e 4 a 7, são os mais recomendados por apresentarem facilidades construtivas e operacionais (manuseio)

Os métodos de Thornthwaite e Camargo mostraram desempenho (índice “c”) “muito bom” e “ótimo”, respectivamente, para as análises anuais, considerando estimativas diárias da evapotranspiração de referência (*ET<sub>o</sub>*) na região de Curitiba. Os métodos de Hargreaves e Samani, Budyko e Linacre são inadequados para estimar a *ET<sub>o</sub>* na região analisada.

O desempenho do balanço hídrico realizado com a metodologia alternativa, em comparação com a metodologia padrão, depende da água disponível no solo (*AD*) e da combinação do grau de acerto (associação e exatidão) com que os métodos alternativos estimam *ET<sub>o</sub>* e precipitação dentro do período analisado.

Para um desempenho “ótimo” na estimativa da precipitação (pluviômetro Alternativo 4) e “mediano” na estimativa da *ET<sub>o</sub>* (método de Camargo), às componentes do balanço hídrico alternativo em relação ao padrão (*ER*, *ARM*, *DEF*) têm maiores desvios para períodos quentes e ocorrência de precipitação pluviométrica insuficiente para manter o armazenamento da água no solo próximo de sua zona úmida.

## 7 REFERÊNCIAS

AGM – ANÁLISE GEOPOLÍTICA MUNICIPAL. São José dos Pinhais. Curitiba: Universidade Tuiuti do Paraná (UTP). 2001. 127 p.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements**. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998. 300p. (FAO Irrigation and Drainage paper 56)

ARAÚJO, M. A. **Modelos agrometeorológicos na estimativa da produtividade da cultura da soja na região de Ponta Grossa – Paraná**. Curitiba. 2008. 108f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) – Universidade Federal do Paraná.

ARAÚJO, M.A. de; SOUZA, J.L.M. **Estimativa da evapotranspiração de referência com o método de Penman-Monteith**. Versão 1.0. Curitiba: DSEA/SCA/UFPR, 2008 (Programa computacional). Disponível em: <http://www.moretti.agrarias.ufpr.br/>. Acessado em: 15/01/2009.

ARBOLEYA, G.; MELLO, L. **Operação Chuvas de Verão - Defesa Civil/SP**. São Paulo: Prefeitura da Cidade de São Paulo. Publicado em 29/09/2008. Disponível em: <<http://www2.prefeitura.sp.gov.br/noticias/defesacivil/2008/09/0003>>. Acessado em 20/03/2009.

BRASIL -. MINISTÉRIO DA AGRICULTURA E REFORMA AGRÁRIA. **Normais climatológicas (1961 – 1990)**. Brasília: Secretaria Nacional de Irrigação/Departamento Nacional de Meteorologia, 1992. 84p.

CAMARGO, A.P. **Balanco hídrico no Estado de São Paulo**. Campinas: IAC, 1971. 28p. (Boletim Técnico, 116).

CAMARGO, A.P.; PEREIRA, A.R. **Prescrição de rega por modelo climatológico**. Campinas: Função Cargill, 1990. 27p. (Série Técnico Científica, 170)

CAMARGO, 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**, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CASTILHO, A. Análise comparativa entre a precipitação registrada nos pluviômetros *Ville* de Paris e modelo DNAEE. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRICOS, 16, 2005, **Anais**. João Pessoa. Livro de resumos. João Pessoa: ABRH, 2005. p. 590.

CASTRO NETO, P.; SOARES, A. M. Avaliação sazonal de métodos para a estimativa da evapotranspiração potencia diária em Lavras, Estado de Minas Gerais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEREOLOGIA, 6. 1989. **Anais**. São José dos Campos: INPE, 1989. p. 265-274.

CEZÁRIO, M.V. **Um estudo sobre a influência da precipitação regional do Vale da Paraíba no nível de água do reservatório de Paraibuna, SP**. Taubaté. 2005. 106f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade de Taubaté.

COELHO NETTO, A.L. Hidrologia de encosta na interface com a geomorfologia. In: GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S.B. eds. **Geomorfologia: uma atualização de base e conceitos**, 5. ed., Rio de Janeiro: Bertrand, p. 94-148. 2003.

CONCEIÇÃO, M.A.F. Estimativa da evapotranspiração de referência com base na temperatura do ar para as condições do Baixo Rio Grande, SP. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 11, n. 2, p. 229-236, 2003.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Crop water requeriments**. Roma: FAO, 1975. 179p. (FAO. Irrigation and Draimage, paper 33).

FARIA, S.M.; FERREIRA, C.A.S.; OLIVEIRA, J.J.S.; CABRAL, L.R.; CABRAL, L.A.; ASSUNÇÃO, H.F. Análise da precipitação pluviométrica ocorrida durante os meses de março entre 1996 a 2005 no campus avançado de Jataí/UFG. In: SOCIEDADE BRASILEIRA PARA PROGRESSO DA CIÊNCIA, 57. 2005. **Anais**. Fortaleza: Universidade Estadual do Ceará, 2005.

FRANKE, L.B.; SAIBRO, J.C. Efeito do fósforo e da irrigação no rendimento de sementes de alfafa. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 32, n. 12, p. 1263-1272, 1997.

GOMES, S. **Ajuste a avaliação de um modelo de balanço hídrico decendial e estudo dos limites de sua utilização em algumas localidades do Estado do Paraná.** Curitiba, 2005. 103f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Paraná.

HARGREAVES, G.H.; SAMANI, Z.A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied Engineering Agriculture**, v.1, n.2, p.96-99, 1985.

HENRIQUE, F.A.N. **Estimativa da evapotranspiração de referência em Campina Grande – PB.** Campina Grande, 2006. 102f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Campina Grande.

LAREDO, G.; COSTA, F. Pluviômetro: Equipamento para medir a quantidade de chuva da propriedade rural pode ser feito em casa com apenas dez reais. *Revista Globo Rural (On Line)*: Editora Globo. Disponível em: <<http://revistagloborural.globo.com/globorural/0,6993,EEC1582439-4528,00.html>>. Acessado em 02/03/2009.

LIMA, W.P.; FREIRE, O. Evapotranspiração em plantações de eucalipto e de pinheiro, e em vegetação herbácea natural. **IPEF (nome atual: Scientia Forestalis)**, n. 12, p. 103-117, 1976.

LINACRE, E.T. A simple formula for estimating evapotranspiration rates in various climates, using temperature data alone. **Agricultural Meteorology**, v. 18, p. 409-424, 1977.

MAACK, R. Geografia física do estado do Paraná. ed. 3. Curitiba: Imprensa Oficial, 2002. 440 p.

MAGALHÃES, C.A.S. **Estudo físico-hídrico em lisímetros e comparação de elementos climáticos na região de Lavras/MG.** Lavras, 2008. 84f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras.

MARIN, F.R.; SENTELHAS, P.C.; UNGARO, M.R.G. Perda de rendimento potencial da cultura do girassol por deficiência hídrica, no Estado de São Paulo. **Scientia Agricola**, v. 57, n. 1, p. 1-6, 2000.

MEIRA, M. **Pluviômetros alternativos trazem primeiros resultados** – Campo Limpo: Subprefeitura Municipal de Campo Limpo-SP. Publicado em 13/02/2007. Disponível em: <[http://www2.prefeitura.sp.gov.br/noticias/ars/campo\\_limpo/2007/02/0013](http://www2.prefeitura.sp.gov.br/noticias/ars/campo_limpo/2007/02/0013)>. Acessado em 02/01/2009

MENDES, C.A.R. **Erosão superficial em encosta íngreme sob o cultivo perene e com pousio no município de Bom Jardim – RJ**. Rio de Janeiro, 2006. 236f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro.

MOSTER, C.; LIMA, W.P.; ZAKIA, M.J.B.; CÂMARA, C.D. **Determinação do ano hidrológico visando a quantificação do balanço hídrico em microbacias experimentais**. Piracicaba: Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (IPEF), 2003. 6p. (Circular Técnica, 197)

OLIVEIRA, L.F.C; CARVALHO, D.F; ROMÃO, P.A; CORTÊS, F.C. Estudo comparativo de modelos de estimativa da evapotranspiração de referência para algumas localidades no Estado de Goiás e Distrito Federal. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 31, n. 2, p. 121-126, 2001.

OMETTO, J.C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Ceres, 1981. 425 p.

PEREIRA, A.R.; VILA NOVA, N.A.; SEDYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: ESALQ, 1997. 183p.

REIS, E.F. dos; BRAGANÇA, R.; GARCIA, G.O.; PEZZOPANE, J.E.M.; TAGLIAFERRE, C. Estudo comparativo da estimativa da evapotranspiração de referência para três localidades do Espírito Santo no período seco. **IDESIA**, v. 25, n. 3, p. 75-84. 2007.

SEDIYAMA, G.C. **Necessidade de água para os cultivos**. Brasília: ABEAS, 1987. 145p. (Engenharia de Irrigação. Módulo 4)

SEIBERT, J.; MORÉN, A.S. Reducing systematic errors in rainfall measurements using a new type of gauge. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 98-99, n. 1, p. 341-348, 1999.

SENTELHAS, P.S.; CARAMORI, P.H. Inconsistências na medida da chuva com pluviômetros de balança, utilizados em estações meteorológicas automáticas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 10, n. 2, p. 301-304, 2002.

SOUZA, J.L.M. **Modelo de análise de risco econômico aplicado ao planejamento de projetos de irrigação para cultura do cafeeiro**. Piracicaba, 2001. 253 f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo.

SOUZA, J.L.M.; GOMES, S. Avaliação e desempenho das equações de estimativa do armazenamento de água no solo em um balanço hídrico climatológico decendial irrigacionista. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 29, n. 4, p. 433, 2007

SOUZA, J.L.M.; GOMES, S. Limites na utilização de um modelo de balanço hídrico decendial em função da capacidade de água disponível no solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 30, n. 2, p. 153-163, 2008.

SOUZA, J.L.M. **Programa MORETTI – Módulo: Balanço hídrico climatológico decendial irrigacionista, versão 2.0**. Curitiba: DSEA/SCA/UFPR, 2005 (Programa computacional) – Disponível em: <http://www.moretti.agrarias.ufpr.br/>. Acessado em 15/01/2009.

SOUZA, J.L.M. **Programa MORETTI – Módulo: Balanço hídrico seqüencial (periodicidade: 1, 5, 7, 10, 15 e 30 dias), versão 1.0**. Curitiba: DSEA/SCA/UFPR, 2008 (Programa computacional) – Disponível em: <http://www.moretti.agrarias.ufpr.br/>. Acessado em 15/01/2009.

SOUZA, J.L.M. **Programa MORETTI – Módulo: Estimativa da série diária e decendial da evapotranspiração de referencia (ETo) com o método THORNTHWAITE (1948)**. Versão 1.0. Curitiba: DSEA/SCA/UFPR, 2007 (Programa computacional) – Disponível em: <http://www.moretti.agrarias.ufpr.br/>. Acessado em 15/01/2009.

SOUZA, J.L.M.; VILLA NOVA, N.A.; CASTRO NETO, P. Avaliação do efeito da energia advectiva na estimativa da evapotranspiração de referência para a região de Lavras/MG. **Revista do Setor de Ciências Agrárias**, v. 13, n. 1-2, p. 41-47, 1994.

SYPERRECK, V.L.G. **Avaliação de desempenho de modelos para estimativas de evapotranspiração de referência para a região de Palotina, Paraná**. Marechal Cândido Rondon, 2006. 51f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná.

THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical review**, v. 38, n. 1. p. 55-94, 1948.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R.; **The water balance**. Drexel Institute of Technology – Laboratory of Climatology, Publications in Climatology, Centerton, N.J. v. 8, n. 1, 104p., 1955.

TUBELIS, A.; NASCIMENTO, F. J. L. **Meteorologia descritiva: fundamentos e aplicações Brasileiras**. São Paulo: Nobel, 1986. 373 p.

TUCCI, C.E.M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed., Porto Alegre: UFRGS – Editora da Universidade, 1997, 943p

UFRPE – UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO. **Pluviômetros de PET são usados em morros**. Recife: UFRPE. Publicado em 09/08/2008. Disponível em: <[http://www.ufrpe.br/ruralnamidia\\_ver.php?idConteudo=2878](http://www.ufrpe.br/ruralnamidia_ver.php?idConteudo=2878)>. Acessado em 20/03/2009.

WILLMOTT, C.J.; ROWE, C.M.; MINTZ, Y. Climatology of terrestrial seasonal water cycle. **Journal of Climatology**, v. 5, p. 589-606, 1985.

WMO – WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Guide to meteorological instruments and methods of observation**. 7 ed., Gênova: WMO, 2008. (WMO-Número 8)