

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA MEDIDA
POR LISÍMETRO DE PESAGEM E ESTIMADA POR
PENMAN-MONTEITH (FAO-56), NAS ESCALAS
MENSAL E DECENDIAL**

ALAILSON VENCESLAU SANTIAGO

Dissertação apresentada à Escola Superior de
Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de
São Paulo, para obtenção do título de Mestre
em Agronomia, Área de Concentração: Física
do Ambiente Agrícola.

P I R A C I C A B A
Estado de São Paulo - Brasil
Novembro - 2001

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA MEDIDA
POR LISÍMETRO DE PESAGEM E ESTIMADA POR
PENMAN-MONTEITH (FAO-56), NAS ESCALAS
MENSAL E DECENDIAL**

ALAILSON VENCESLAU SANTIAGO

Meteorologista

Orientador: Prof. Dr. **ANTONIO ROBERTO PEREIRA**

Dissertação apresentada à Escola Superior de
Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de
São Paulo, para obtenção do título de Mestre
em Agronomia, Área de Concentração: Física
do Ambiente Agrícola.

P I R A C I C A B A

Estado de São Paulo - Brasil

Novembro - 2001

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP

Santiago, Alailson Venceslau
Evapotranspiração de referência medida por lisímetro de pesagem e estimada por Penman-Monteith (FAO-56),
nas escalas mensal e decenal / Alailson Venceslau Santiago. -- Piracicaba, 2001.
37 p. : il.

Dissertação (mestrado) -- Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2001.
Bibliografia.

1. Evapotranspiração 2. Lisímetro 3. Meteorologia agrícola 4. Modelo Penman-Monteith I. Título

CDD 551.572

“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”

Para perceber na sua totalidade a beleza e a perfeição universal das obras de Deus, devemos reconhecer um certo progresso perpétuo e muito livre de todo o universo [...] No abismo dos seres adormecidos, restam sempre partes que ainda não foram despertadas ...

Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716)

Toda a nossa ciência, comparada com a realidade, é primitiva e infantil — e, no entanto, é a coisa mais preciosa que temos.

Albert Einstein (1879-1955)

Em seu encontro com a Natureza, a ciência invariavelmente provoca um sentimento de reverência e admiração. O próprio ato de compreender é uma celebração da união, da incorporação, ainda que numa escala muito modesta, à magnificência do Cosmos.

Carl Sagan (1934-1996)

*Ao Prof. **José de Lima Filho**, maior idealizador do ensino sem distância e da criação de “Novas Escolas” de Meteorologia no País; profissional que nunca se deixou abater, nem mesmo nos momentos de maiores adversidades (e não foram poucos), na sua busca contínua e incessante pelo sucesso do Profissional em Meteorologia, com quem tenho a honra de trabalhar e fazer parte do seu seletivo grupo de Amigos,*

OFEREÇO

*Aos meus pais, **Adorílio Venceslau** e **Edelvita Santiago**, e irmãos, **Antonia**, **Adenilton**, **Adeilton**, **Alailton**, **Adauberon** e **Marilene**, que tanto me apoiaram na conquista de mais essa vitória em nossas vidas,*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Deus, Fonte inesgotável de inspiração e sabedoria.

Ao Professor e Amigo Antonio Roberto Pereira, pela orientação, apoio e principalmente, pelo exemplo de integridade moral e conduta profissional.

Ao Professor Nilson Augusto Villa Nova, pelas sugestões dadas a este trabalho, bem como pelo exemplo de profissionalismo e dedicação a ESALQ/USP, onde mantém acesa a chama de *Luiz Queiroz*, no compromisso com a formação de novas gerações.

Aos Professores do LCE, em especial, Luiz Roberto Angelocci, Paulo César Sentelhas e Sérgio Oliveira Moraes, que complementaram mais um pouco a minha formação acadêmica, ética e profissional.

À Dra. Selma Regina Maggiotto, pela amizade, alegria e apoio incondicional, no tratamento e concessão dos dados, sem os quais não seria possível a realização desse trabalho.

Ao André Marin, meu mais novo colega, que sempre com um sorriso fácil e sincero, prova a cada dia que viemos ao mundo para sermos felizes. A quem eu desejo todo o sucesso, alegria e paz celestial.

Aos novos amigos, Evandro Zanini Righi, Fábio Ricardo Marin, Rafael Ferreira da Costa, José Ricardo Pezzopane, Angélica Prael, Luciano Quaglia, Rogério Cichota, José Eduardo Monteiro, Hiroshi Yoshizane, Gilberto Oliveira, Héinton Pandorfi, Soraia Vanessa Matarazzo, Cristiane Guiselini, Késia Oliveira da Silva, Luciana Gomes Castro, Guadalupe Belquior, Melania Inês Valiati, Emerson Galvani, Cláudia Fernanda Teixeira, Karen Mattos, Luiz Fernando Campeche, Quelmo Silva Novaes, Jeane Cruz

Portela, Jean Dalmo de Oliveira Marques, Maurício Coelho Filho e Juan Rojas, pela convivência agradável e incentivo em todas as fases desse trabalho.

Aos velhos amigos, Ednaldo Oliveira dos Santos, Sylvia Elaine Marques de Farias, José Luiz Cabral da Silva Júnior, José Francisco de Oliveira Junior, Welliam Chaves Monteiro da Silva, Rosa Maria Nascimento dos Santos, Gustavo Bastos Lyra, Josiclea Pereira Rogério, Tarciana Toledo Albuquerque, Hewlley Acioly Imbuzeiro, Nadjane da Silva, Fabiana Jankeyde, Alexandre Silva dos Santos, Givanildo de Gois, Evaldo de Paiva Lima, Andrea Sales Reis, Eduardo Jorge Araújo e Carlos Henrique Eça D'Almeida Rocha, pela motivação sempre presente nas horas que pareciam ser as mais difíceis.

Aos amigos da Vila PG, em especial, Antônio Maria das Chagas Pessoa, Winter Eric de Oliveira, Antônio Sampaio Baptista e Luiz Fernando Caldeira Ribeiro, pelos momentos agradáveis e apoio na manutenção da Vila de Pós-Graduação.

À CAPES, pela concessão da Bolsa de Estudos, sem a qual se tornaria muito difícil a realização desse Curso.

À CAVE/COSEAS/PCLQ, pela concessão de uma maravilhosa moradia e apoio durante a minha permanência na Cidade de Piracicaba.

Aos funcionários da Reitoria - UFAL, em especial, Marinês Silveira, Marineide Coelho, Aurinete Pimentel, Terezinha Lobo, Maria de Fátima e Elienai (PROPEP); Luciene e Jandira (DCF); Vania (DAA); e Ieda (PROEST), pela confiança em mim depositada.

Aos funcionários do LCE, em especial, Solange de Assis Paes Sabadin, Edivaldo Modesto de Abreu e Ana Maria da Silva Maia Michelin, pelo apoio técnico-institucional.

Aos demais que não foram citados, mas que direta ou indiretamente me ajudaram na realização desse trabalho.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	x
RESUMO	xi
SUMMARY	xiii
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Evapotranspiração e Cultura de Referência	3
2.2 Dispositivos de Medida <i>in situ</i> de ETo	5
2.3 Estimativa da ETo	6
3 MATERIAL E MÉTODOS	7
3.1 Caracterização da Área Experimental	7
3.2 Dados Meteorológicos	8
3.3 Período Analisado	10
3.4 Lisímetro de Pesagem e ETo	11
3.5 Estimativa de ETo por Penman-Monteith (FAO-56)	13
3.6 Tratamento e Análise dos Dados	16
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	18
4.1 Qualidade das Medidas Lisimétricas	18
4.2 Condições Climáticas Durante o Experimento	22
4.3 Comparações entre ETo Medido e Estimado	26
4.4 Estimativa de ETo com R_n Estimado	30
5 CONCLUSÕES	33
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	34

LISTA DE FIGURAS

	Página
1 Extrato do balanço hídrico climatológico mensal normal (1917/1999) de Piracicaba, SP, segundo Thornthwaite-Mather (CAD = 100 mm)	8
2 Desenho esquemático da estação meteorológica automática instalada na área experimental e do sistema de aquisição de dados CR10 Campbell Scientific, Inc.	9
3 Extrato do balanço hídrico climatológico decenal e distribuição das chuvas durante 1996, em Piracicaba, SP, indicando os dois períodos de medidas analisadas	10
4 Esquema de montagem do lisímetro de pesagem baseado em célula de carga	12
5 Variação da massa de um lisímetro de pesagem em relação à precipitação e à drenagem ocorrida no período de 02 a 04 de janeiro de 1996, apresentando valores irreais de ETo	19
6 Variação da massa de um lisímetro de pesagem em relação à precipitação e à drenagem ocorrida no período de 07 a 09 de janeiro de 1996, apresentando valores irreais de ETo	21
7 Velocidade do vento (média de 10 min) e a variação da massa do lisímetro de pesagem ao longo de um dia sem chuva	22

8	Temperatura média diária do ar ao longo do período de medidas lisimétricas (1996), em Piracicaba, SP	23
9	Radiação líquida total diária ao longo do período de medidas lisimétricas (1996), em Piracicaba, SP	23
10	Umidade relativa média diária ao longo do período de medidas lisimétricas (1996), em Piracicaba, SP	24
11	Velocidade do vento média diária ao longo do período de medidas lisimétricas (1996), em Piracicaba, SP	25
12	Variação sazonal da evapotranspiração diária medida durante os períodos analisados (1996), em Piracicaba, SP	25
13	Relação entre a ETo medida (lisímetro) e a estimada (P-M), na escala mensal, utilizando passo 1 (a e b) e passo 30 (c e d), para os dois períodos de 1996 em Piracicaba, SP	28
14	Relação entre a ETo medida (lisímetro) e a estimada (P-M), na escala decenal, utilizando passo 1 (a e b) e passo 10 (c e d), para os dois períodos de 1996 em Piracicaba, SP	30
15	Relação entre R_n total diário medido (saldo-radiômetro) e o calculado (boletim FAO-56), referente ao 1° período (a) e ao 2° período (b) de 1996 em Piracicaba, SP	31
16	Relação entre a ETo medida (lisímetro) e a estimada (P-M), nas escalas mensal (a e b) e decenal (c e d), referente aos dois períodos de 1996 em Piracicaba, SP	32

LISTA DE TABELAS

	Página
1 Resumo estatístico das comparações entre valores médios medidos (Y) e estimados (X) de ETo na escala mensal ($Y = b X$), durante 1996, em Piracicaba, SP	27
2 Resumo estatístico das comparações entre valores médios medidos (Y) e estimados (X) de ETo na escala decendial ($Y = b X$), durante 1996, em Piracicaba, SP	29

EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA MEDIDA POR LISÍMETRO DE PESAGEM E ESTIMADA POR PENMAN-MONTEITH (FAO-56), NAS ESCALAS MENSAL E DECENDIAL

Autor: ALAILSON VENCESLAU SANTIAGO

Orientador: Prof. ANTONIO ROBERTO PEREIRA

RESUMO

A evapotranspiração de referência (E_{To} , mm d^{-1}) foi medida por um lisímetro de pesagem acoplado a três células de carga, durante 1996, em Piracicaba, SP. Discute-se as dificuldades operacionais encontradas com esse tipo de lisímetro em dias com chuvas intensas e em seqüência de dias com chuvas intermitentes. A série temporal dos valores medidos diariamente foi agrupada em seqüências de 10 ou 30 dias, gerando conjuntos de valores médios representativos dessas duas escalas de tempo. Média móvel com diversos passos foram usadas para aumentar o número de pontos nos conjuntos gerados e para verificar seus efeitos sobre as relações estatísticas. Estimativas de E_{To} médio correspondentes aos intervalos de tempo das médias medidas foram obtidas com a equação de Penman-Monteith seguindo-se as parametrizações e procedimentos descritos no boletim FAO-56, usando dados meteorológicos de uma estação automatizada situada próxima ao lisímetro. A análise de regressão linear simples (Lisímetro = b Estimativa) mostrou as seguintes tendências estatística: 1) na escala de 30 dias, $Y = 1,0905 X \pm 0,212 \text{ mm d}^{-1}$, $r^2 = 0,9512$ de janeiro a junho; e $Y = 0,9622 X \pm 0,166 \text{ mm d}^{-1}$, $r^2 = 0,8249$ de agosto a novembro; 2) na escala de 10 dias, $Y = 1,0866 X \pm 0,332 \text{ mm d}^{-1}$, $r^2 = 0,9158$ de janeiro a junho; e $Y =$

$0,9573 X \pm 0,323 \text{ mm d}^{-1}$, $r^2 = 0,7729$ de agosto a novembro. Os diferentes passos não afetaram substancialmente o valor de b; mas, em geral, o erro médio da estimativa aumentou quando o passo aumentou, diminuindo o número de pontos comparados. Face às dificuldades de medir ETo em períodos chuvosos as relações obtidas no segundo período talvez expressem melhor o grau de ajuste das estimativas. A performance das estimativas não se alterou quando se substituiu o saldo de radiação medido por valor estimado usando os procedimentos FAO-56, simulando uma situação muito comum de ausência de medida desse elemento meteorológico.

**REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION MEASURED WITH A WEIGHING
LYSIMETER AND ESTIMATED BY PENMAN-MONTEITH (FAO-56)
ON A MONTH AND TEN-DAYS TIME SCALES**

Author: ALAILSON VENCESLAU SANTIAGO

Adviser: Prof. ANTONIO ROBERTO PEREIRA

SUMMARY

Reference evapotranspiration (E_{To} , mm d^{-1}) was measured by a weighing lysimeter coupled with three load cells, during 1996, in Piracicaba, SP, Brazil. Operational difficulties with this kind of lysimeter during days with high intensity rainfall and also during a sequence of days with intermittent rains are discussed. The time series of measured E_{To} was pooled in sequences of either 10 or 30 days generating groups of mean values for such time scales. Moving averages with different steps were used to increase the number of points in each group and to test their effect upon the statistical relationships. Estimatives of mean E_{To} corresponding to the time intervals of the measured averages were computed with the Penman-Monteith equation following the parameterizations and procedures described in the FAO Irrigation and Drainage Paper 56, using data given by an automatic meteorological weather station located next to the lysimeter. Simple linear regression analysis ($\text{Lysimeter} = b \text{ Estimative}$) indicates the following statistical tendencies: 1) for the 30-days time scale, $Y = 1.0905 X \pm 0.212 \text{ mm d}^{-1}$, $r^2 = 0.9512$ from january to june; and $Y = 0.9622 X \pm 0.166 \text{ mm d}^{-1}$, $r^2 = 0.8249$ from august to november; 2) for the 10-days time scale, $Y = 1.0866 X \pm 0.332 \text{ mm d}^{-1}$, r^2

= 0.9158 from january to june; e $Y = 0.9573 X \pm 0.323 \text{ mm d}^{-1}$, $r^2 = 0.7729$ from august to november. The different time steps did not affect substantially the b value; but, in general, as the time step increased so did the mean error of the estimative due to the decrease in the number of points compared. Due to the operational difficulties in measuring ETo during periods of high intensity rains perhaps the relationships found for the second period represents better the degree of fit of the estimatives. The performance of the ETo estimatives did not change substantially when the measured net radiation was substituted by an estimative using the FAO-56 guidelines, simulating a very common situation of lack of such weather element.

1 INTRODUÇÃO

Na tentativa de suprir a falta perene de alimentos para uma população crescente, a agricultura se vê compelida a usar a maior área possível de solo agricultável, impulsionando o uso da irrigação nos sistemas agro-pastoris. Sistemas esses que têm como fatores determinantes do seu potencial de produtividade os ritmos da disponibilidade de energia e água da região na qual estão inseridos. Os recursos hídricos estão cada vez mais escassos havendo iminente competição entre seu uso direto no cotidiano urbano e sua aplicação agrícola para gerar alimentos em áreas e épocas com deficiência de chuvas. Estima-se que mais de 50% da população mundial depende de produtos agrícolas irrigados (Lima et al., 1999).

Tornou-se absolutamente necessário o planejamento mais eficaz do aproveitamento da água na produção agrícola, bem como o desenvolvimento de metodologias que permitam estimar volumes cada vez mais exatos de água necessária para obtenção de ótimas produções dos cultivos. Para isso, o ponto crucial é a quantificação correta da evapotranspiração (ET) das áreas cultivadas.

A evapotranspiração apesar de simples do ponto de vista teórico é complexa e difícil quando se refere ao lado prático das medições a campo não só quanto à variabilidade espacial mas também quanto às dificuldades operacionais. Mesmo usando lisímetros de pesagem, acoplados a sistemas modernos de aquisição de dados, alguns problemas operacionais dificultam sua instalação em larga escala, restringindo seu uso às instituições de pesquisa, tornando-os padrão comparativo para teste de equações e modelos de estimativas. Inúmeros são os métodos de estimativa da ET, sendo que muitos deles têm aceitação quase que unânime, enquanto outros são bastante criticados e até desprezados (Pereira et al., 1997).

Tentando minimizar essas divergências de aplicação prática, um estudo da American Society of Civil Engineers, relatado por Jensen et al. (1990) e Smith et al.

(1996), analisou a performance de 20 métodos para estimar a ET em condições padronizadas, que comparados com dados de 11 lisímetros em locais com condições climáticas diversas, mostrou a superioridade do modelo de Penman-Monteith tanto para regiões áridas como úmidas. No entanto, nenhum resultado de experimento brasileiro foi considerado nesse estudo norte-americano, embora seja significativa nossa contribuição nessa área de pesquisa.

Paralelamente, em maio de 1990, a Food and Agriculture Organization (FAO), da Organização das Nações Unidas, organizou uma consulta a um grupo de especialistas para rever o seu boletim “Estudos FAO Irrigação e Drenagem 24” (Doorenbos & Pruitt, 1977) a fim de avaliar novos procedimentos para estimativa da ET. O painel de especialistas recomendou unanimemente a adoção do modelo de Penman-Monteith como novo padrão para a estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o), mesmo para locais com deficiência de dados meteorológicos necessários ao seu uso, fornecendo procedimentos e parametrizações adequadas a diversas escalas de tempo (diária, decendial, e mensal). Aquele comitê solicitou que se fizessem testes em outras regiões para verificar a adequação de sua proposta. Tal solicitação foi parcialmente atendida visto que são inúmeros os testes realizados em condições brasileiras, mas apenas na escala diária de medida e estimativa. Foi encontrado apenas o relato de Peres et al. (1995) em que foram utilizadas as escalas decendial e mensal de estimativa de ET_o pelo método de Penman-Monteith, mas utilizando medidas de lisímetros de drenagem.

Diante do exposto, o presente trabalho tem por objetivo estudar o desempenho do modelo de Penman-Monteith, seguindo as parametrizações propostas pelo boletim FAO-56 para estimativa da ET_o nas escalas decendial e mensal (Allen et al., 1998), comparando-as com medidas em lisímetro de pesagem automática. Objetiva-se também verificar o efeito de se usar as parametrizações indicadas para estimativa do saldo de radiação simulando a situação de locais com dados meteorológicos incompletos. Outro aspecto também aqui abordado é a dificuldade de operação do lisímetro de pesagem em épocas chuvosas, condição freqüente nas épocas tradicionais de cultivo no sudeste brasileiro.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Evapotranspiração e Cultura de Referência

Segundo Camargo & Camargo (2000), nos anos 40 do século passado, C. W. Thornthwaite utilizou o termo evapotranspiração potencial (ETp) para expressar a ocorrência simultânea dos processos de transpiração e evaporação de um extenso gramado (superfície padrão de posto meteorológico), sem restrição hídrica, e em crescimento ativo. Penman (1956) também adotou essa definição de ETp. Assim definida ela representa um elemento climatológico que se contrapõe à chuva para expressar a disponibilidade hídrica regional. Teoricamente, ela seria a chuva adequada para que não houvesse deficiência de água no local.

Em 1975, o boletim 24 da FAO (Doorenbos & Pruitt, 1977) utilizou o conceito de ETp tomando-a como referência para estimar as necessidades hídricas das culturas, explicitando que a grama deve ter entre 0,08 e 0,15 m de altura para melhor caracterizar a superfície foliar transpirante. A adoção desse boletim pela comunidade irrigante consagrou o termo evapotranspiração de referência (ETo) introduzido por Jensen et al. (1971).

Recentemente, Allen et al. (1998) redefiniu ETo como sendo aquela de um gramado hipotético, com altura de 0,12 m, albedo igual a 0,23, e resistência da superfície ao transporte de vapor d'água igual a 70 s m^{-1} . Um gramado nessas condições possui índice de área foliar (IAF) ao redor de 3 m^2 de área foliar por m^2 de terreno ocupado e assemelha-se a uma superfície verde sombreando totalmente o solo, bem suprida de umidade, e em crescimento ativo.

No Brasil predomina o uso da grama batatais (*Paspalum notatum* Flüggé), conhecida como grama forquilha ou "bahia grass", sendo também adotada como vegetação padrão nos postos agrometeorológicos. Originária das Américas do Sul e Central, essa gramínea apresenta a vantagem de adaptar-se bem a quase todo tipo de

solo, crescendo vigorosamente naqueles com boa fertilidade e umidade, mas com aspectos xeromórficos nos solos pobres e sob condições de seca. Seu estabelecimento é rápido, podendo chegar até 0,25 m de altura, dependendo das condições edafo-climáticas. Segundo Alcântara e Bufarah (1982), essa gramínea é considerada planta colonizadora, pois aparece em qualquer região, desde o nível do mar até altitudes em torno de 2500 m, sob condições mais drásticas que não foram suportadas por outras gramíneas. Apresenta também boa resistência ao pisoteio, ao fogo e a geada facilitando seu uso em posto meteorológico em diversos tipos de clima.

A grama batatais, como a maioria das gramíneas tropicais, tem maior crescimento a temperaturas entre 30 e 35°C, e praticamente cessa a temperaturas inferiores a 15°C (Ramos, 1997). Nas condições climáticas do Estado de São Paulo, Alcântara et al. (1993), citado por Ramos (1997), verificaram que para 32 tipos de forrageiras o crescimento era praticamente nulo nos locais onde a temperatura mínima do ar registrada durante o mês mais frio era menor que 10°C. Essa diminuição da atividade fisiológica da grama, em períodos frios aumenta o número de folhas secas em relação às verdes, diminuindo o IAF, afetando significativamente a ETo (Campeche, 1997) descaracterizando as condições definidas para evapotranspiração potencial.

Segundo Camargo (1962), a grama batatais se mantém verde e turgesciente o ano todo, desde que não haja deficiência de umidade no solo, não sendo facilmente dominada por plantas invasoras, cobrindo bem e uniformemente o terreno.

Em algumas regiões dos Estados Unidos da América do Norte utiliza-se como cultura de referência um campo com 100 a 200 m de extensão lateral, cultivado com alfafa (*Medicago sativa* L.), mantida entre 0,3 e 0,5 m de altura, e bem irrigada (Jensen et al., 1971; Jensen, 1973). Argumenta-se que essa cultura se parece mais com outras culturas do que um gramado, tanto no aspecto de interação aerodinâmica com a atmosfera (rugosidade) como na absorção de energia solar (albedo). No entanto, talvez em função da grama ser a cobertura vegetal padrão dos postos meteorológicos e da quantidade de experimentos já realizados com gramados a alfafa não foi adotada como padrão internacional.

2.2 Dispositivos de Medida *in situ* de ETo

Segundo Pereira et al. (1997), a medida direta *in situ* de evapotranspiração é extremamente difícil e onerosa. Difícil devido à exigência de instalações e equipamentos especiais; e onerosa porque tais estruturas são de alto custo, justificando-se apenas em condições experimentais. Gangopadhyaya et al. (1966) foram pioneiros em apresentar ampla revisão sobre técnicas e equipamentos utilizados na medida da evapotranspiração. Posteriormente, Aboukhaled et al. (1982) e Allen et al. (1991a) apresentaram também extensa revisão de diversos tipos de lisímetros destacando como mais precisos os de pesagem, que determinam diretamente a ET pela variação da massa de um volume de solo vegetado e confinado por paredes impermeáveis durante um intervalo de tempo. Dependendo da sensibilidade da balança pode-se medir a ET em intervalos de tempo inferiores a um dia.

Mais recentemente, a variação da massa do lisímetro tem sido medida por células de carga que alteram uma corrente variando sua resistência em função de microdeformação causada pela variação da massa sustentada. Para Silva (1996), a acurácia desses sistemas depende das características da célula de carga e do sistema de armazenamento/processamento de dados. A microeletrônica deu grande impulso no que tange aos sistemas de aquisição e armazenamento de dados, e novos materiais têm sido utilizados na construção das células de cargas tornando-as cada vez mais sensíveis. Howell et al. (1991) indicam que a exatidão de um lisímetro depende da resolução, que é o número de casas decimais da mensuração; da precisão, que é a estabilidade da mensuração; e da acurácia, que é a diferença entre valor mensurado e o valor verdadeiro.

Camargo (1962), Pruitt & Lourence (1985) e Allen et al. (1991b) alertam para alguns cuidados básicos a serem adotados na instalação e manejo de um lisímetro, que são determinantes da representatividade das medidas. Entre eles destaca-se o problema de se manter idênticas as condições dentro e fora do lisímetro para se evitar os efeitos oásis (área úmida circundada por área seca) e buquê (plantas maiores dentro do lisímetro). Visualmente, a presença do lisímetro deve ser pouco perceptível para que tais efeitos se minimizem.

2.3 Estimativa da ETo

Devido à complexidade e ao alto custo dos dispositivos de medidas da ETo, inúmeros são os métodos de estimativa, bem como, farta é a disponibilidade de textos sobre o assunto entre os quais destacam-se Gangopadhyaya et al. (1966), Penman et al. (1967), Jensen (1973), Jensen et al. (1990), Doorenbos & Pruitt (1977), Berlato & Molion (1981), Brutsaert (1982), Villa Nova & Reichardt (1989), Camargo & Sentelhas (1997), Pereira et al. (1997), Medeiros (1998) e Allen et al. (1998).

De acordo com os princípios envolvidos em seu desenvolvimento, Pereira et al. (1997) divide os métodos de estimativa da evapotranspiração em cinco categorias: (i) empíricos; (ii) aerodinâmicos; (iii) balanço de energia; (iv) combinados; e, (v) correlação dos turbilhões (vórtices). Inúmeros são os trabalhos relatando testes dos diferentes métodos. O método de Penman-Monteith, objeto deste estudo, é do tipo combinado, sendo que o boletim “Estudo FAO Irrigação e Drenagem 56” (Allen et al., 1998), descreve passo a passo a seqüência de cálculos intermediários da estimativa de ETo, bem como as parametrizações utilizadas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da Área Experimental

O experimento foi realizado na Área Experimental de Irrigação da Fazenda Areão, do Departamento de Engenharia Rural, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo (USP), situada no município de Piracicaba, SP, nas seguintes coordenadas geográficas: 22° 42' de latitude Sul; 47° 30' de longitude Oeste; e a 546 m de altitude média. O clima da região de Piracicaba, SP, é classificado como subtropical úmido, tipo **Cwa** no sistema de Köppen, com verão chuvoso e inverno seco. A média histórica das chuvas na região mostra que o período de outubro a março contribui com 977 mm de um total anual de 1257 mm (Sentelhas & Pereira, 2000). A temperatura média mensal varia de 24,8°C, em fevereiro, a 17,1°C, em julho, sendo 21,4°C a média anual. A Figura 1 mostra o extrato do balanço hídrico climatológico normal da região, segundo Camargo & Camargo (1993), evidenciando os períodos de deficiência (abril a outubro) e de excedente (novembro a março) hídrico para uma capacidade de água disponível no solo (CAD) igual a 100 mm.

As medidas a campo foram realizadas numa área de 3150 m² (35 x 90 m), cujo solo foi classificado como Terra Roxa Estruturada (Alfisol), com declividade média de 2,3%, e vegetada com grama batatais (*Paspalum notatum* Flüggé). A grama foi mantida com altura de 0,08 a 0,12 m por meio de cortes para simular as condições de superfície de referência. Os cortes dentro do lisímetro foram manuais com tesoura, e com cortador de grama na área fora do lisímetro. Irrigações freqüentes foram feitas com um sistema sub-superficial na área circundante ao lisímetro para se obter condições compatíveis com a definição de evapotranspiração potencial. Dentro do lisímetro a irrigação foi manual com regador e sempre na mesma data da irrigação externa.

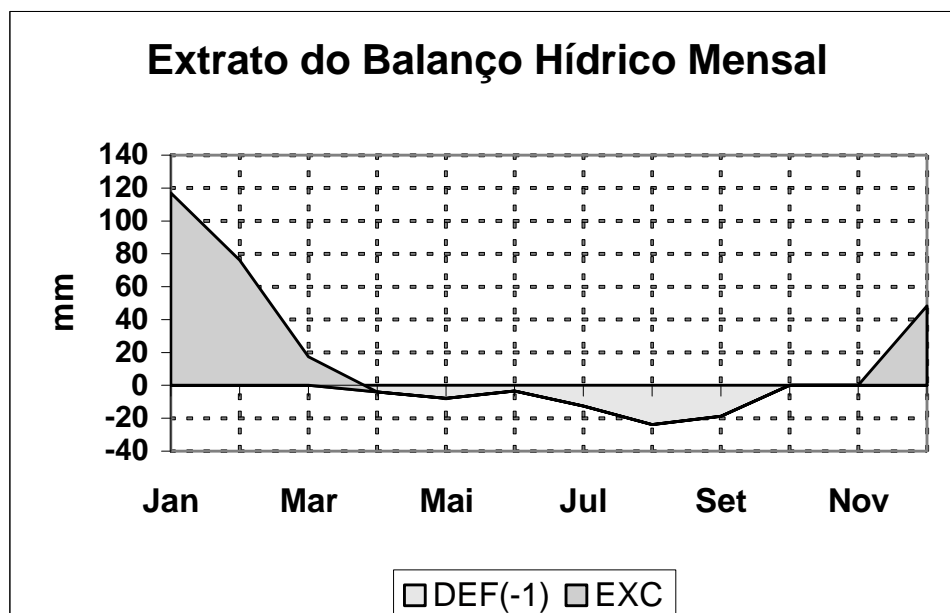


Figura 1 - Extrato do balanço hídrico climatológico mensal normal (1917/1999) de Piracicaba, SP, segundo Thornthwaite-Mather (CAD = 100 mm). Fonte: Sentelhas et al. (1999).

3.2 Dados Meteorológicos

Os elementos meteorológicos necessários para a estimativa de ETo pelo método de Penman-Monteith foram coletados por uma estação automatizada instalada na área experimental (Figura 2), e equipada com os seguintes sensores situados a 2 m acima do solo gramado quando não especificada a altura de medida:

- ✓ Velocidade do vento (Model 014A Wind Speed Sensor, Met One Instruments; limiar de medida = $0,45 \text{ m s}^{-1}$);
- ✓ Temperatura e umidade relativa do ar (Model HMP35C Temperature and Relative Humidity Probe, Vaisala, Inc.; exatidão: $T = \pm 0,1 \text{ }^\circ\text{C}$; UR = $\pm 3 \%$);
- ✓ Radiação líquida a 1 m acima do solo (Modelo Q7.1 Net Radiometer, REBS; espectro: 0,25 a $60 \mu\text{m}$);
- ✓ Chuva a 1,5 m acima do solo (Model TE525 Tipping Bucket, Weather Bureau; precisão = 0,1 mm).

Dentro do lisímetro foi instalado a 0,02 m de profundidade um sensor de densidade de fluxo de calor no solo (Model HFT-3 Soil Heat Flux Plate, REBS). A instalação do sensor próximo à superfície do solo foi para minimizar erros nas medidas causados por armazenamento de calor numa camada de solo muito espessa acima do sensor.

Todos os sensores foram conectados a um sistema de aquisição de dados (CR10, Campbell Scientific, Inc.), que armazenou valores médios a cada 30 min, a partir de medidas obtidas a cada segundo, iniciando-se a meia-noite.



Figura 2 - Desenho esquemático da estação meteorológica automática instalada na área experimental e do sistema de aquisição de dados CR10 Campbell Scientific, Inc. (Detalhe).

3.3 Período Analisado

Os dados experimentais foram obtidos entre janeiro e dezembro de 1996, e os períodos analisados são indicados na Figura 3, que ilustra o balanço hídrico climatológico decendial de 1996, utilizado para caracterização da condição de disponibilidade hídrica regional (CAD = 100 mm). Houve um breve período de deficiência hídrica no fim de janeiro, seguido pelos meses de março a junho (1º período). Enquanto que no 2º período, apenas o mês de agosto apresentou-se com essa condição.

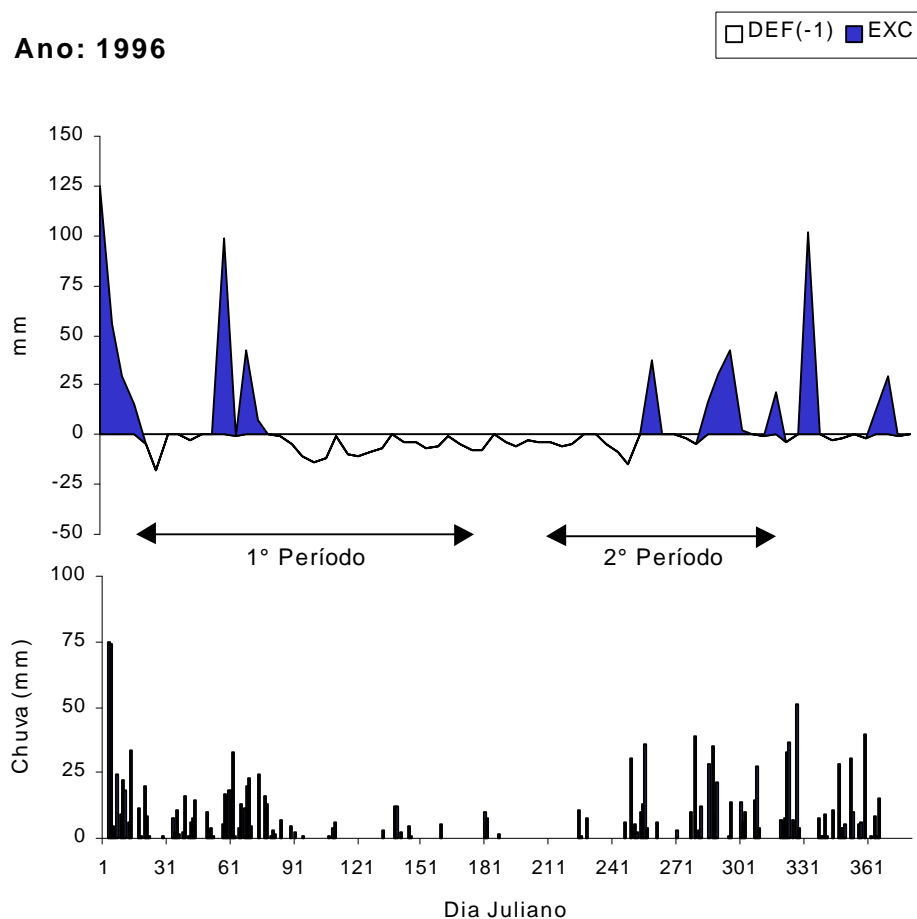


Figura 3 - Extrato do balanço hídrico climatológico decendial e distribuição das chuvas durante 1996, em Piracicaba, SP, indicando os dois períodos de medidas analisadas.

3.4 Lisímetro de Pesagem e ETo

O lisímetro de pesagem utilizado está descrito em Silva et al. (1999) e consistiu de um tanque interno de cimento-amianto retangular (1,20 x 0,85 x 0,65 m), que se apoiava sobre uma placa de compensado naval (1,25 x 0,90 x 0,03 m) de alta resistência mecânica e à umidade. Esse conjunto era sustentado por três pilares de concreto (0,30 x 0,15 m) em disposição triangular de modo a permitir distribuição equilibrada da massa. Em cada pilar havia uma célula de carga, e os pilares se apoiavam sobre uma placa de concreto armado (1,20 x 0,90 m) para evitar deslocamentos do conjunto lisimétrico por deformação do solo. As paredes laterais da trincheira cavada no solo para inserção do lisímetro foram protegidas por placas de compensado naval para evitar desmoronamento. No fundo da trincheira, acima da placa de concreto, havia uma camada de brita. Essa construção quase que impermeabilizava a trincheira aberta para a colocação do lisímetro, pois dificultava a drenagem da água que possivelmente viesse a se acumular durante dias com chuvas intensas, podendo ser a causa de algumas dificuldades que foram encontradas na medida de ETo em dias com muita chuva. A Figura 4 ilustra com maiores detalhes o esquema de montagem do referido lisímetro de pesagem.

O solo retirado na abertura da trincheira foi usado para preencher a caixa de cimento-amianto, cuja borda ficava a 0,05 m acima da borda da trincheira para evitar entrada de água das chuvas por escoamento superficial. Manteve-se a mesma ordem do perfil de solo original dentro do lisímetro. Para permitir a drenagem controlada do excesso de umidade dentro do lisímetro foi utilizado um sistema de tubos plásticos (PVC) com diâmetro interno de 0,05 m em forma de U horizontalmente disposto sob uma camada de 0,1 m de pedra britada, e sobre esta uma fina camada de areia grossa. A drenagem por sucção era feita pela parte superior do lisímetro por um tubo vertical de mesmo diâmetro ligado ao tubo em U horizontal.

Cada célula de carga em forma de S (Omega Engineering, model LCCA-2K) possui capacidade de pesagem de até 910 kg, e precisão de 0,037 % da sua capacidade total. A célula de carga possui um *strain gauge* interno (transdutor), encapsulado por material resistente à corrosão, que varia sua resistência ao transporte de uma corrente elétrica em função da deformação longitudinal causada pela variação da massa sustentada. A célula de carga funciona com uma ponte de *Wheatstone* que

mede a diferença de potencial (mV) induzida pela variação da resistência da célula de carga. Portanto, medindo-se a variação na diferença de potencial do circuito elétrico pode-se avaliar a variação da massa causadora da deformação.

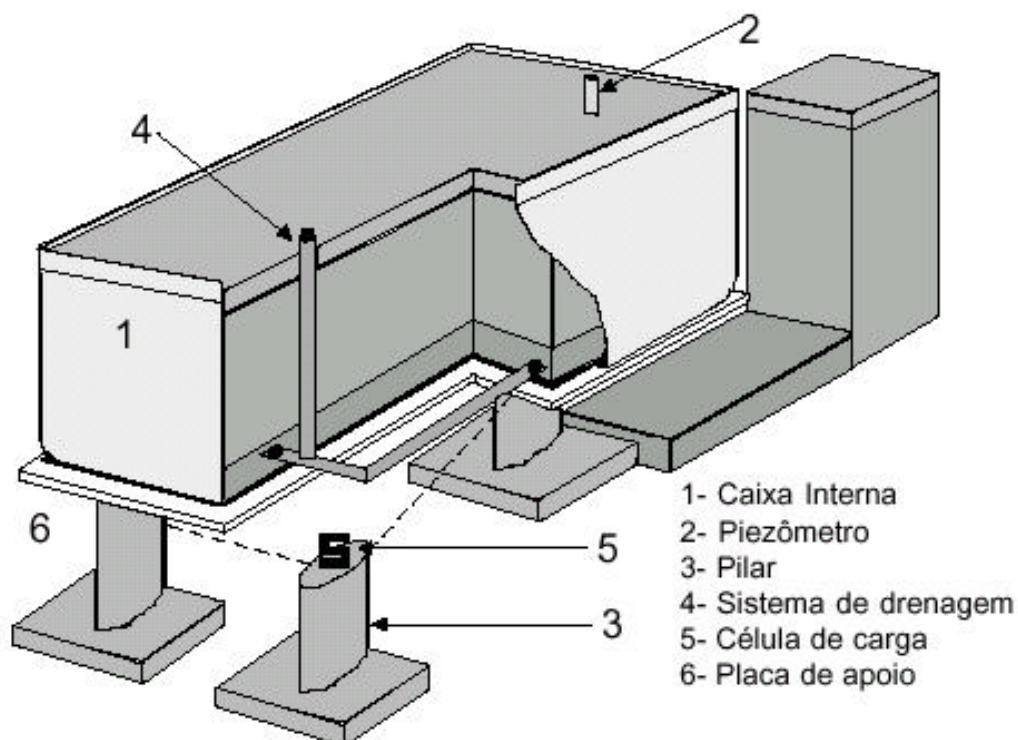


Figura 4 - Esquema de montagem do lisímetro de pesagem baseado em célula de carga. (Fonte: Silva et al., 1999).

Conforme recomendação de Camargo (1962), os primeiros resultados do lisímetro foram obtidos cerca de seis meses depois de sua instalação para permitir pleno crescimento da grama e acomodação do solo dentro do lisímetro. Para se determinar a evapotranspiração diretamente pelo lisímetro de pesagem utilizou-se um fator de correção que relacionou a variação da massa com a lâmina de água evapotranspirada. Como a área da superfície (boca) do lisímetro equivale a $0,92 \text{ m}^2$, uma variação negativa de massa igual a $0,92 \text{ kg}$ corresponde a evapotranspiração de 1 mm . Desta forma, foi aplicado como fator de correção o valor de $-0,92$, considerando-se a massa específica da água como constante e igual a $1,0 \text{ g cm}^{-3}$. Para a determinação da lâmina evapotranspirada durante um período calculou-se a diferença

entre a massa no início e no fim do período, dividindo-se pelo fator de correção (ET = variação de massa/0,92).

As três células de carga foram ligadas de acordo com as especificações do fabricante e os sinais resultantes monitorados e armazenados por um datalogger (CR10, Campbell Scientific, Inc.). No início (Dia 1 a 59) os valores obtidos a cada segundo geravam médias a cada 10 min de medidas. Posteriormente esse intervalo de integração foi ampliado para 30 min, conforme sugerido por Bergamaschi et al. (1997), amaciando-se as variações instantâneas causadas por abalos impostos pelo atrito do vento com a vegetação.

3.5 Estimativa de ETo por Penman-Monteith (FAO-56)

Segundo as parametrizações propostas pelo boletim FAO-56 (Allen, et al. 1998), a equação original de Penman-Monteith assume a seguinte forma para a evapotranspiração de referência:

$$ET_o = \frac{0,408 \ s \ (R_n - G) + g \frac{900}{T_{med} + 273} u_2 (e_s - e_a)}{s + g(1 + 0,34 \ u_2)} \quad (1)$$

sendo:

ET_o = Evapotranspiração de referência (mm d⁻¹);

R_n = Radiação líquida total do gramado (MJ m⁻² d⁻¹);

G = Densidade de fluxo de calor no solo (MJ m⁻² d⁻¹);

T_{med} = Temperatura média diária do ar a 2m de altura (°C);

U_2 = Velocidade do vento média diária a 2m de altura (m s⁻¹);

e_s = Pressão de saturação do vapor média diária (kPa);

e_a = Pressão atual de vapor média diária (kPa);

s = Declividade da curva de pressão de vapor no ponto de T_{med} (kPa °C⁻¹);

g = Coeficiente psicrométrico (kPa °C⁻¹).

A temperatura média diária (T_{med}) deve ser calculada em função das temperaturas máxima (T_{max}) e mínima (T_{min}) diárias como:

$$T_{med} = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} \quad (2)$$

mesmo em situações em que medidas horárias (ou mais freqüentes) sejam disponíveis. Essa regra serve também para as escalas de tempo maiores que um dia. Para decêndios ou meses utiliza-se a soma dos valores médios diários dividindo-se pelo número de dias do período.

A declividade da curva da pressão de vapor (s) em função da temperatura no ponto de T_{med} é definida como:

$$s = \frac{4098 \left[0,6108 \exp \left(\frac{17,27 T_{med}}{T_{med} + 237,3} \right) \right]}{(T_{med} + 237,3)^2} \quad (3)$$

O coeficiente psicrométrico (g) foi feito constante e igual a $0,0633 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$, pois ele é uma função da pressão atmosférica, que no local varia muito pouco ao longo do ano ($95,03 \text{ kPa}$ em Janeiro, e $95,7 \text{ kPa}$ em Julho), e também do calor latente de evaporação da água, que é fracamente afetado pela temperatura sendo recomendado um valor médio igual a $2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$.

A média diária do déficit de saturação de vapor d'água no ar ($e_s - e_a$), é calculada a partir das temperaturas máxima (T_{max}) e mínima (T_{min}), e das umidades relativa máxima (UR_{max}) e mínima (UR_{min}) diárias, ou seja:

$$e_s = \frac{e^\circ(T_{max}) + e^\circ(T_{min})}{2} \quad (4)$$

$$e_a = \frac{e^\circ(T_{min})UR_{max} + e^\circ(T_{max})UR_{min}}{200} \quad (5)$$

$$e^\circ(T) = 0,6108 \exp \left[\frac{17,27 T}{T + 237,3} \right] \quad (6)$$

sendo que na eq. (6), substitui-se T por T_{max} ou T_{min} , para se obter $e^{\circ}(T_{max})$ e $e^{\circ}(T_{min})$.

O fluxo de calor no solo (G) quase sempre é desprezado por apresentar um valor muito pequeno em relação a R_n na escala diária. Para períodos de 10 dias o boletim FAO-56 também recomenda $G = 0$. Na escala mensal, o seu cálculo deve obedecer a seguinte expressão:

$$G_{mês,i} = 0,07 (T_{mês,i+1} - T_{mês,i-1}) \quad (7)$$

caso a $T_{mês, i+1}$ seja desconhecido, utiliza-se a seguinte equação:

$$G_{mês,i} = 0,14 (T_{mês,i} - T_{mês,i-1}) \quad (8)$$

em que:

$T_{mês, i}$ = Média mensal da temperatura do ar para o mês i (°C);

$T_{mês, i-1}$ = Média mensal da temperatura do ar do mês anterior a i (°C);

$T_{mês, i+1}$ = Média mensal da temperatura do ar do mês posterior a i (°C).

Medidas rotineiras do saldo de radiação (R_n) tem se mostrado problemática em virtude da fragilidade do sensor, que inclui uma cúpula de plástico que se polimeriza com os raios solares e se fragmenta, causando erros sistemáticos nas medidas. Esse instrumento requer inspeção e troca freqüente dessa cúpula. Em postos agrometeorológicos a medida de R_n não é rotineira e o boletim FAO-56 recomenda que este elemento seja estimado pelas seguintes equações:

$$R_n = 0,77R_s - (0,34 - 0,14\sqrt{e_a})4,903 \cdot 10^{-9} \left(\frac{T_{max,k^4} + T_{min,k^4}}{2} \right) \left(1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (9)$$

$$R_s = R_a \left(a + b \frac{n}{N} \right) \quad (10)$$

$$R_{so} = R_a (a + b) \quad (11)$$

$$R_a = 37,586 \cdot d_r (w_s \text{ sen } f \text{ sen } d + \cos f \cos d \text{ sen } w_s) \quad (12)$$

$$d_r = 1 + 0,033 \cos \left(\frac{2pJ}{365} \right) \quad (13)$$

$$\mathbf{d} = 0,4093 \operatorname{sen} \left(\frac{2\mathbf{p}\mathbf{J}}{365} - 1,405 \right) \quad (14)$$

$$w_s = \cos^{-1}(-\tan \mathbf{f} \tan \mathbf{d}) \quad (15)$$

$$N = \frac{24w_s}{\mathbf{p}} \quad (16)$$

em que $\mathbf{a} = 0,26$ e $\mathbf{b} = 0,51$ são coeficientes locais (Ometto, 1981); \mathbf{n} é o número de horas de brilho solar medido por heliógrafo (Campbell-Stokes, R. Fuess); \mathbf{f} é a latitude local, igual a $-0,3962$ rad; \mathbf{J} é o dia Juliano; $T_{max,k}$ e $T_{min,k}$ representam as temperaturas máxima e mínima absolutas.

3.6 Tratamento e Análise dos Dados

Antes de submeter os dados experimentais a uma análise estatística e comparativa eles foram tratados objetivando-se detectar e filtrar possíveis medidas discrepantes, visando obter um conjunto de dados realmente representativo da evapotranspiração de referência (ET_o) local. Essa filtragem foi possível em função de ET_o ter limites de variação bem definidos e impostos pela disponibilidade regional de energia, e sempre que um dia apresentava valores discrepantes sua causa foi investigada.

Verificou-se que os problemas ocorreram em dias com chuvas muito intensas e também em seqüências de dias com chuvas intermitentes. Alguns desses eventos foram selecionados para ilustrar as dificuldades operacionais de lisímetros de pesagem em regiões chuvosas. O descarte desses dias problemáticos fragmentou o ano em seqüências menores sendo possível selecionar um período de 151 dias antes e outro de 103 dias após o inverno. O período de inverno mais intenso foi descartado em função da grama ter reduzido bastante seu crescimento, descaracterizando a condição de evapotranspiração potencial.

Em função da redução do número de dados disponíveis para comparações, definiu-se mês como sendo uma seqüência de 30 dias consecutivos, independentes da data de seu início. Essa definição permitiu multiplicar o número de “meses” possíveis numa seqüência temporal curta de dados, pois um “mês” passou a diferir do seguinte

pela exclusão do primeiro dia da seqüência e a inclusão de um outro ao seu final. Essa técnica de média móvel permite que se altere o número de pontos excluídos (aqui definido como passo) na seqüência de 30 dias, gerando conjuntos de dados com passos diferentes. Deste modo pode-se analisar também o efeito de diferentes passos sobre as comparações entre valores medidos e estimados. Optou-se por trabalhar com conjuntos de dados gerados com passos iguais a 1, 5, 10, 15, e 30 dias. O caso extremo de passo com 30 dias difere da convenção de mês por ele poder começar em qualquer dia do mês e não no dia primeiro como no calendário em vigor. A mesma técnica de média móvel foi utilizada também na escala decendial, mas com passos iguais a 1, 2, 5, e 10 dias.

Após o tratamento dos dados, as médias dos valores medidos (Y) e estimados (X), nas duas escalas de tempo, foram comparadas e analisadas estatisticamente. Os gráficos de dispersão de pontos mostraram que a regressão linear simples ($Y = a + bX$) era suficiente para se avaliar a adequação das estimativas de ETo, calculando-se também o coeficiente de correlação (r^2) e o erro médio da estimativa, conforme sugerido por Allen et al. (1989).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Qualidade das Medidas Lisimétricas

Os avanços tecnológicos viabilizaram sistemas de pesagem (células de carga) mais precisos e mais sensíveis às pequenas variações de massa, sendo adequados a inúmeras aplicações cotidianas. Tais sistemas têm sido adaptados para medidas lisimétricas a campo e inúmeros são os relatos de resultados assim obtidos. No entanto, a maior sensibilidade dos sensores não implica necessariamente em melhor qualidade dos resultados, e este aspecto não tem sido abordado na análise dos resultados publicados. Frequentemente, os dias com ocorrência de chuvas são descartados das análises, mas um sistema tão sensível deve permitir medidas mesmo nesses dias, pois a chuva efetiva captada pelo lisímetro fica registrada pela coleta contínua de sua variação de massa, dispensando inclusive a medida da chuva em pluviômetro.

Em situações em que as chuvas são muito intensas ou muito prolongadas, o lisímetro, estando sempre com umidade próxima da capacidade de campo, chega a transbordar. Por si só esse fato não deveria causar problema na medida da variação de massa do lisímetro, mas na configuração do sistema aqui utilizado ele resulta em erro significativo na determinação da evapotranspiração, pois a água transbordada pode ficar armazenada entre a placa de compensado naval ($1,125 \text{ m}^2$) e o fundo da caixa de cimento-amianto. Essa caixa tem as bordas externas arredondadas e um recuo para dentro (concavidade) na parte inferior facilitando o acúmulo de água nessa câmara externa. Posteriormente essa água se evapora ou escorre representando uma saída de água que não estava dentro da caixa resultando em erro na medida de ETo.

Um exemplo desse tipo de situação pode ser visto na Figura 5, em que houve uma seqüência de três dias com chuvas intensas e intermitentes. No primeiro dia (Dia 2) houve um acúmulo de 79,76 kg resultante de uma chuva de 86,7 mm, que se iniciou

por volta das 4 horas da manhã e durou até as 19:30 horas. Daí em diante a massa do lisímetro permaneceu praticamente constante até por volta da meia-noite. Portanto, nesse dia a evapotranspiração foi muito pequena e não quantificável por esse sistema de medida. No início do próximo dia, a chuva recomeçou adicionando mais 9,41 kg (10,2 mm) até as 4:10 horas. Dessa hora até as 10:30 horas houve um decréscimo de 1,55 kg (1,7 mm), quando nova chuva acrescentou mais 2,87 kg (3,1 mm) até as 11 horas, com o lisímetro registrando 998,78 kg. Com a parada da chuva, a massa do lisímetro diminuiu 2,36 kg (2,6 mm) até as 13:30 horas. Com o retorno de outra chuva intensa, o sistema de drenagem foi acionado extraindo 79,7 kg em uma hora. Mesmo com a drenagem acionada, a chuva intensa acrescentou 20,35 kg em meia hora, e o lisímetro já encharcado não foi capaz de absorver tanta água em tão pouco tempo, havendo transbordamento. Às 15:30 horas o sistema de drenagem foi desligado e a chuva acrescentou mais 2,65 kg até as 16 horas.

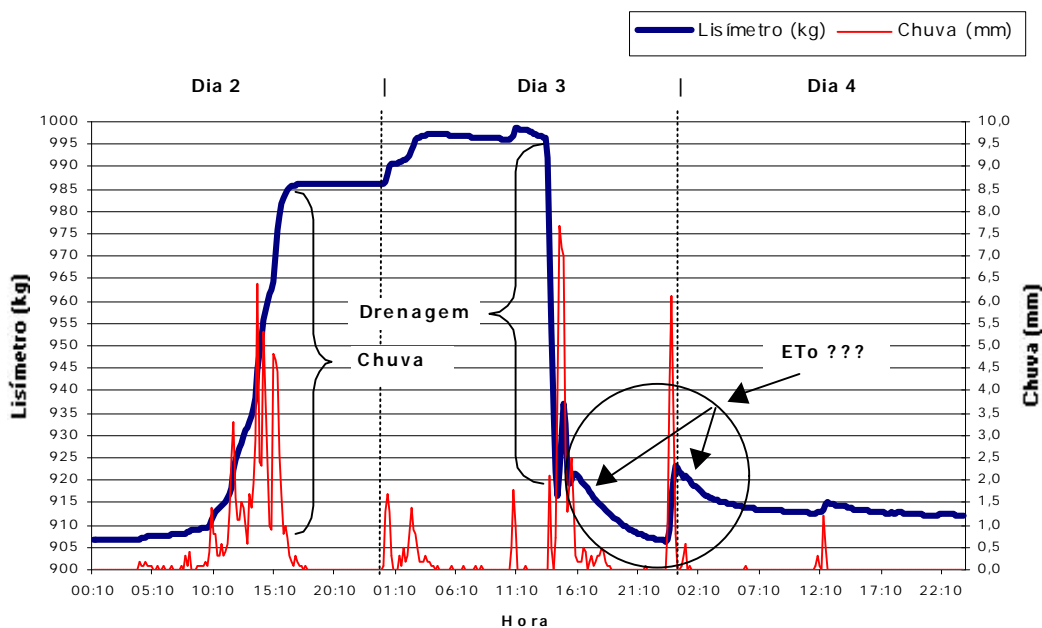


Figura 5 - Variação da massa de um lisímetro de pesagem em relação à precipitação e à drenagem ocorrida no período de 02 a 04 de janeiro de 1996, apresentando valores irrealistas de ETo (Detalhe).

Dessa hora até as 23:20 horas houve um decréscimo de 14,95 kg, equivalente a 16,3 mm. Essa perda de água não foi devido à evapotranspiração da grama no lisímetro, pois ela ocorreu no período noturno (Detalhe na Figura 5). Outra chuva de 17,9 mm acrescentou mais 16,45 kg em 50 min, mas desde o fim desta chuva até as 11:50 horas houve uma perda de 10,08 kg (11 mm), com uma taxa de perda semelhante ao período noturno anterior, e também não pode ser inteiramente atribuída à evapotranspiração.

Outro exemplo desse tipo de anomalia, agora em menores proporções, pode ser visto em outra seqüência de três dias com chuvas intermitentes (Figura 6). No primeiro dia (Dia 7) houve apenas um acúmulo de 6,78 kg resultante de uma chuva de 7,37 mm, que se iniciou as 14:50 horas e durou até as 17:30 horas, apresentando em seguida um leve decréscimo de 0,7 kg (0,76 mm) até o final da tarde (18:30 h). Daí em diante, a massa do lisímetro permaneceu praticamente constante até a manhã do dia seguinte (8:50 h), quando foi acionado o sistema de drenagem e extraído 20,44 kg em meia hora. Com o término da drenagem, a massa do lisímetro decresceu 2,11 kg (2,29 mm) por evapotranspiração até as 14:30 horas, quando foi notado a formação de fortes chuvas e acionado novamente o sistema de drenagem, extraíndo dessa vez 15,66 kg em meia hora. Mesmo com a drenagem ainda acionada, a chuva intensa acrescentou 4,55 kg (4,95 mm) em vinte minutos. Às 16:00 horas o sistema de drenagem foi desligado e a chuva forte acrescentou mais 25,03 kg até as 16:40 horas, fazendo com que o lisímetro, já encharcado, não fosse capaz de absorver tanta água em um intervalo de tempo tão pequeno, havendo transbordamento. Desse instante até as 23:50 horas, houve um decréscimo de 13,29 kg (14,44 mm). Assim como no exemplo anterior, ficou evidente que essa perda de água não foi devido à evapotranspiração da grama no lisímetro já que a mesma ocorreu no período noturno (Detalhe na Figura 6). Outra chuva de 12,73 mm acrescentou mais 11,72 kg em 90 min, e desde o fim desta até as 8:20 horas houve uma perda de 8,17 kg (8,88 mm), com uma taxa de perda semelhante ao período noturno anterior, e que também não pode ser inteiramente atribuída à evapotranspiração. Essa seqüência de dias com chuvas intensas e intermitentes enfatiza as dificuldades de medida da evapotranspiração de referência em período chuvoso, mesmo com lisímetro de pesagem com registro eletrônico de sua variação de massa.

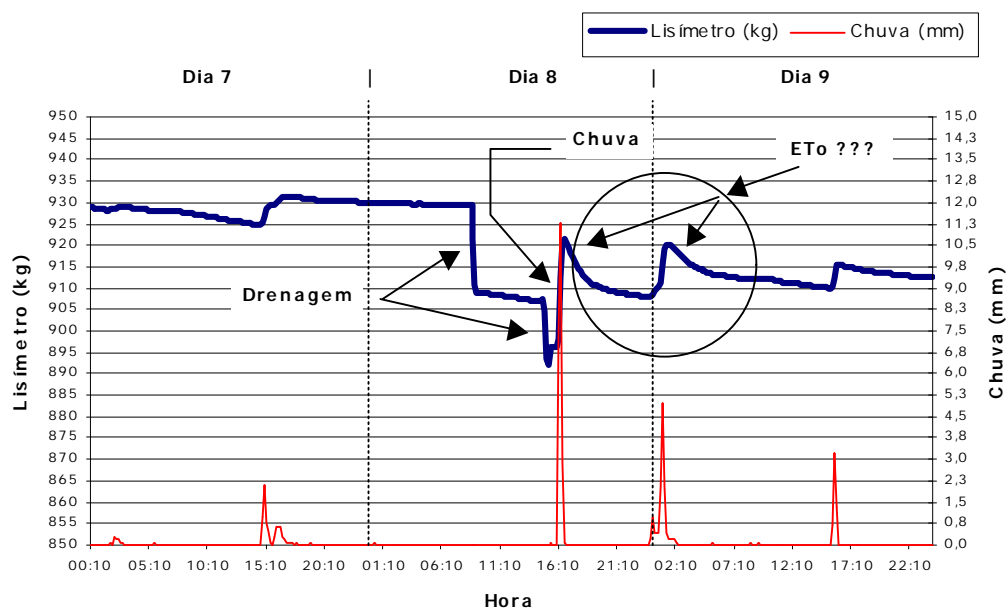


Figura 6 - Variação da massa de um lisímetro de pesagem em relação à precipitação e à drenagem ocorrida no período de 07 a 09 de janeiro de 1996, apresentando valores irrealis de ETo (Detalhe).

Outro tipo de anomalia que dificulta bastante a qualidade das medidas de ETo é o efeito da variação brusca da velocidade do vento, mesmo para dia sem chuvas. Quanto mais sensível for o sistema de pesagem maior será o efeito do arrasto provocado pelo vento, transferindo momento para a superfície com conseqüente oscilação na massa do sistema, mas sem que tenha realmente ocorrido saída ou entrada de água no lisímetro. Esse problema também foi detectado por Bergamaschi et al. (1997).

Um exemplo desse efeito pode ser visualizado na Figura 7 em que pequenas variações na velocidade do vento ao longo do dia resultaram em pequenas oscilações na massa do lisímetro, comprometendo as medidas de ETo para período inferiores a um dia.

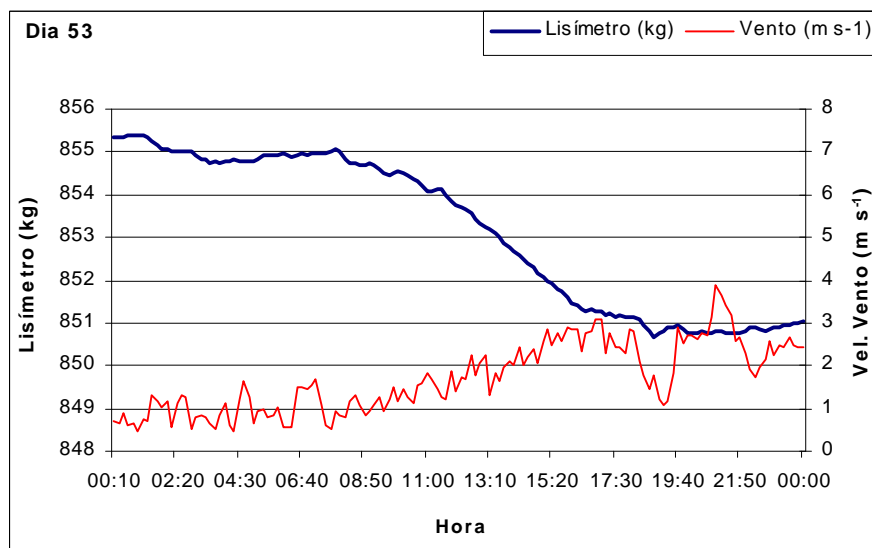


Figura 7- Velocidade do vento (média de 10 min) e a variação da massa do lisímetro de pesagem ao longo de um dia sem chuva.

4.2 Condições Climáticas Durante o Experimento

A variação sazonal da temperatura média diária do ar durante o período experimental é mostrada na Figura 8. No início do ano (primeiro período, dias 10 a 182), ela atingiu valor máximo próximo de 28°C nos dias 25, 29 e 30, enquanto seu valor mínimo (11,6°C) ocorreu no fim do período (dia 181). Houve decréscimo contínuo do início ao fim do período. No segundo período (dias 214 a 320), as temperaturas menores ocorreram no início com valor mínimo próximo de 15°C aumentando progressivamente até 26°C. As quedas bruscas observadas em algumas seqüências de dias nos dois períodos foram causadas por passagens de frentes frias.

Com relação a radiação líquida (R_n), sua tendência sazonal (Figura 9) foi semelhante àquela observada e descrita para a temperatura média diária. No entanto, a variação de R_n foi mais acentuada em virtude do maior efeito da nebulosidade sobre o balanço de radiação do que sobre a temperatura. No caso da temperatura a nebulosidade atua no sentido de amenizar as variações.

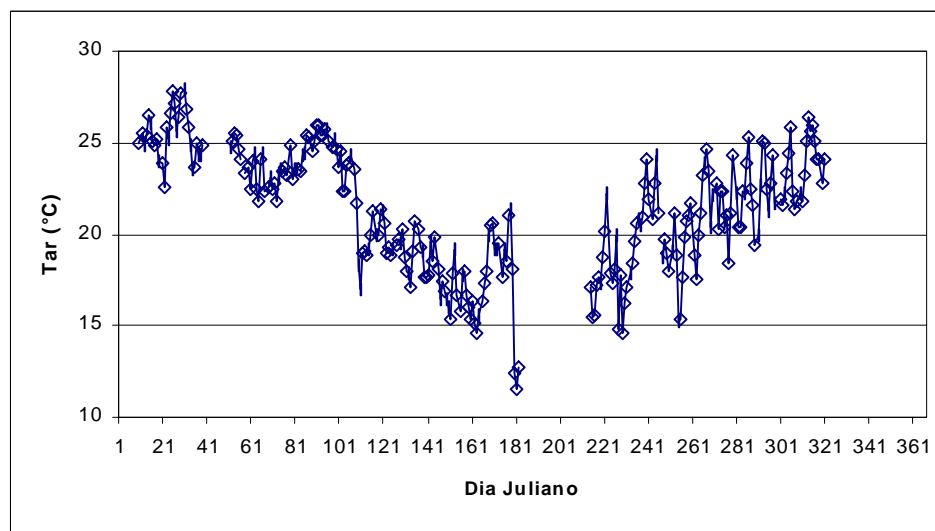


Figura 8 - Temperatura média diária do ar ao longo do período de medidas lisimétricas (1996), em Piracicaba, SP.

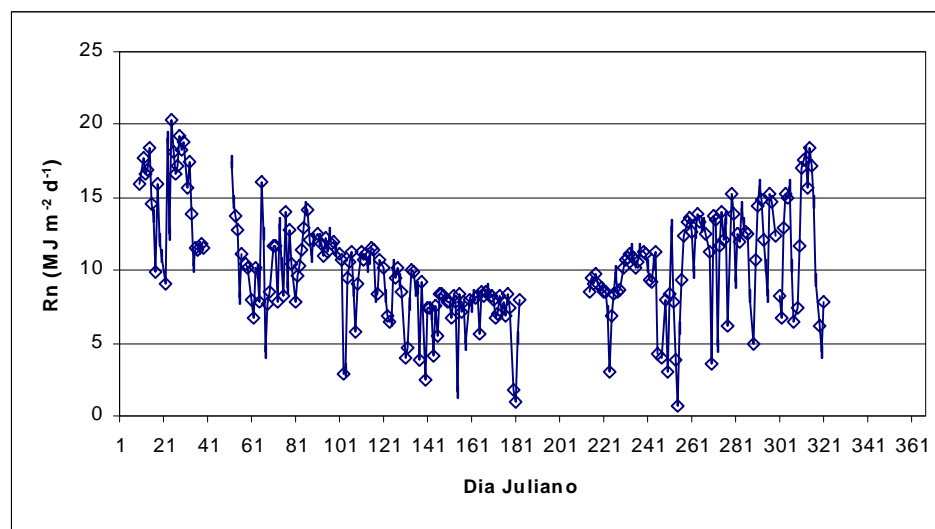


Figura 9 - Radiação líquida total diária ao longo do período de medidas lisimétricas (1996), em Piracicaba, SP.

A umidade relativa média diária (**UR**) ao longo do primeiro período variou entre 65% e 98%, com a maior parte dos dias se situando entre 75% e 85% (Figura 10). No segundo período o intervalo de variação foi maior não havendo uma tendência muito nítida, alternando seqüências de dias muito secos com dias muito úmidos.

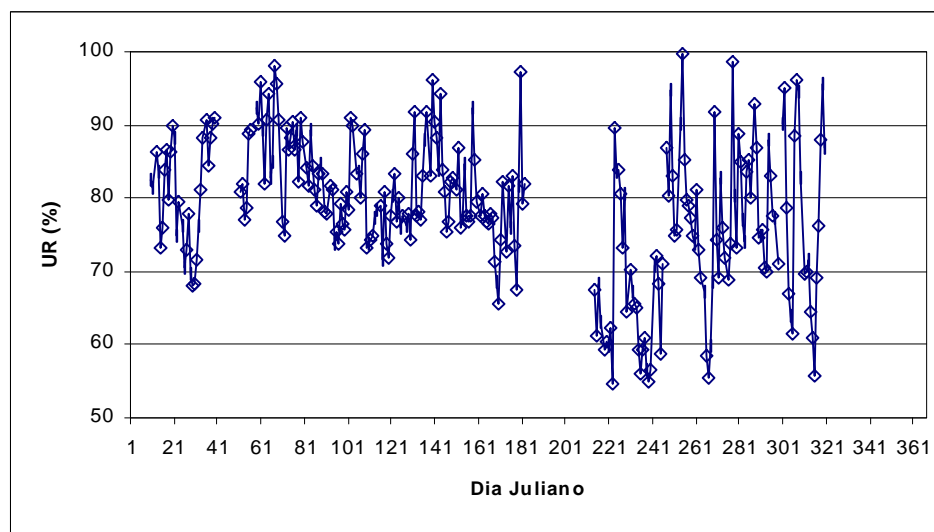


Figura 10 - Umidade relativa média diária ao longo do período de medidas lisimétricas (1996), em Piracicaba, SP.

A velocidade do vento média diária foi ligeiramente menor no primeiro ($1,53 \pm 0,42 \text{ m s}^{-1}$) do que no segundo ($2,04 \pm 0,53 \text{ m s}^{-1}$) período (Figura 11). No primeiro período a velocidade média esteve próxima de 3 m s^{-1} em apenas três dias, mas no segundo período cerca de 14 dias estiveram próximos deste valor.

Em síntese, tanto a temperatura média diária como a radiação líquida total diária apresentaram o padrão normal de variação imposto pela posição relativa Terra-Sol que afeta o suprimento de energia solar global na região. Quanto à umidade relativa e à velocidade média do vento as variações foram impostas pela ocorrência de eventos chuvosos e passagens de frentes frias pela região não havendo um caráter bem definido de suas frequências. Os valores aqui relatados são próximos da normal climatológica da região e descritos por Ometto (1991).

Com respeito à evapotranspiração do gramado, sendo ela resultante da interação dos elementos climáticos acima descrita, sua variação ao longo do ano seguiu a variação imposta pela disponibilidade de energia regional, que é ditada pelo ritmo de variação do saldo de radiação e da temperatura. No primeiro período o valor mínimo da evapotranspiração foi próximo a $1,0 \text{ mm d}^{-1}$ em vários dias, enquanto que o valor máximo foi igual a $8,0 \text{ mm d}^{-1}$ no final de janeiro. No segundo período o valor

mínimo foi próximo de 0 mm d^{-1} , num dia com R_n desprezível e alta umidade relativa do ar, e o valor máximo foi igual a $7,0 \text{ mm d}^{-1}$ (Figura 12).

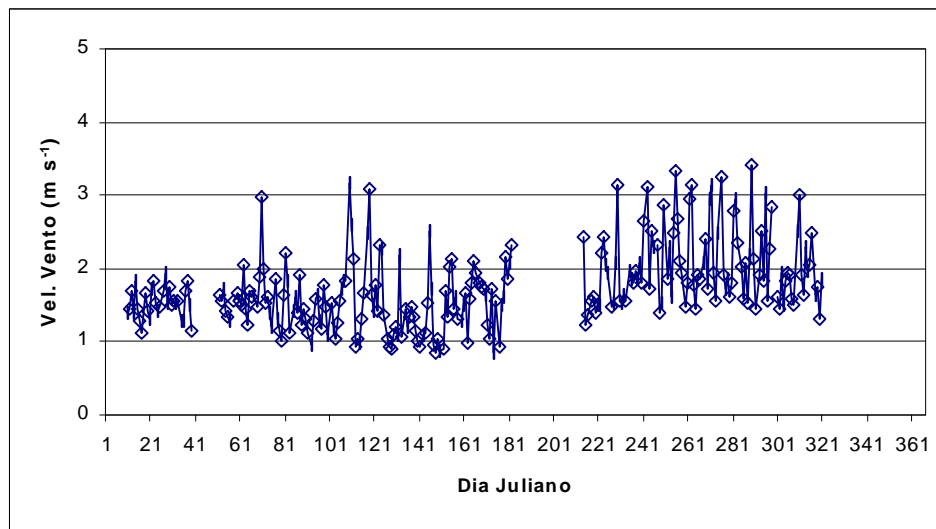


Figura 11 - Velocidade do vento média diária ao longo do período de medidas lisimétricas (1996), em Piracicaba, SP.

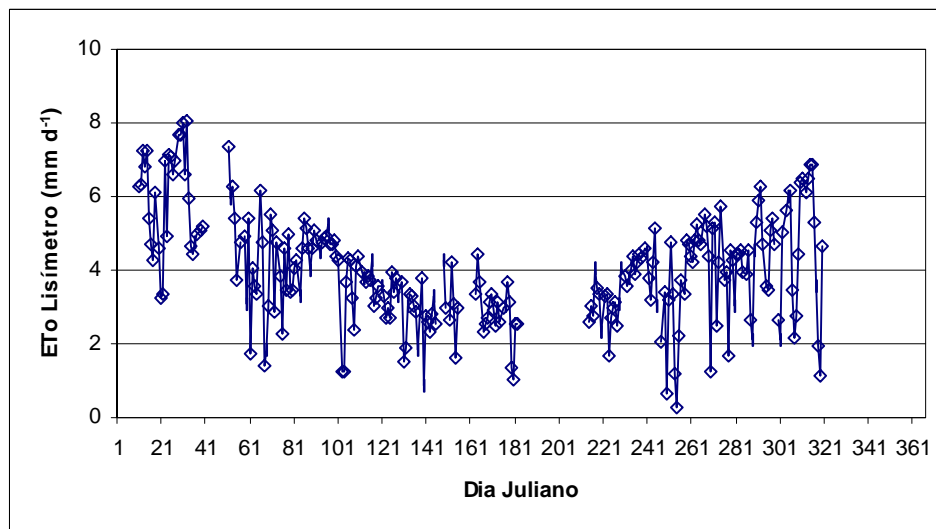


Figura 12 - Variação sazonal da evapotranspiração diária medida durante os períodos analisados (1996), em Piracicaba, SP.

4.3 Comparações entre ETo Medido e Estimado

Antes de se discutir os resultados obtidos para as estimativas de ETo é necessário que se enfatize a metodologia utilizada na definição das escalas de tempo (decencial e mensal), abordando suas vantagens e desvantagens. No caso da escala mensal, como havia apenas um ano de medidas lisimétricas, se for adotada a abordagem convencional em que se considera o calendário para definir mês, apenas 12 valores serão disponíveis para comparações. Considerando-se que no período de inverno a grama batatais não apresenta crescimento ativo, como requer a definição de ETo, o número de valores será menor ainda. Portanto, essa definição de mês restringe o número de pontos para comparações, sendo aqui considerada uma desvantagem.

Teoricamente, um modo de fazer melhor uso de uma série temporal curta de dados experimentais de difícil mensuração é a adoção de uma média móvel com diferentes passos, aumentando-se o número de pontos. Desse modo o mês fica definido como o período de 30 dias consecutivos, independente da data de seu início. Por exemplo, um período contínuo de 40 dias de observações permite que se faça 11 conjuntos seqüenciais de 30 dias consecutivos cada um com passo igual a 1 dia; ou seja, exclui-se o valor mais antigo e incorpora-se um mais novo. No entanto, essa abordagem tem a desvantagem de introduzir persistência nas médias de períodos longos em que a substituição de poucos pontos quase não altera seu valor médio. Mas ela foi aqui utilizada para verificar se as correlações se alteravam em função do número de pontos comparados.

Verificou-se graficamente que as correlações entre valores medidos e estimados de ETo mostraram tendência de dispersão próximo à linha de valores iguais (1:1) podendo-se descartar o valor da intercepção sem prejuízo nas análises. O modelo linear de comparação reduziu-se a $Y = b X$, forçando-se a passagem da reta pela origem ($a = 0$), sendo $Y =$ Valor medido e $X =$ Valor estimado semelhante a análise utilizada por Allen et al. (1989). Nesse caso, quanto mais próximo de 1,0 for o valor de b melhor será a estimativa. Os valores comparados representam as médias dos respectivos intervalos de tempo (decencial e mensal) e são expressos em mm d^{-1} . As comparações foram separadas em dois conjuntos, sendo uma para o período anterior ao inverno (1º. período, dias 10 a 182), e outra dos dias após o inverno (2º. período, dias 214 a 320), para verificar se houve efeito do repouso invernal sobre a evapotranspiração do gramado e na performance do modelo.

A Tabela 1 resume a estatística das comparações executadas para a escala mensal. Não houve efeito significativo do número de pontos comparados sobre o coeficiente de regressão (b) tanto no primeiro como no segundo período. O valor de b variou entre 1,0784 e 1,0961 resultando em b médio ponderado pelo número de pontos igual a 1,0905, indicando que o valor de ETo estimado pelo modelo de Penman-Monteith FAO-56 subestimou em 9% as medidas lisimétricas no primeiro período. No segundo período a variação em b também foi pequena e esteve entre 0,9562 e 0,9664, com valor médio igual a 0,9622, representando superestimativa média inferior a 4%. Combinando-se os dois períodos a subestimativa foi cerca de 4%, indicando boa correlação entre os valores medidos e estimados.

O erro médio da estimativa (e, mm d⁻¹) diminuiu à medida que aumentou o número de pontos comparados e variou entre 0,207 e 0,250 mm d⁻¹ no primeiro período, e entre 0,149 e 0,297 mm d⁻¹ no segundo período. No caso extremo em que houve somente três pontos comparados (Passo 30, mês convencional) no segundo período, o erro médio da estimativa aumentou em função de apenas um ponto discrepante (Figura 13d). Esse exemplo mostra a vantagem de se utilizar a média móvel para se aumentar o número de pontos.

Esses resultados não diferiram daqueles relatados por Allen et al. (1989) para locais com clima úmido, ou seja, $b = 0,98$, $r^2 = 0,94$ e $e = 0,31$ mm d⁻¹.

Tabela 1. Resumo estatístico das comparações entre valores médios medidos (Y) e estimados (X) de ETo na escala mensal ($Y = b X$), durante 1996, em Piracicaba, SP.

Passo [†]	1° Período (dias 10 a 182)				2° Período (dias 214 a 320)			
	b	r ²	e [‡]	n [#]	b	r ²	e	n
1	1,0961	0,9476	0,207	122	0,9628	0,8507	0,149	76
5	1,0944	0,9500	0,212	25	0,9643	0,8235	0,176	16
10	1,0916	0,9497	0,224	13	0,9615	0,8063	0,197	8
15	1,0920	0,9521	0,235	9	0,9664	0,7254	0,242	6
30	1,0784	0,9566	0,250	5	0,9562	0,4289	0,297	3
Média	1,0905	0,9512	0,212	---	0,9622	0,8249	0,166	---

[†] n° de dias diferentes entre meses consecutivos; [‡] erro médio da estimativa (mm d⁻¹); [#] número de pontos comparados.

Com respeito ao grau de associação entre os valores estimados e medidos de ETo, o coeficiente de correlação (r^2) foi sempre maior para o primeiro período, embora as estimativas para o segundo período tenham sido mais próximas dos valores medidos (Figura 13). Os menores valores de r^2 no segundo período foram determinados pelo menor intervalo de variação de Y e X, sendo o caso extremo mostrado na Figura 13c e 13d.

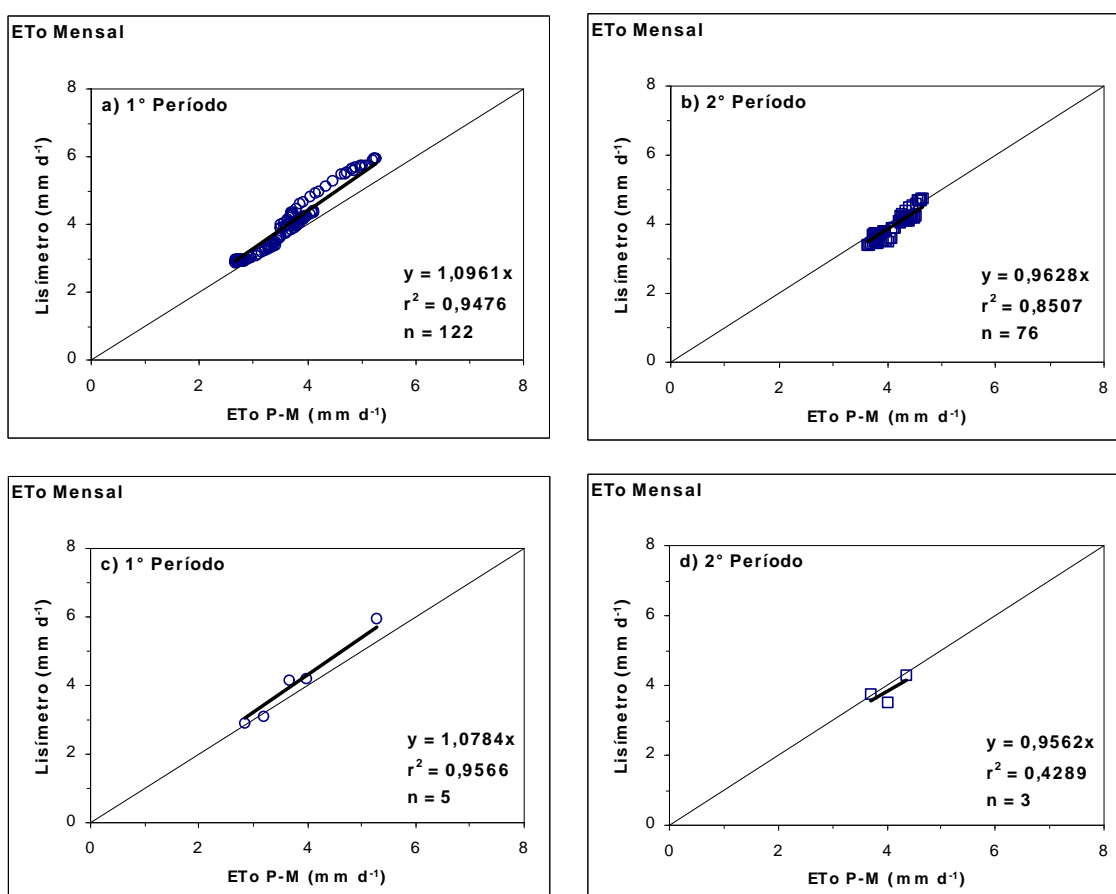


Figura 13 - Relação entre a ETo medida (Lisímetro) e a estimada (P-M), na escala mensal, utilizando passo 1 (a e b) e passo 30 (c e d), para os dois períodos de 1996 em Piracicaba, SP.

Seguindo os mesmos critérios de análise estatística utilizado na escala mensal procedeu-se as comparações para a escala decencial, e seu resumo está na Tabela 2.

A exemplo da escala mensal também não houve efeito significativo do número de pontos comparados sobre o coeficiente de regressão (b), tanto no primeiro como no segundo período. O valor de b variou, no primeiro período, entre 1,0855 e 1,0885 resultando em b médio ponderado pelo número de pontos igual a 1,0866, indicando que o valor de ETo estimado pelo modelo de Penman-Monteith (FAO-56) subestimou em 8% as medidas lisimétricas. No segundo período a variação em b também foi pequena e esteve entre 0,9530 e 0,9597, com valor médio igual a 0,9573, representando superestimativa média inferior a 5%. Combinando-se os dois períodos a subestimativa foi próxima a 3%, indicando boa correlação entre os valores medidos e estimados.

A Figura 14 ilustra a correlação entre os valores da ETo medida pelo lisímetro e o estimado pelo modelo de Penman-Monteith (FAO-56) na escala decencial, utilizando o passo 1 e o passo 10 (convencional).

O erro médio da estimativa variou entre 0,330 e 0,342 mm d⁻¹ no primeiro período, com valor médio ponderado igual a 0,332 mm d⁻¹ e entre 0,264 e 0,350 mm d⁻¹ no segundo período e média ponderada de 0,323 mm d⁻¹.

Novamente, o coeficiente de correlação (r²) foi maior no primeiro período em função do maior intervalo de variação dos valores medidos e estimados, e este efeito pode ser também verificado na Figura 14c e 14d.

Tabela 2. Resumo estatístico das comparações entre valores médios medidos (Y) e estimados (X) de ETo na escala decencial ($Y = b X$), durante 1996, em Piracicaba, SP.

Passo [†]	1º Período (dias 10 a 182)				2º Período (dias 214 a 320)			
	b	r ²	e [‡]	n [#]	b	r ²	e	n
1	1,0855	0,9149	0,330	142	0,9597	0,8615	0,264	96
2	1,0856	0,9159	0,331	71	0,9576	0,6164	0,443	49
5	1,0868	0,9147	0,338	29	0,9589	0,8207	0,300	20
10	1,0885	0,9180	0,342	15	0,9530	0,7931	0,350	10
Média	1,0866	0,9158	0,332	---	0,9573	0,7729	0,323	---

[†] n° de dias diferentes entre meses consecutivos; [‡] erro médio da estimativa (mm d⁻¹); [#] número de pontos comparados.

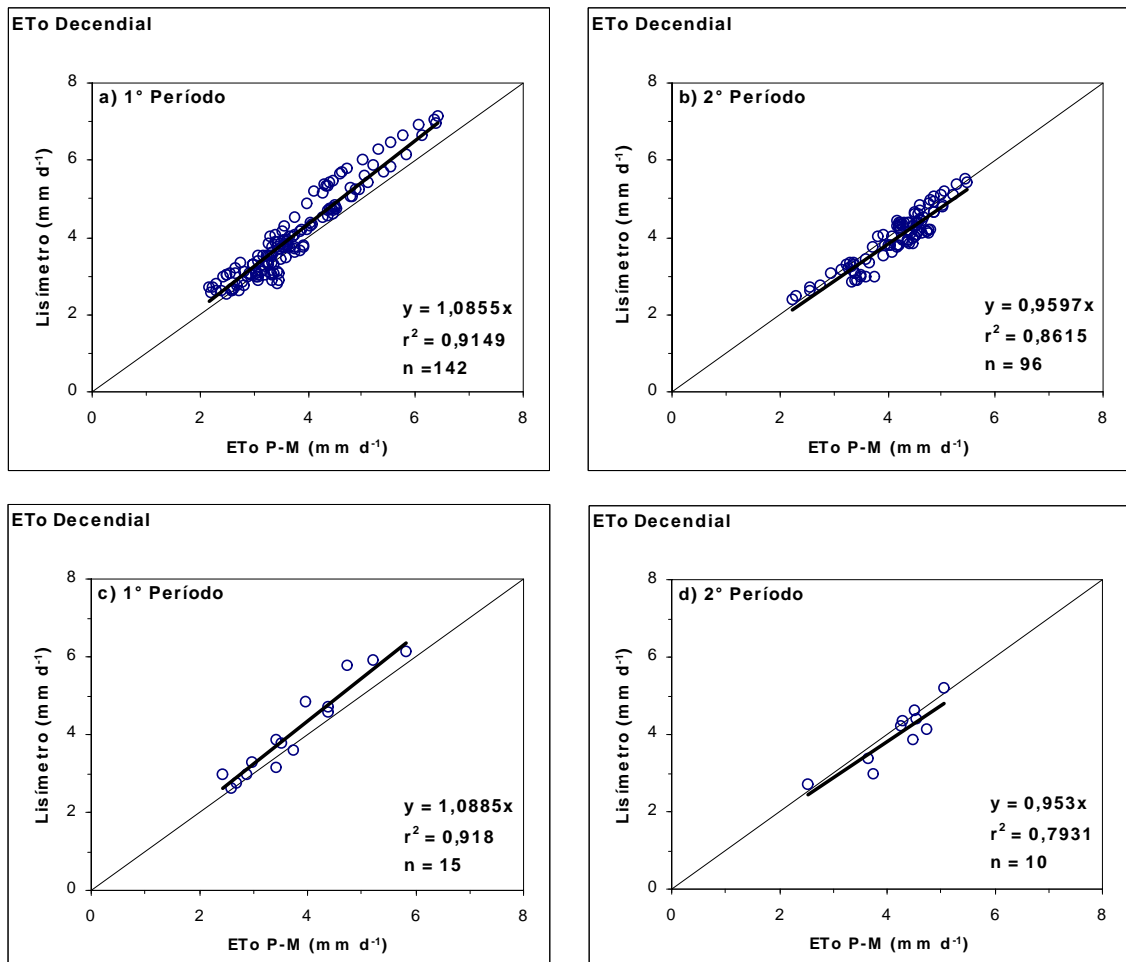


Figura 14 - Relação entre a ETo medida (Lisímetro) e a estimada (P-M), na escala decendial, utilizando passo 1 (a e b) e passo 10 (c e d), para os dois períodos de 1996 em Piracicaba, SP.

4.4 Estimativa de ETo com R_n Estimado

A condição de ausência de medida de R_n foi simulada procurando-se verificar a adequação da parametrização proposta no boletim FAO-56 (Allen et al., 1998) visando sua utilização tanto para outras épocas como para locais que não dispõem de medidas de R_n . Essa alternativa justifica-se também pelo fato dos atuais sensores de R_n apresentarem variação temporal em sua calibração.

Comparando-se os valores medidos e estimados de R_n (Figura 15) verifica-se que houve tendência dos pontos seguirem a linha de valores iguais (1:1) para valores maiores que 5 MJ m⁻² d⁻¹. Abaixo desse valor houve superestimativa sendo a discrepância maior no segundo período.

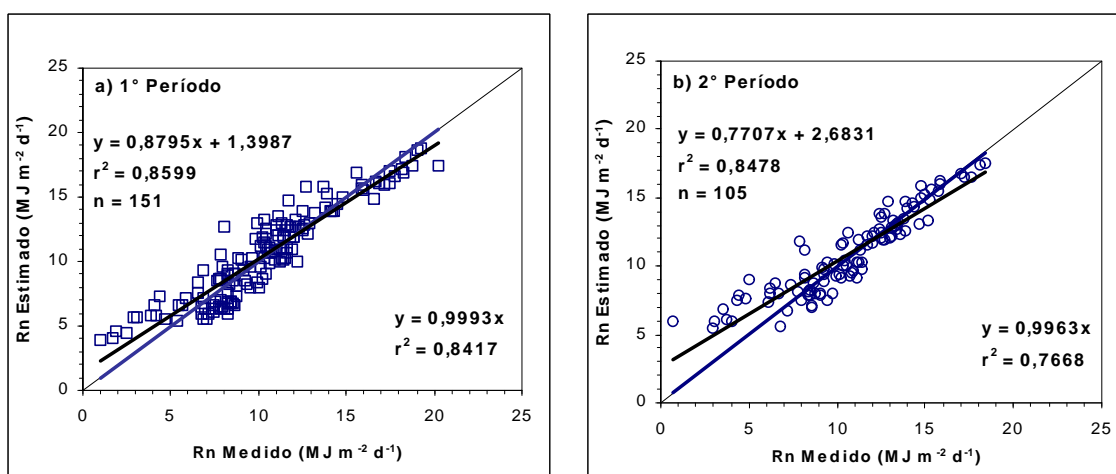


Figura 15 - Relação entre R_n total diário medido (saldo-radiômetro) e o calculado (boletim FAO-56), referente ao 1º período (a) e ao 2º período (b) de 1996 em Piracicaba, SP.

Utilizando-se as estimativas de R_n obteve-se estimativas de ETo tanto na escala mensal como decencial. Em função dos resultados relatados nas Tabela 1 e 2 optou-se por avaliar apenas as estimativas com a média móvel de passo 1 nas duas escalas de tempo. Em geral, os resultados indicam que as estimativas de ETo com R_n estimado, quando comparadas àquelas com R_n medidos apresentaram pequena melhoria no primeiro período (Figura 16a e 16c), com pequena piora no segundo período (Figura 16b e 16d). Esta é uma indicação de que o método de P-M (FAO-56) pode ser usado também em época com falta de medidas de R_n .

Os resultados aqui discutidos apresentaram ajustes bem melhores que aqueles relatados por Peres et al. (1995), tanto na escala mensal como decencial, e que foram obtidas com lisímetros de drenagem e que não permitem a obtenção de valores diários de ETo, sendo bem menos sensíveis que o lisímetro de pesagem aqui utilizado.

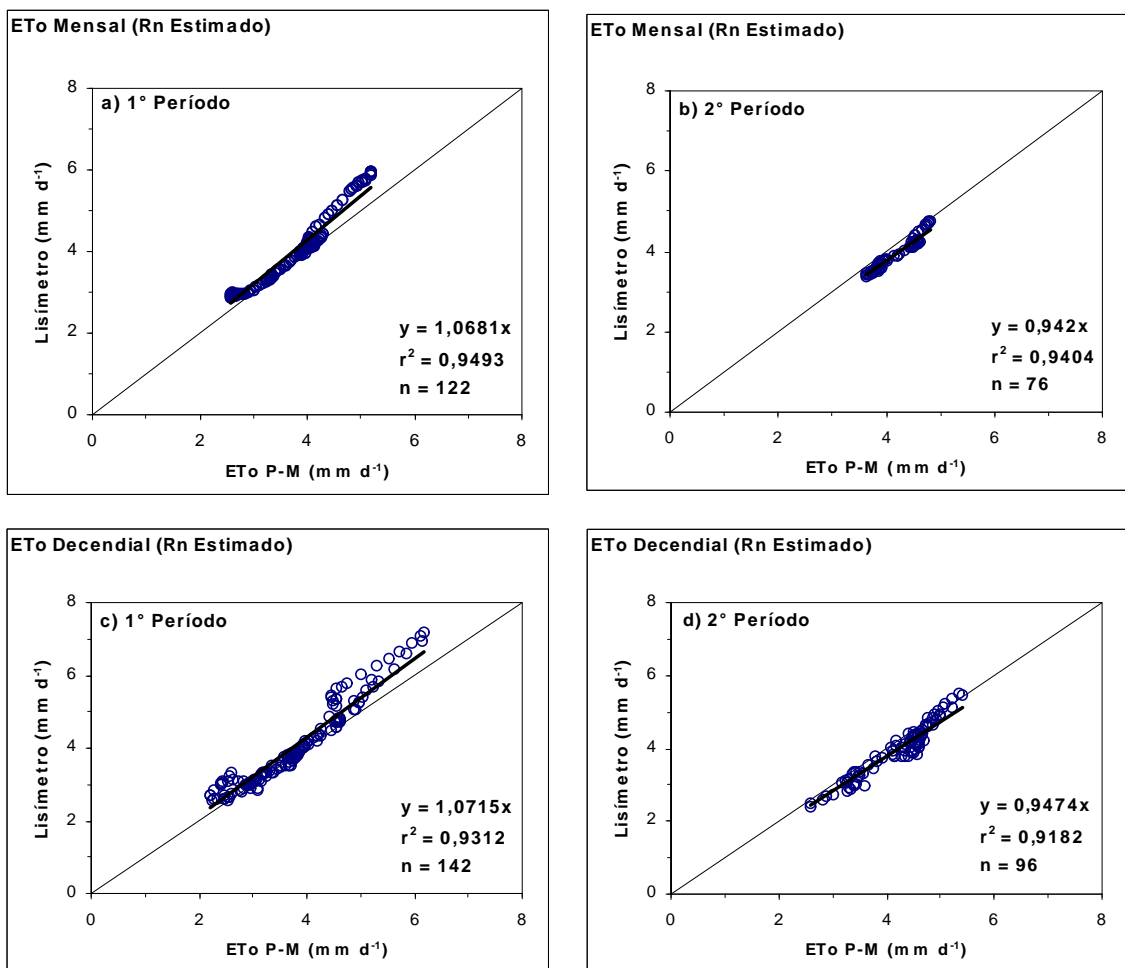


Figura 16 - Relação entre a ETo medida (lisímetro) e a estimada (P-M), nas escalas mensal (a e b) e decenal (c e d), referente aos dois períodos de 1996 em Piracicaba, SP.

5 CONCLUSÕES

Em função dos resultados aqui relatados é possível concluir-se que:

- ✓ Lisímetros de pesagem baseado em célula de carga, apesar de permitir mensuração detalhada da variação da massa de água contida num volume controlado de solo vegetado, é de difícil operação em períodos de chuvas intensas e prolongadas, resultando em valores questionáveis de evapotranspiração;
- ✓ Em dias sem ocorrência de chuvas a medida diária da evapotranspiração é mais confiável; no entanto, a alta sensibilidade da célula de carga impossibilita a obtenção de valores em escala de tempo mais detalhada (ex., horária) em função do transporte de momento imposto pelo vento que induz variações positivas na massa do lisímetro sem que haja qualquer acréscimo real;
- ✓ Face às dificuldades de mensuração lisimétrica de ETo a performance da parametrização proposta pela FAO para a equação de Penman-Monteith pode ser considerada como adequada tanto para estimativas mensais como decendiais;
- ✓ Estimativas de ETo na ausência de medidas de saldo de radiação (R_n) foram semelhantes àsquelas obtidas quando se considerou os valores medidos de R_n .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABOUKHALED, A.; ALFARO, A.; SMITH, M. **Lysimeters**. Rome: FAO, 1982. 68p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 39).
- ALCÂNTARA, P.B.; BUFARAH, G. **Plantas forrageiras**: gramíneas e leguminosas. São Paulo: Nobel, 1988. 162p.
- ALLEN, R.G.; JENSEN, M.E.; WRIGHT, J.L. et al. Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**, v.81, n.4, p.650-662, 1989.
- ALLEN, R.G.; HOWELL, T.A.; PRUITT, W.O. et al. (Ed.) **Lysimeters for evapotranspiration and environmental measurements**. New York: American Society of Civil Engineers, 1991a. 444 p.
- ALLEN, R.G.; PRUITT, W.O.; JENSEN, M.E. Environmental requirements of lysimeters. In: ALLEN, R.G.; HOWELL, T.A.; PRUITT, W.O. et al. (Ed.) **Lysimeters for evapotranspiration and environmental measurements**. New York: American Society of Civil Engineers, 1991b. p.170-181.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D. et al. **Crop evapotranspiration**: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 300p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56)
- BERGAMASCHI, H.; ROSA, L.M.G.; SANTOS, A.O. et al. Automação de um lisímetro de pesagem através de estação meteorológica, a campo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 10., Piracicaba, 1997. **Anais**. Piracicaba: SBA, 1997. p.222-224.

- BERLATO, M.A.; MOLION, L.C.B. **Evaporação e evapotranspiração**. Porto Alegre: IPAGRO, 1981. 95p.
- BRUTSAERT, W. **Evaporation into the atmosphere, theory, history, and applications**. Dordrecht: D. Reidel, 1982. 299p.
- CAMARGO, A.P. Contribuição para a determinação da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Bragantia**, v.21, p.163-213, 1962.
- CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.5, n.1, p.89-97, 1997.
- CAMARGO, A.P.; CAMARGO, M.B.P. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. **Bragantia**, v.59, n.2, p.125-137, 2000.
- CAMARGO, M.B.P.; CAMARGO, A.P. Representação gráfica informatizada do extrato do balanço hídrico de Thornthwaite-Mather. **Bragantia**, v.52, p.169-172, 1993.
- CAMPECHE, L.F.S.M. Estimativa da resistência de dossel (r_c) da grama com o uso da termometria ao infravermelho. Piracicaba, 1998. 52p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Necessidades hídricas das culturas**. Trad. de H. Gheye, J.E.C. Metri e F.A.V. Damasceno. Campina Grande: UFPB, 1997. 202p (Estudos FAO. Irrigação e Drenagem, 24).
- GANGOPADHYANA, M.; HARBECK Jr., G.E.; NORDENSON, T.J. et al. **Measurement and estimation of evaporation and evapotranspiration**. Genebra: WMO, 1966. 121p. (WMO. Tech. Note, 83, WMO, 201, TP 105).
- HOWELL, T.A.; SCHNEIDER, A.D.; JENSEN, M.E. History of lysimeter desing and use for evapotranspiration measurements. In: ALLEN, R.G.; HOWELL, T.A.; PRUITT, W.O. et al. (Ed.) **Lysimeters for evapotranspiration and environmental measurements**. New York: American Society of Civil Engineers, 1991. p.1-9.

- JENSEN, M.E.; WRIGHT, J.L.; PRATT, B.J. Estimating soil moisture depletion from climate, crop and soil data. **Transactions of the ASAE**, v.14, p.954-959, 1971.
- JENSEN, M.E. (Ed.) **Consumptive use of water and irrigation water requirements**. New York: American Society of Civil Engineers, 1973. 215p.
- JENSEN, M.E.; BURMAN, R.D.; ALLEN, R.G. **Evapotranspiration and irrigation water requirements**. New York: American Society of Civil Engineers, 1990. 332p. (Manual and Reports on Engineering Practice, 70).
- LIMA, J.E.F.W.; FERREIRA, R.S.A.; CHRISTOFIDIS, D. O uso da irrigação no Brasil. In: AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **O estado das águas no Brasil**: perspectivas de gestão e informação de recursos hídricos. (compact disc). Brasília, 1999.
- MEDEIROS, S.L.P. Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região mesoclimática de Santa Maria-RS. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.6, n.1, p.105-109, 1998.
- OMETTO, J.C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Ceres, 1981. 440p.
- OMETTO, J.C. **Registros e estimativas dos parâmetros meteorológicos da região de Piracicaba, SP**. Piracicaba: FEALQ, 1991. 76p.
- PENMAN, H.L. Evaporation: an introductory survey. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, v.1, p.9-29, 1956.
- PENMAN, H.L.; ANGUS, D.E.; van BAVEL, C.H.N. Microclimatic factors affecting evaporation and transpiration. In: HAGAN, R.M.; HAISE, H.H.; EDMINSTER, T.W. (Ed.) **Irrigation of agricultural lands**. Madison: American Society Agronomy, 1967. p.483-505.
- PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.

- PERES, J.G.; PEREIRA, A.R.; FRIZZONE, J.A. Avaliação do modelo de Penman-Monteith para estimativa da evapotranspiração de referência padronizada pela FAO. **Engenharia Rural**, v.6, n.1, p.65-75, 1995.
- PRUITT, W.O.; LOURENCE, F.J. Experiences in lysimetry for ET and surface drag measurements. In: NATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN EVAPOTRANSPIRATION, Chicago, 1985: **Advances in evapotranspiration: proceedings**. St. Joseph: ASAE, 1985. p. 51-69. (ASAE. Publication, 14-85).
- RAMOS, A.K.B. Avaliação do crescimento, componentes produtivos e composição mineral de três gramíneas forrageiras tropicais. Piracicaba, 1997. 152p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- SENTELHAS, P.C.; PEREIRA, A.R. A maior estiagem do século? **Notícias Piracena**, v.6, n.50, p.1, 2000.
- SENTELHAS, P.C.; PEREIRA, A.R.; MARIN, F.R. et al. **Balances hídricos climatológicos do Brasil**. (compact disc). Piracicaba: ESALQ, 1999.
- SILVA, F.C. Uso de dispositivos lisimétricos para medida da evapotranspiração de referência. Piracicaba, 1996. 73p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.
- SILVA, F.C.; FOLEGATTI, M.V.; MAGGIOTTO, S.R. Análise do funcionamento de um lisímetro de pesagem com célula de carga. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.7, n.1, p.53-58, 1999.
- SMITH, M.; ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S. Revised FAO methodology for crop water requirements. In: CAMP, C.R.; SADLER, E.J.; YODER, R.E. (Ed.) **Evapotranspiration and irrigation scheduling**. St. Joseph: ASAE, 1996. p.116-123.
- VILLA NOVA, N.A.; REICHARDT, K. Evaporação/evapotranspiração de um ecossistema e suas relações com o meio ambiente. **Engenharia Hidrológica**, v.2, p.145-197, 1989.