AVALIAÇÃO DO MODELO DE PENMAN-MONTEITH, PADRÃO FAO,
PARA ESTIMAR A EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFÊRENCIA NAS
CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO

JOSÉ GEANINI PERES

Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO FRIZZONE

Co-orientador: Prof. Dr. ANTONIO ROBERTO PEREIRA

Tese apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Doutor em Agronomia, Área de Concentração: Irrigação e Drenagem.

P I R A C I C A B A

Estado de São Paulo - Brasil

Janeiro - 1994

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Livros da
Divisão de Biblioteca e Documentação - PCLQ/USP

Peres, José Geanini
P437a Avaliação do modelo de Penman-Monteith, padrão
FAO, para estimar a evapotranspiração de referência
nas condições climáticas do Estado de São Paulo.
Piracicaba, 1994.
116p.

Tese - ESALQ
Bibliografia.

1. Climatologia agrícola 2. Evapotranspiração 3. Mo-
delo de Penman-Monteith I. Escola Superior de Agricul-
tura Luiz de Queiroz, Piracicaba

CDD 551.572

AVALIAÇÃO DO MODELO DE PENMAN-MONTEITH, PADRÃO FAO,
PARA ESTIMAR A EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFÊRENCIA NAS
CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO

JOSÉ GEANINI PERES

Aprovada em: 21/03/94

Comissão julgadora:

Prof. Dr. José Antonio Frizzone	ESALQ/USP
Prof. Dr. Marcos Vinicius Folegatti	ESALQ/USP
Prof. Dr. Nilson Augusto Villa Nova	ESALQ/USP
Dr. Marcelo Bento Paes de Camargo	IAC
Prof. Dr. Arthur Mattos	EESC/USP

Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO FRIZZONE

Orientador

Ao meu filho Caio, meu paciente mestre nas artes e segredos da computação, pela participação decisiva na feitura deste trabalho.

Ao mestre Ângelo Paes de Camargo, pelo conjunto de sua obra em prol da ciência brasileira.

OFEREÇO

A minha mulher Cátia e ao meu filho Danilo, pelo estímulo e confiança demonstrados

DEDICO

Na realização deste trabalho, contei com a colaboração e estímulo permanentes dos Professores Antonio Roberto Pereira, José Antonio Frizzone e Nilson Augusto Villa Nova. A eles e a todos aqueles que de alguma forma contribuíram nesta empreitada

AGRADEÇO

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABELAS.....	xvi
RESUMO.....	xxiv
SUMMARY.....	xxvi
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	7
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	26
3.1. Material.....	26
3.1.1. Evapotranspiração de referência medida (Eto).....	26
3.1.2. Obtenção dos dados climáticos.....	29
3.2. Métodos.....	29
3.2.1. Cálculo dos parâmetros climáticos.....	29
3.2.1.1. Calor latente de vaporização..	30
3.2.1.2. Tangente à curva de pressão de saturação do vapor d'água.	30
3.2.1.3. Pressão atmosférica.....	31
3.2.1.4. Constante psicrométrica.....	32
3.2.1.4.1. Constante psicromé- trica modificada...	33
3.2.1.5. Massa específica do ar.....	34

3.2.1.6. Pressão de saturação do vapor d'água.....	35
3.2.1.7. Pressão atual do vapor d'água.....	36
3.2.1.8. Velocidade do vento.....	36
3.2.1.9. Radiação solar líquida.....	37
3.2.2. Estimativa da resistência aerodinâmica e do dossel.....	38
3.2.2.1. Resistência aerodinâmica.....	38
3.2.2.2. Resistência do dossel.....	41
3.2.3. Estimativa da evapotranspiração de referência pelo modelo de Penman-Monteith	42
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47
4.1. Relativos à evapotranspiração de referência estimada pelo modelo de Penman-Monteith (EToM), padrão FAO.....	47
4.1.1. Periodicidade decadiária.....	47
4.1.2. Periodicidade mensal.....	51
4.2. Relativos à sensibilidade do modelo de Penman-Monteith a variações da altura da vegetação e da resistência do dossel.....	56
4.3. Relativos à resistência do dossel.....	78
5. CONCLUSÕES.....	83
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	85
APÊNDICE 1.....	98
APÊNDICE 2.....	104

LISTA DE FIGURAS

Figura nº	Página
1: Evapotranspiração de referência decadiária estimada pelo modelo de Penman-Monteith (EToM) versus a medida em evapotranspirômetros de drenagem (ETo) em relação à reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a 1959.....	48
2: Evapotranspiração de referência decadiária estimada pelo modelo de Penman-Monteith (EToM) versus a medida em evapotranspirômetros de drenagem (ETo) em relação à reta 1:1. Ribeirão Preto-SP. Período de 1956 a 1959.....	49
3: Evapotranspiração de referência decadiária estimada pelo modelo de Penman-Monteith (EToM) versus a medida em evapotranspirômetros de drenagem (ETo) em relação à reta 1:1. Pindamonhangaba-SP. Período de 1954 a 1956.....	49

- 4: Evapotranspiração de referência mensal estimada pelo modelo de Penman-Monteith (ET_{oM}) versus a medida em evapotranspirômetros de drenagem (ET_o) em relação à reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a 1959..... 53
- 5: Evapotranspiração de referência mensal estimada pelo modelo de Penman-Monteith (ET_{oM}) versus a medida em evapotranspirômetros de drenagem (ET_o) em relação à reta 1:1. Ribeirão Preto-SP. Período de 1956 a 1959..... 53
- 6: Evapotranspiração de referência mensal estimada pelo modelo de Penman-Monteith (ET_{oM}) versus a medida em evapotranspirômetros de drenagem (ET_o) em relação à reta 1:1. Pindamonhangaba-SP. Período de 1954 a 1956..... 54
- 7: Evapotranspiração de referência decadiária estimada pelo modelo de Penman-Monteith (ET_{oM₀₆₀₀}) versus a medida em evapotranspirômetros de drenagem (ET_o) em relação à reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a 1959..... 61

- 8: Evapotranspiração de referência decadiária
estimada pelo modelo de Penman-Monteith
($EToM_{0620}$) versus a medida em evapotranspi-
rômetros de drenagem (ETo) em relação à
reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a
1959..... 61
- 9: Evapotranspiração de referência decadiária
estimada pelo modelo de Penman-Monteith
($EToM_{0640}$) versus a medida em evapotranspi-
rômetros de drenagem (ETo) em relação à
reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a
1959..... 62
- 10: Evapotranspiração de referência decadiária
estimada pelo modelo de Penman-Monteith
($EToM_{0660}$) versus a medida em evapotranspi-
rômetros de drenagem (ETo) em relação à
reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a
1959..... 62
- 11: Evapotranspiração de referência decadiária
estimada pelo modelo de Penman-Monteith
($EToM_{0680}$) versus a medida em evapotranspi-
rômetros de drenagem (ETo) em relação à
reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a
1959..... 63

- 12: Evapotranspiração de referência decadiária
estimada pelo modelo de Penman-Monteith
($EToM_{06VR}$) versus a medida em evapotranspi-
rômetros de drenagem (ETo) em relação à
reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a
1959..... 63
- 13: Evapotranspiração de referência decadiária
estimada pelo modelo de Penman-Monteith
($EToM_{1200}$) versus a medida em evapotranspi-
rômetros de drenagem (ETo) em relação à
reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a
1959..... 64
- 14: Evapotranspiração de referência decadiária
estimada pelo modelo de Penman-Monteith
($EToM_{1220}$) versus a medida em evapotranspi-
rômetros de drenagem (ETo) em relação à
reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a
1959..... 64
- 15: Evapotranspiração de referência decadiária
estimada pelo modelo de Penman-Monteith
($EToM_{1240}$) versus a medida em evapotranspi-
rômetros de drenagem (ETo) em relação à
reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a
1959..... 65

- 16: Evapotranspiração de referência decadiária
estimada pelo modelo de Penman-Monteith
($EToM_{1260}$) versus a medida em evapotranspi-
rômetros de drenagem (ETo) em relação à
reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a
1959..... 65
- 17: Evapotranspiração de referência decadiária
estimada pelo modelo de Penman-Monteith
($EToM_{1280}$) versus a medida em evapotranspi-
rômetros de drenagem (ETo) em relação à
reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a
1959..... 66
- 18: Evapotranspiração de referência decadiária
estimada pelo modelo de Penman-Monteith
($EToM_{12VR}$) versus a medida em evapotranspi-
rômetros de drenagem (ETo) em relação à
reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a
1959..... 66
- 19: Evapotranspiração de referência mensal es-
timada pelo modelo de Penman-Monteith
($EToM_{0600}$) versus a medida em evapotranspi-
rômetros de drenagem (ETo) em relação à
reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a
1959..... 67

- 20: Evapotranspiração de referência mensal estimada pelo modelo de Penman-Monteith ($ET_{M_{0620}}$) versus a medida em evapotranspirômetros de drenagem (ET_o) em relação à reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a 1959..... 67
- 21: Evapotranspiração de referência mensal estimada pelo modelo de Penman-Monteith ($ET_{M_{0640}}$) versus a medida em evapotranspirômetros de drenagem (ET_o) em relação à reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a 1959..... 68
- 22: Evapotranspiração de referência mensal estimada pelo modelo de Penman-Monteith ($ET_{M_{0660}}$) versus a medida em evapotranspirômetros de drenagem (ET_o) em relação à reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a 1959..... 68
- 23: Evapotranspiração de referência mensal estimada pelo modelo de Penman-Monteith ($ET_{M_{0680}}$) versus a medida em evapotranspirômetros de drenagem (ET_o) em relação à reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a 1959..... 69

- 24: Evapotranspiração de referência mensal estimada pelo modelo de Penman-Monteith ($ET_{M_{06VR}}$) versus a medida em evapotranspirometros de drenagem (ET_o) em relação à reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a 1959..... 69
- 25: Evapotranspiração de referência mensal estimada pelo modelo de Penman-Monteith ($ET_{M_{1200}}$) versus a medida em evapotranspirometros de drenagem (ET_o) em relação à reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a 1959..... 70
- 26: Evapotranspiração de referência mensal estimada pelo modelo de Penman-Monteith ($ET_{M_{1220}}$) versus a medida em evapotranspirometros de drenagem (ET_o) em relação à reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a 1959..... 70
- 27: Evapotranspiração de referência mensal estimada pelo modelo de Penman-Monteith ($ET_{M_{1240}}$) versus a medida em evapotranspirometros de drenagem (ET_o) em relação à reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a 1959..... 71

- 28: Evapotranspiração de referência mensal estimada pelo modelo de Penman-Monteith ($EToM_{1260}$) versus a medida em evapotranspirômetros de drenagem (ETo) em relação à reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a 1959..... 71
- 29: Evapotranspiração de referência mensal estimada pelo modelo de Penman-Monteith ($EToM_{1280}$) versus a medida em evapotranspirômetros de drenagem (ETo) em relação à reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a 1959..... 72
- 30: Evapotranspiração de referência mensal estimada pelo modelo de Penman-Monteith ($EToM_{12VR}$) versus a medida em evapotranspirômetros de drenagem (ETo) em relação à reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a 1959..... 72
- 31: Variação temporal decadiária média da resistência do dossel, considerando O_2 alturas de vegetação, obtida a partir da aplicação do modelo de Penman-Monteith aos valores medidos da evapotranspiração de refe-

rência coletados em Campinas-SP, no período de 1956 a 1959.....	80
32: Variação temporal mensal média da resistência do dossel, considerando 02 alturas de vegetação, obtida a partir da aplicação do modelo de Penman-Monteith aos valores medidos da evapotranspiração de referência coletados em Campinas-SP, no período de 1956 a 1959.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela n ^o	Página
1: Valores decadiários da evapotranspiração de referência medida (ET _o) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (ET _{oM}), em Campinas-SP. Período de 1956 a 1959. Valores em mm de água.....	99
2: Valores decadiários da evapotranspiração de referência medida (ET _o) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (ET _{oM}), em Ribeirão Preto-SP. Período de 1956 a 1959. Valores em mm de água.....	100
3: Valores decadiários da evapotranspiração de referência medida (ET _o) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (ET _{oM}), em Pindamonhangaba-SP. Período de 1954 a 1956. Valores em mm de água.....	101
4: Número de observações (n), coeficiente linear (a), coeficiente angular (b), erro padrão da estimativa (s) e coeficiente de	

- determinação (r^2) para as equações de regressão linear simples entre os valores decadiários da evapotranspiração de referência medida (ET_o) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (ET_{oM}), para Campinas-SP, Ribeirão Preto-SP e Pindamonhangaba-SP..... 48
- 5: Valores mensais da evapotranspiração de referência medida (ET_o) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (ET_{oM}), em Campinas-SP. Período de 1956 a 1959. Valores em mm de água..... 102
- 6: Valores mensais da evapotranspiração de referência medida (ET_o) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (ET_{oM}), em Ribeirão Preto-SP. Período de 1956 a 1959. Valores em mm de água..... 102
- 7: Valores mensais da evapotranspiração de referência medida (ET_o) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (ET_{oM}), em Pindamonhangaba-SP. Período de 1954 a 1956. Valores em mm de água..... 103
- 8: Número de observações (n), coeficiente linear (a), coeficiente angular (b), erro

padrão da estimativa (s) e coeficiente de determinação (r^2) para as equações de regressão linear simples entre os valores mensais da evapotranspiração de referência medida (ET_o) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (ET_oM), para Campinas-SP, Ribeirão Preto-SP e Pindamonhagaba-SP..... 52

9: Valores decadiários da evapotranspiração de referência medida (ET_o) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (ET_oM), considerando diferentes resistências do dossel e altura de vegetação igual a 0,06m, em Campinas-SP, ano de 1956. Valores em mm de água..... 105

10: Valores decadiários da evapotranspiração de referência medida (ET_o) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (ET_oM), considerando diferentes resistências do dossel e altura de vegetação igual a 0,06m, em Campinas-SP, ano de 1957. Valores em mm de água..... 106

11: Valores decadiários da evapotranspiração de referência medida (ET_o) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (ET_oM), conside-

- rando diferentes resistências do dossel e altura de vegetação igual a 0,06m, em Campinas-SP, ano de 1958. Valores em mm de água..... 107
- 12: Valores decadiários da evapotranspiração de referência medida (ET_o) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (ET_{oM}), considerando diferentes resistências do dossel e altura de vegetação igual a 0,06m, em Campinas-SP, ano de 1959. Valores em mm de água..... 108
- 13: Valores decadiários da evapotranspiração de referência medida (ET_o) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (ET_{oM}), considerando diferentes resistências do dossel e altura de vegetação igual a 0,12m, em Campinas-SP, ano de 1956. Valores em mm de água..... 109
- 14: Valores decadiários da evapotranspiração de referência medida (ET_o) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (ET_{oM}), considerando diferentes resistências do dossel e altura de vegetação igual a 0,12m, em

Campinas-SP, ano de 1957. Valores em mm de
 água..... 110

15: Valores decadiários da evapotranspiração de
 referência medida (ET_o) e estimada pelo
 modelo de Penman-Monteith (ET_{oM}), conside-
 rando diferentes resistências do dossel e
 altura de vegetação igual a 0,12m, em
 Campinas-SP, ano de 1958. Valores em mm de
 água..... 111

16: Valores decadiários da evapotranspiração de
 referência medida (ET_o) e estimada pelo
 modelo de Penman-Monteith (ET_{oM}), conside-
 rando diferentes resistências do dossel e
 altura de vegetação igual a 0,12m, em
 Campinas-SP, ano de 1959. Valores em mm de
 água..... 112

17: Número de observações (n), coeficiente li-
 near (a), coeficiente angular (b), erro
 padrão da estimativa (s) e coeficiente de
 determinação (r^2) para as equações de re-
 gressão linear simples entre os valores
 decadiários da evapotranspiração de refe-
 rência medida (ET_o) e estimada pelo modelo

de Penman-Monteith (EToM). Campinas-SP.

Período de 1956 a 1959..... 59

18: Valores mensais da evapotranspiração de referência medida (ETo) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (EToM), considerando diferentes resistências do dossel e uma altura da vegetação de 0,06m, em Campinas-SP, ano de 1956. Valores em mm de água..... 113

19: Valores mensais da evapotranspiração de referência medida (ETo) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (EToM), considerando diferentes resistências do dossel e uma altura da vegetação de 0,06m, em Campinas-SP, ano de 1957. Valores em mm de água..... 113

20: Valores mensais da evapotranspiração de referência medida (ETo) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (EToM), considerando diferentes resistências do dossel e uma altura da vegetação de 0,06m, em Campinas-SP, ano de 1958. Valores em mm de água..... 114

- 21: Valores mensais de evapotranspiração de referência medida (ET_o) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (ET_{oM}), considerando diferentes resistências do dossel e uma altura da vegetação de 0,06m, em Campinas-SP, ano de 1959. Valores em mm de água..... 114
- 22: Valores mensais de evapotranspiração de referência medida (ET_o) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (ET_{oM}), considerando diferentes resistências do dossel e uma altura da vegetação de 0,12m, em Campinas-SP, ano de 1956. Valores em mm de água..... 115
- 23: Valores mensais de evapotranspiração de referência medida (ET_o) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (ET_{oM}), considerando diferentes resistências do dossel e uma altura da vegetação de 0,12m, em Campinas-SP, ano de 1957. Valores em mm de água..... 115
- 24: Valores mensais de evapotranspiração de referência medida (ET_o) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (ET_{oM}), conside-

rando diferentes resistências do dossel e uma altura da vegetação de 0,12m, em Campinas-SP, ano de 1958. Valores em mm de água..... 116

25: Valores mensais de evapotranspiração de referência medida (ET_o) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (ET_{oM}), considerando diferentes resistências do dossel e uma altura da vegetação de 0,12m, em Campinas-SP, ano de 1959. Valores em mm de água..... 116

26: Número de observações (n), coeficiente linear (a), coeficiente angular (b), erro padrão da estimativa (s) e coeficiente de determinação (r^2) para as equações de regressão linear simples entre os valores mensais da evapotranspiração de referência medida (ET_o) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (ET_{oM}). Campinas-SP. Período de 1956 a 1959..... 59

AVALIAÇÃO DO MODELO DE PENMAN-MONTEITH, PADRÃO FAO,
PARA ESTIMAR A EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA NAS
CONDIÇÕES CLIMÁTICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO.

Autor: JOSÉ GEANINI PERES

Orientador: Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO FRIZZONE

Co-orientador: Prof. Dr. ANTONIO ROBERTO PEREIRA

RESUMO

Avaliou-se o modelo de Penman-Monteith, parametrizado pela FAO, na estimativa da evapotranspiração de referência (ETo), padrão grama, medida com evapotranspirômetros de drenagem, em três locais do Estado de São Paulo. Com a padronização proposta pela FAO (vegetação com 0,12 m de altura; resistência do dossel igual a 69 s m^{-1} ; albedo de 23%), este modelo estimou ETo de forma consistente, tanto na escala decadiária quanto mensal. Nesta última, os valores estimados e medidos apresentaram correlação e concordância superiores àqueles da escala decadiária.

O modelo mostrou-se sensível a variações da altura da vegetação (h_c) e da resistência do dossel (r_c). Assim, procurou-se a melhor combinação desses fatores para

as condições dos experimentos, encontrando-se $h_c = 0,06$ m e $r_c = 80$ s m^{-1} , que são diferentes da recomendação da FAO. No entanto, a concordância mais estreita entre valores estimados e medidos foi obtida quando se permitiu r_c variar em função do saldo de radiação solar e do índice de área foliar.

Tomando-se a resistência do dossel como incógnita do modelo, verificou-se que, para $h_c = 0,06$ m, seu valor variou entre 300 s m^{-1} , no outono-inverno, e 202 s m^{-1} , na primavera-verão, enquanto que, para $h_c = 0,12$ m, estes valores foram, respectivamente, 365 e 241 s m^{-1} . Estes números, que são aplicáveis tanto à escala decadiária quanto mensal, devem ser considerados como coeficientes empíricos, sem nenhum significado fisiológico.

EVALUATION OF THE FAO PENMAN-MONTEITH MODEL TO
ESTIMATE THE REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION AT THE
CLIMATIC CONDITIONS OF SÃO PAULO STATE, BRAZIL.

Author: JOSÉ GEANINI PERES

Adviser: Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO FRIZZONE

Co-adviser: Prof. Dr. ANTONIO ROBERTO PEREIRA

SUMMARY

An evaluation of the FAO Penman-Monteith model was performed using the grass reference evapotranspiration (ET_o) measured with drainage evapotranspirometers, in three locations in the São Paulo State, Brazil. The model parameterized with the hypothetical crop conditions (fixed crop height $h_c = 0.12$ m; canopy resistance $r_c = 60 \text{ s m}^{-1}$; and 23% of albedo), estimated fairly well ET_o both at the 10-day and at the monthly time scales. The agreement and correlation with the measured values was much better at the monthly time scale.

The model is sensitive to variations of vegetation height (h_c) and canopy resistance (r_c). The best combination found here, for such variables, was $h_c =$

0.06 m and $r_c = 80 \text{ s m}^{-1}$, which are different from the FAO recommendation. However, the best agreement resulted when canopy resistance was allowed to vary with the net solar radiation and the leaf area index.

Taking the canopy resistance as unknown of the model, at the vegetation height of 0.06 m, its value varied between 300 s m^{-1} , during the fall-winter season, and 202 s m^{-1} during the spring-summer period. For a vegetation height of 0.12 m these values are, respectively, 365 e 241 s m^{-1} .

These numbers are applicable to both 10-day and the monthly scales and should be considered as an empirical coefficient without any physiological meaning.

1. INTRODUÇÃO

A evapotranspiração, em conjunto com a precipitação, constitui-se em um dos principais componentes do ciclo hidrológico. Por esta razão, o entendimento dos processos envolvidos e a capacidade de se estimar a sua ordem de grandeza são de fundamental importância no planejamento e utilização adequados dos recursos hídricos disponíveis na natureza.

Dentre os diferentes usos dos recursos hídricos, a irrigação destaca-se pela sua importância sócio-econômica, seja em regiões áridas e semi-áridas, onde é obrigatória ou, então, em áreas onde ela é praticada de forma a complementar a precipitação no atendimento das necessidades hídricas das culturas.

A quantificação precisa da água evapotranspirada pelo sistema solo-planta-atmosfera é de fundamental importância no planejamento, dimensionamento e manejo de sistemas de irrigação. Apesar dos custos envolvidos nos estudos de determinação das necessidades de água dos projetos serem desprezíveis quando comparados com os seus

custos totais, são muitos os projetos que se mostraram técnica-economicamente inviáveis, devido a estimativas inadequadas da evapotranspiração.

Sistemas de irrigação, adequadamente projetados e operados, fornecem água às culturas na quantidade, qualidade e momentos adequados. Quando a irrigação se faz em quantidade de água inferior às reais necessidades dos cultivos, estes respondem produzindo abaixo de sua capacidade potencial. O mesmo ocorre se a dosagem aplicada for excessiva, devido à lixiviação de nutrientes essenciais e, principalmente, pela aeração deficiente do sistema radicular.

A evapotranspiração pode ser determinada por meio de medidas diretas ou a partir de modelos baseados na utilização de dados climáticos. No primeiro grupo estão os diferentes tipos de lisímetros e o método do balanço de água no solo, enquanto no segundo, colocam-se os modelos meteorológicos, teóricos e empíricos.

Os métodos diretos, embora forneçam as melhores estimativas da evapotranspiração, são de realização demorada, dispendiosos e de difícil execução nas condições de campo, razões pelas quais são normalmente utilizados para calibrar os métodos do segundo grupo. Estas dificuldades restringem a sua utilização às instituições de pesquisa, sendo de uso muito limitado nas condições cotidianas da irrigação.

Visando superar estas dificuldades, muitos métodos teóricos e empíricos foram desenvolvidos para estimativa da evapotranspiração. Alguns são bastante simples, como o de THORNTHWAITE (1948), que utiliza apenas a temperatura do ar como variável climática. Outros, como o de PENMAN (1948), possuem um desenvolvimento teórico mais refinado, porém demandam um número maior de variáveis climáticas para a sua utilização. Entre estes dois extremos, encontra-se uma multidão de outros métodos.

O grande número de métodos teóricos e empíricos disponíveis constitui-se em uma facilidade aparente aos pesquisadores e projetistas. Estes, muitas vezes, têm que se decidir pelo uso um método, sem pleno conhecimento de sua gênese, e acabam obtendo resultados nem sempre fidedignos. Métodos empíricos, por exemplo, são excelentes para as condições em que foram desenvolvidos, porém demandam cuidados nas extrapolações para outras condições edafoclimáticas.

Procurando sistematizar o uso desses métodos, alguns autores e agências de desenvolvimento trouxeram ao conhecimento público, contribuições técnicas muito importantes no estudo do consumo de água pelas plantas.

JENSEN (1973) apresentou uma extensa compilação dos principais métodos utilizados na determinação da evapotranspiração, comparando-os em bases mensais. Os resultados obtidos são difíceis de serem interpretados,

uma vez que não se fez uma distinção clara de qual seja a cultura de referência utilizada: alfafa ou grama.

Nesta mesma linha, porém com resultados práticos muito superiores, DOORENBOS & PRUITT (1975), muito contribuíram na sistematização do cálculo das necessidades de água das culturas a partir dos conceitos de evapotranspiração de referência e coeficiente de cultura. Esta publicação, que no nosso meio passou a ser conhecida como o BOLETIM 24 da FAO, tornou-se uma referência mundial, sendo amplamente utilizada por engenheiros, agrônomos e hidrologistas. O sucesso desta publicação deveu-se à clareza de sua metodologia e, também, ao grande número de tabelas e exemplos de aplicação apresentados pelos autores.

A partir de 1975, verificou-se um desenvolvimento acelerado dos recursos computacionais e de instrumentação, facilitando sobremaneira a coleta e o processamento das informações climáticas. A popularização do computador fez com que facilidades como tabelas e ábacos se tornassem obsoletas, quando comparadas com as vantagens apresentadas pelo processamento de algoritmos. Paralelamente a este desenvolvimento, novas pesquisas foram conduzidas na área das relações solo-planta-água, tornando disponíveis informações técnicas adicionais.

Com base nesta nova realidade, a Food and Agriculture Organization (FAO) decidiu-se por uma ampla revisão da metodologia proposta por DOORENBOS & PRUITT

(1975). Os objetivos e procedimentos a serem adotados nesta revisão estão apresentados em SMITH (1991).

A proposta da FAO é ambiciosa e deverá ser implementada em duas fases. Na primeira, será mantida a atual sistemática de se estimar a evapotranspiração da cultura a partir da evapotranspiração de referência e coeficientes de cultura. A inovação nesta etapa está na adoção do modelo de Penman-Monteith (MONTEITH, 1965) como método padrão para estimativa da evapotranspiração de referência. Na segunda fase, que deverá ser implementada nos próximos 10 anos, serão abandonados os conceitos de evapotranspiração de referência e coeficientes de cultura, passando a evapotranspiração da cultura a ser estimada diretamente pelo modelo de Penman-Monteith, através da incorporação de valores adequados para a resistência aerodinâmica e para a resistência do dossel, específicas para cada cultura.

A adoção do modelo de Penman-Monteith implicará no desenvolvimento de pesquisas adicionais com vistas a testar a sua validade em diferentes condições climáticas (SMITH, 1991). Nesta linha de atuação, o presente trabalho se propõe a:

a) avaliar o modelo de Penman-Monteith, padrão FAO, como estimador da evapotranspiração de referência para grama, nas condições climáticas do Estado de São Paulo; e

6.

b) testar a sensibilidade do modelo a variações das características da cultura de referência: altura e resistência do dossel.

2. REVISÃO DA LITERATURA

THORNTHWAITE (1948) introduziu na literatura especializada o termo evapotranspiração potencial (ETp), definindo-a como sendo a quantidade máxima de água utilizada por uma extensa área vegetada, em crescimento ativo, sob condições ótimas de umidade do solo.

Quando as condições de contorno acima não forem verificadas, tem-se a evapotranspiração real (ETa), que é aquela que ocorre em uma superfície vegetada, independente de sua área e das condições de umidade do solo (THORNTHWAITE, 1948; SEDIYAMA, 1987; VILLA NOVA & REICHARDT, 1989; PEREIRA, 1992).

O conceito evapotranspiração da cultura (ETc) foi introduzido por DOORENBOS & PRUITT (1975), caracterizando-a como sendo a evapotranspiração de uma cultura agronômica, livre de doenças, desenvolvendo-se em uma área cultivada de um ou mais hectares, sob condições otimizadas de solo, incluindo água e fertilidade.

Encontram-se na literatura duas definições mais comuns para evapotranspiração de referência: uma re-

lacionada com a cultura de referência grama (E_{To}) e outra com a cultura de referência alfafa (E_{Tr}). DOORENBOS & PRUITT (1975) definiram E_{To} como sendo a evapotranspiração que ocorre em uma extensa superfície de grama, com porte de 8 a 15 cm, em crescimento ativo, cobrindo totalmente o solo e sem restrição de água. Por sua vez, JENSEN (1973) definiu E_{Tr} como sendo a evapotranspiração que se verifica em uma cultura de alfafa, com 30 a 50 cm de altura, e bordadura mínima de 100 m, cultivada sem deficiência hídrica.

Embora se reconheça que a alfafa possua características aerodinâmicas mais representativas da maioria das culturas agronômicas do que a grama, esta última é mais utilizada pelo simples fato de a grande maioria das estações agrometeorológicas serem gramadas (JENSEN, 1973; SMITH 1991). Outro ponto favorável à grama é que ela se adapta mais facilmente a diferentes condições climáticas do que a alfafa.

Apesar desta preferência pela grama, autores como JENSEN (1973) e WRIGTH (1982) têm desenvolvido intensa experimentação tomando a alfafa como cultura de referência. BURMAN et al. (1983) e CUENCA (1989) alertam para a necessidade de não se confundir as metodologias de cálculo utilizadas, uma vez que os coeficientes de cultura e a cultura de referência mantêm estreita relação funcional.

Procurando superar estas dificuldades, SMITH (1991) propôs que se adote uma definição padronizada

para a evapotranspiração de referência, com vistas, principalmente, à utilização do modelo de Penman-Monteith. A evapotranspiração de referência seria aquela que ocorre em uma cultura hipotética, apresentando as seguintes características fixas: altura de 12 cm, resistência do dossel de 69 s m^{-1} e poder refletor (albedo) de 23%.

Esta definição é basicamente a proposta por DOORENBOS & PRUITT (1975), com a vantagem de não apresentar ambiguidades quanto à umidade do solo, dimensões da área-tampão e, principalmente, quanto à espécie vegetal de referência.

Pelas definições anteriores, depreende-se facilmente que tanto a evapotranspiração da cultura (ETc) quanto a de referência (ETo ou ETr), ocorrem na forma máxima ou potencial, como salientado por CUENCA (1989) e PEREIRA (1992).

Um dos procedimentos mais utilizados na estimativa das necessidades de água dos cultivos envolve um processo que se desenrola em duas etapas. Na primeira, uma equação empírica ou semi-empírica é utilizada para estimar a evapotranspiração de uma cultura de referência, normalmente ETo ou ETr; na segunda, a evapotranspiração de cultura (ETc) é obtida pela multiplicação de ETo ou ETr por um coeficiente de cultura (Kc) empírico (JENSEN, 1973; DOORENBOS & PRUITT, 1975).

De acordo com SMITH (1991), um enfoque alternativo mais vantajoso estaria em conduzir o processo de

estimativa de ET_c em uma só etapa, descartando-se a utilização dos coeficientes de cultura. Para tanto, sugere que o modelo de Penman-Monteith seja adotado como padrão, mediante utilização de valores adequados de resistência aerodinâmica e de resistência do dossel, específicas para cada cultura.

No entanto, a adoção imediata desta sistemática simplificadora esbarra nas dificuldades de se conseguir valores experimentais confiáveis para a resistência do dossel, considerando-se os diferentes estádios do ciclo vegetativo das culturas e as condições de umidade do solo (SMITH, 1991). Apesar destas dificuldades, este autor propõe que a evapotranspiração de referência seja estimada pelo modelo de Penman-Monteith, considerado superior aos demais.

A evapotranspiração potencial pode ser determinada de diferentes maneiras. De acordo com BURMAN et al. (1983), ela pode ser estimada a partir de medidas diretas ou de informações climáticas. No primeiro grupo, entre outros, estão incluídos os diferentes tipos de lisímetro e o balanço de água no solo; enquanto no segundo, estão enquadrados os modelos teóricos e empíricos, como os de PENMAN (1948), THORNTHWAITE (1948), BLANEY & CRIDDLE (1950), JENSEN & HAISE (1963), PRIESTLEY & TAYLOR (1972), HARGREAVES (1977) entre outros e, também, evaporímetros como o tanque Classe A.

Estes métodos, embora estimem a evapotranspiração potencial, necessariamente não estimam a mesma coisa. Assim, de acordo com BURMAN (1985), o modelo de Jensen-Haise estima a evapotranspiração de referência para alfafa (ET_r), enquanto o método de Hargreaves faz o mesmo para a grama (ET_o).

Procurando sistematizar os procedimentos para estimativa da evapotranspiração de referência para grama ET_o, DOORENBOS & PRUITT (1975) selecionaram os métodos de Penman, de Blaney-Criddle, da radiação e do tanque Classe A, calibrando-os com os valores medidos da evapotranspiração de grama, coletados em lisímetros, nos mais diferentes climas e regiões. Segundo estes pesquisadores, o método de Penman é o que melhor estima ET_o, seguido do tanque Classe A.

O método de Penman é amplamente utilizado porque facilita o entendimento dos processos físicos da evaporação de superfícies naturais e, também, porque se utiliza de informações meteorológicas coletadas em um único nível acima da superfície evaporante (THOM & OLIVER, 1977; BRUTSAERT, 1982; LUCHIARI Jr., 1988).

Nas condições brasileiras este modelo, nas suas diferentes versões, tem sido muito utilizado para determinação de ET_o, como pode ser visto em CAMARGO (1966), ORTOLANI et al. (1966), VILLA NOVA (1967), VILLA NOVA & OMETTO (1981), BARBIERI (1981), SEDIYAMA (1987), SILVA (1989), PERES & SCÁRDUA (1991) e LIMA (1991).

A fórmula original de Penman foi desenvolvida para estimar os valores médios mensais da evaporação de uma superfície de água livre (E_o), a partir de registros climatológicos padronizados como radiação solar, velocidade do vento, temperatura e umidade, coletados em um único nível. Para relacionar E_o à evaporação verificada em uma "vegetação verde, de porte baixo, cobrindo totalmente o solo e sem qualquer restrição hídrica", ou seja, E_{To} , PENMAN (1949) determinou fatores empíricos (f) da seguinte ordem de grandeza: $f = 0,80$ para o verão; $f = 0,60$ para o inverno e $f = 0,75$ como valor médio anual, que permitem transformar E_o em E_{To} através da expressão: $E_{To} = f \cdot E_o$.

Apesar do modelo original de Penman apresentar formidável desenvolvimento teórico e ser basicamente físico, o mesmo não deixa de ser empírico, visto que incorpora em sua estrutura a função velocidade do vento, relativa ao termo aerodinâmico da equação (MONTEITH, 1985). Como a função velocidade do vento original aplica-se a uma superfície de água livre, DOORENBOS & PRUITT (1975), a partir de medidas realizadas em lisímetros nas mais diferentes condições geográficas e climáticas, calibraram-na para grama, tornando-a de uso universal para estimativa de E_{To} . A maioria das versões conhecidas da equação original de Penman resulta de alterações feitas na sua função velocidade do vento.

Para aplicação do modelo original de Penman, duas condições devem ser assumidas. Primeira, que as

fontes e sumidouros de calor sensível e latente ocorram em um mesmo plano, a lâmina de uma folha por exemplo. Segunda, que a pressão do vapor d'água na superfície evaporante seja igual à pressão de saturação do vapor d'água à temperatura desta superfície.

Segundo THOM (1975), o fluxo de calor sensível é originado a partir da superfície das folhas, enquanto o fluxo de calor latente tem sua origem na evaporação da água líquida existente nos espaços intercelulares da folha. De acordo com OKE (1992), a segunda condição de aplicação do modelo dificilmente é encontrada na maioria das superfícies evaporantes.

Pelo exposto, verifica-se que o modelo original de Penman não é um caso geral para estimativa da evapotranspiração, mas sim um caso muito particular aplicado a superfícies de água livre, como um lago ou tanque Classe A, ou a superfícies molhadas, como uma vegetação após uma chuva ou irrigação por aspersão (MONTEITH, 1965; THOM, 1975; MONTEITH, 1980; BRUTSAERT, 1982; MONTEITH, 1985; OKE, 1992). A expressão "superfície molhada" significa que a superfície está coberta por um camada infinitesimal de água (van BAVEL, 1967; MONTEITH & UNSWORTH, 1990).

Muitos pesquisadores procuraram superar esta falta de generalidade da fórmula de Penman, cabendo a MONTEITH (1965) a obtenção de uma equação geral válida para qualquer tipo de vegetação, sob qualquer condição de

estresse hídrico. Ele generalizou o modelo de Penman através de uma analogia com a Lei de Ohm para os circuitos elétricos, introduzindo no termo aerodinâmico duas resistências à transferência do vapor d'água: a resistência do dossel (r_c) e a resistência aerodinâmica (r_a). A primeira, como descritora das características fisiológicas da planta e a segunda, do papel da turbulência atmosférica no processo de transporte do vapor d'água (OKE, 1992). O modelo assim desenvolvido passou a ser denominado de Penman-Monteith.

A superioridade do modelo de Penman-Monteith em relação às demais formas derivadas da equação original de Penman está em que ele leva em conta, além da resistência aerodinâmica à difusão turbulenta do calor sensível e do vapor d'água, a resistência estomática ao transporte do vapor d'água (ALLEN et al, 1992). Segundo BRUIN & HOLTSLAG (1982), este modelo constitui-se na mais completa expressão teórica para partição da radiação líquida disponível em uma superfície vegetada, em termos de calor sensível e latente.

No aspecto operacional, este modelo leva vantagens sobre os demais por ser o único que permite estimar, além da evapotranspiração potencial, a evapotranspiração real bastando, para tanto, se contar com uma relação funcional entre a resistência do dossel e o potencial de água no solo (GRANT, 1975; MONTEITH, 1980; HATFIELD, 1988; BEN-ASHER et al., 1989).

Um dos desafios do início dos anos 60 era desenvolver um método que considerasse os processos de transferência em um estômato e na atmosfera interna do dossel, ou seja, que superasse a distância de conhecimento científico entre o comportamento de uma folha e o dossel de uma planta. A solução foi a encontrada por MONTEITH (1965), que assumiu que as trocas de calor sensível e latente (vapor d'água) entre o dossel e a atmosfera ocorrem em uma superfície plana arbitrária, localizada no mesmo nível do sumidouro do fluxo de momento, isto é, o nível $d + z_o$, onde d = deslocamento do plano zero do perfil do vento e z_o = comprimento de rugosidade da vegetação.

Este modelo é freqüentemente denominado de "modelo da folha grande", porque a superfície virtual anterior é considerada como possuidora das propriedades fisiológicas de todas as folhas do dossel (LHOMME, 1991; KROON & BRUIN, 1993). De acordo com KROON & BRUIN (1993), nenhum processo no interior do dossel é levado em consideração.

TANNER (1968) apresentou objeções teóricas ao "modelo da folha grande", argumentando que as fontes e sumidouros para calor sensível, latente e fluxo de momento podem não estar a um mesmo nível de referência, ou seja, o modelo não leva em consideração a distribuição espacial destes fluxos. Acrescentou, ainda, que as boas correlações entre a resistência estomática e a resistência do dossel derivadas por MONTEITH (1965) são apenas fortuitas.

O modelo de Penman-Monteith, embora tenha uma formulação teórica rigorosamente física, ser de fácil entendimento e demandar para a sua utilização de informações climatológicas padronizadas, normalmente coletadas em estações meteorológicas padrões, tem sua aplicação prática limitada pelas dificuldades de se obter valores confiáveis e representativos para a resistência do dossel, conforme relatado por NORMAN & CAMPBELL (1983), MONTEITH (1985), LUCHIARI Jr. (1988), HATFIELD (1988), VILLA NOVA & REICHARDT (1989), LUCHIARI Jr. & RIHA (1991) e OKE (1992). Autores como BEN-ASHER et al. (1989) afirmam que o modelo de Penman-Monteith será de pouco valor prático, a não ser que a resistência do dossel venha a ser parametrizada a partir de propriedades conhecidas e de fácil mensuração da planta, do solo e da atmosfera.

Esta dificuldade operacional faz com que este modelo seja utilizado principalmente como uma ferramenta para estimativa da resistência do dossel, quando a evapotranspiração é conhecida e não, como seria desejável, a situação inversa (RUSSELL, 1980; JACKSON et al., 1981; JOHNS et al., 1983; MONTEITH, 1985; ZHANG & LEMEUR, 1992).

As dificuldades para se estimar a resistência do dossel decorrem do fato dela ser uma função composta de muitos fatores ambientais e biológicos, tais como radiação solar, déficit de saturação de vapor d'água, disponibilidade de água no solo, índice de área foliar (IAF),

idade da planta, entre outros, cujos efeitos individuais não são fáceis de serem isolados (MONTEITH, 1985).

A estimativa da resistência do dossel pode ser feita a partir de medidas diretas da resistência estomática média, através de porômetros de difusão, e do índice de área foliar da planta, estimado por amostragem. No entanto, esta é uma tarefa árdua e trabalhosa e, por esta razão, dentro dos limites dos erros experimentais, a resistência do dossel pode ser determinada como resíduo da aplicação do modelo de Penman-Monteith, desde que se conheça a evapotranspiração (lisímetros, razão de Bowen...) e as variáveis climáticas envolvidas no processo, assegurando-se, ainda, que a evaporação do solo seja desprezível. (MONTEITH, 1980; SHARMA, 1983; MONTEITH, 1985; LUCHIARI Jr., 1988; LUCHIARI Jr. & RIHA, 1991; OKE, 1992).

Segundo ALLEN (1986) e ALLEN et al. (1989), a resistência do dossel para uma cultura bem irrigada pode ser obtida dividindo-se a resistência estomática mínima, medida em folhas individuais por meio de porômetros de difusão, pela metade do índice de área foliar (IAF). De acordo eles, este ajustamento do IAF serve para levar em conta o fato de somente a parte superior de uma cultura densa ser ativa no transporte de calor sensível e vapor d'água e na absorção da radiação solar. MONTEITH (1981) e SHARMA (1983) sugerem que a resistência estomática mínima é da ordem de 100 s m^{-1} . Segundo MONTEITH (1985), os valores da resistência do dossel assim obtidos são equivalen-

tes aos estimados pelo método residual, através da aplicação do modelo de Penman-Monteith.

Evidências experimentais têm mostrado que ocorre melhoria nas estimativas da evapotranspiração pelo modelo de Penman-Monteith, quando se adota valores da resistência do dossel variáveis com a radiação líquida disponível. Esta variação leva em consideração os efeitos de intensidade da luz solar e o comprimento do dia (ALLEN, 1986).

O modelo de Penman-Monteith torna-se semelhante ao original de Penman, quando se faz $r_c = 0 \text{ s m}^{-1}$ e se substitui a função velocidade do vento pelo inverso da resistência aerodinâmica. Neste caso, ele serve para estimar a evaporação de uma superfície de água livre, que não é o caso da evapotranspiração potencial das culturas. Estas, mesmo sob condições ótimas de umidade, apresentam uma resistência do dossel mensurável, diferente de zero, sendo naturalmente denominada de resistência do dossel à evapotranspiração potencial (JACKSON et al., 1981; JACKSON, 1983; MONTEITH, 1985).

Contrariamente a esta afirmação, van BAVEL (1967) observou que até um potencial matricial de 4 bar a evapotranspiração da alfafa ocorreu à taxa potencial, indicando não haver controle do consumo de água pelos estômatos da planta, implicando em que $r_c \cong 0 \text{ s m}^{-1}$. Esta evidência experimental foi ratificada por van BAVEL & EHRLER (1968) e JOHNS et al. (1983). SLABBERS (1977) utilizou

$r_c = 0 \text{ s m}^{-1}$ para estimar a evapotranspiração potencial de várias culturas agrícolas, obtendo boa correlação com os valores medidos em lisímetros de drenagem.

Os valores conhecidos de r_c para as diferentes culturas estão ao redor de 20 s m^{-1} para solos próximos à capacidade de campo, aumentando à medida que a umidade do solo diminui. Este fato evidencia a necessidade de se pesquisar o comportamento desta resistência em função da disponibilidade de água no solo. Esta parametrização de r_c , para condições ótimas e de restrição de água no solo, permitirá que se estime a evapotranspiração real diretamente a partir do modelo de Penman-Monteith (HATFIELD, 1988).

MONTEITH (1985) sugere que se adote $r_c = 50 \text{ s m}^{-1}$ para a determinação da evapotranspiração potencial das plantas cultivadas. Este valor concorda com os apresentados por OKE (1992), listados a seguir: grama 70 s m^{-1} , culturas agrícolas 50 s m^{-1} e florestas 80 a 150 s m^{-1} .

Trabalhando com 9 culturas irrigadas, O'TOOLE & REAL (1986) encontraram valores de r_c variando de 14 s m^{-1} (arroz) até 69 s m^{-1} (figueira), sendo que 7 das culturas estudadas apresentaram r_c entre 32 e 69 s m^{-1} .

Para a cultura do trigo irrigado na região de Planaltina-DF, LUCHIARI Jr. & RIHA (1991) encontraram que r_c variou de 50 a 100 s m^{-1} no dia imediatamente ante-

rior à irrigação, enquanto a variação foi de 15 a 50 s m^{-1} um dia após. Em ambos os casos, r_c cresceu rapidamente a partir do meio da tarde, chegando a valores superiores a 200 s m^{-1} após as 16 horas.

RUSSELL (1980), trabalhando com cevada e pastagem durante 3 anos, no verão, encontrou que r_c teve grande variação nesse período, oscilando de 15 a 200 s m^{-1} , sendo maior nos anos mais secos e crescente à medida que as plantas amadureciam.

Também com cevada, GRANT (1975) observou que no início da implantação da cultura, quando esta não cobria totalmente o solo, r_c foi da ordem de 100 s m^{-1} , valor este também verificado quando a cultura entrou em fase de amadurecimento. No intervalo destas condições, quando a cultura cobria totalmente o solo, determinou-se $r_c = 35 \text{ s m}^{-1}$.

BRUIN & HOLTSLAG (1982) determinaram a resistência do dossel para grama em duas condições climáticas, normal e seca, e verificaram que r_c variou consideravelmente na faixa de 20 a 280 s m^{-1} . No período normal, r_c teve um valor típico de 60 s m^{-1} , enquanto no seco esta variação foi de 100 a 260 s m^{-1} .

JOHNS et al. (1983), trabalhando com grama sob condições ambientais controladas e solo na capacidade de campo, encontrou que ETo foi mais influenciada pelas condições ambientais do que pelas condições fisiológicas da planta. Para grama com altura média de 5,0, 6,5 e 8,0

cm os valores médios de r_c foram, respectivamente, de 40, 30 e 15 s m^{-1} , ou seja, diminuíram à medida que a área foliar aumentou.

Numa cultura de soja, BAYLEY & DAVIES (1981) observaram que r_c variou exponencialmente com a radiação global. Sob condições não restritivas de água no solo, eles encontraram valores de r_c entre 25 e 50 s m^{-1} , até quando a radiação global foi igual ou superior a 200 $W m^{-2}$ ($\cong 400$ cal $cm^{-2} dia^{-1}$). Abaixo deste valor, r_c cresceu exponencialmente com a diminuição da disponibilidade de energia.

HATFIELD (1985) observou que a resistência do dossel para trigo diminui exponencialmente com o aumento da radiação global incidente. Para valores de radiação global entre 500 e 200 cal $cm^{-2} dia^{-1}$ ($\cong 250$ a 100 $W m^{-2}$), r_c variou de 74 a 132 s m^{-1} .

Uma vez bem estabelecido o valor da resistência do dossel (r_c), o modelo de Penman-Monteith tem se mostrado superior aos demais métodos combinados na estimativa da evapotranspiração potencial, para uma ampla variedade de climas e localidades (SLABBERS, 1977; van ZYL & JAGER, 1987; ALLEN et al., 1989; SMITH, 1991; LUCHIARI Jr. & RIHA, 1991).

Adotando $r_c = 0$ s m^{-1} para definir que a evapotranspiração se dava à taxa máxima, SLABBERS (1977) estimou as necessidades de água da beterraba, girassol, alfafa e trigo pelo modelo de Penman-Monteith. Foi obtida

boa correlação entre os valores estimados e os medidos em lisímetros de drenagem e pelo balanço de água no solo. O autor realça a importância de se considerar nos métodos combinados a rugosidade da cultura, especialmente para culturas relativamente altas.

LUCHIARI Jr. & RIHA (1991) utilizaram este modelo para estimar a evapotranspiração do trigo nas condições edafoclimáticas do Planalto Central brasileiro, encontrando que os valores estimativos foram cerca de 6% superiores aos medidos pela razão de Bowen, com os quais foram altamente correlacionados, em termos horários e diários.

Uma função relacionando a resistência do dossel ao índice de área foliar e ao déficit de umidade no solo foi derivada por GRANT (1975). Utilizando esta relação funcional no modelo de Penman-Monteith, este autor obteve boa concordância com os valores medidos diretamente em lisímetros de pesagem e pela razão de Bowen.

Treze métodos combinados foram testados por ALLEN (1985) na estimativa da evapotranspiração de referência para grama (ET_o) e alfafa (ET_r), em duas localidades de climas opostos - árido e úmido - e comparados os resultados com leituras lisimétricas locais. O modelo de Penman, com a função velocidade do vento calibrada para as condições locais por WRIGHT (1982), apresentou desempenho ligeiramente superior ao de Penman-Monteith, no qual foi utilizada uma resistência do dossel $r_c = 50 \text{ s m}^{-1}$. No en-

tanto, ambos tiveram comportamento estimativo muito superior ao método de Penman com a função velocidade do vento calibrada por DOORENBOS & PRUITT (1975). Quando foi utilizada uma $r_c = 0 \text{ s m}^{-1}$ no modelo de Penman-Monteith os resultados obtidos não apresentaram boa correlação com os medidos.

Van ZYL & JAGER (1987), conduzindo experimentação com trigo sob condições ótimas de umidade e utilizando o modelo de Penman-Monteith com $r_c = 33 \text{ s m}^{-1}$ para estimativa da evapotranspiração potencial, obtiveram alta correlação com os valores medidos em lisímetros. Observaram, também, que o modelo foi insensível à correção da estabilidade atmosférica, fato também observado por LUCHIARI Jr. (1988).

ALLEN (1986) testou 10 variações da equação de Penman, em três localidades de características climáticas distintas, desde o árido ao úmido, nas quais estavam disponíveis 3 anos de registros climatológicos e de evapotranspiração de referência (ET_o e ET_r) obtidos em lisímetros de pesagem de alta precisão. O modelo de Penman-Monteith, no qual foram utilizados para a resistência do dossel valores variáveis em função da radiação solar líquida e do índice de área foliar, foi o que estimou ET_o com maior precisão, em termos mensais e estacionais. Nesta situação, a resistência média do dossel foi de 70 s m^{-1} , para um gramado com 12 cm de altura. Quando se adotou $r_c = 0 \text{ s m}^{-1}$ as estimativas fornecidas pelo modelo, ape-

sar de boas, foram menos precisas que as anteriores. De qualquer forma, para todos os métodos analisados, as determinações mensais apresentaram maior variabilidade do que as estacionais.

ALLEN et al. (1989) investigaram 5 variantes da equação de Penman utilizando informações climatológicas e lisimétricas de 11 localidades diferentes situadas em latitudes variando de 56°S (Austrália), passando por 0°N (Zaire), até 56°N (Dinamarca) e altitudes na faixa de -30 a 2770 m, abrangendo diferentes condições de clima, desde o árido até o úmido. O método de Penman-Monteith foi o que forneceu as estimativas mais consistentes de ET_0 ($r_c = 69 \text{ s m}^{-1}$) e de ET_r ($r_c = 45 \text{ s m}^{-1}$), em termos diários e mensais, seguido pelo de Penman, com função velocidade do vento calibrada por WRIGHT (1982).

No geral, a incorporação dos efeitos da área foliar e da altura da vegetação, através da resistência aerodinâmica e resistência do dossel, no modelo de Penman-Monteith, faz com este modelo estime com maior precisão a evapotranspiração potencial para uma ampla variedade de climas e localidades. Outro aspecto que deve ser destacado é que os valores de resistência do dossel calculados pelos algoritmos apresentados por ALLEN (1986) devem ser utilizados para períodos iguais ou superiores ao diário. Saliente-se, também, que os valores estimados e medidos da evapotranspiração são muito sensíveis a altura do dossel (ALLEN et al., 1989; ALLEN et al., 1992).

Nas condições brasileiras, a utilização do modelo de Penman-Monteith é bastante restrita e recente, podendo ser destacados os trabalhos desenvolvidos por FOLEGATTI (1988); AGUIAR NETTO et al. (1993); AZEVEDO et al. (1993) e SANTOS et al. (1993).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Material

3.1.1. Evapotranspiração de referência medida (ET_o)

Esta pesquisa foi realizada a partir de dados experimentais coletados em evapotranspirômetros do tipo Thornthwaite instalados nas estações experimentais do Instituto Agronômico de Campinas (IAC) localizadas em Campinas (22°54'S; 47°04'W; 670m), Ribeirão Preto (21°11'S; 47°48'W; 620m) e Pindamonhangaba (22°58'S; 45°25'W; 570m) (CAMARGO, 1966).

Segundo a classificação climática de Köppen, Campinas possui clima Cwa, subtropical com inverno seco; Ribeirão Preto tem clima Aw, tropical com inverno seco; e Pindamonhangaba apresenta clima do tipo Cwb, temperado com inverno seco.

De acordo com CAMARGO (1966), em cada localidade acima foi instalada uma bateria de 3 evapotranspirometros, constituídos de caixas de cimento-amianto com $0,54 \text{ m}^2$ de área livre e 0,60 m de profundidade. As caixas foram enterradas de forma a manter uma borda de 8 cm acima do nível do terreno, evitando-se, assim, a entrada de água oriunda de escoamento superficial, seja das chuvas ou irrigações. As caixas foram enchidas com a mesma terra das covas onde foram enterradas, mantendo-se a mesma ordem da camada superficial de 20 cm. A terra de enchimento foi bem peneirada, visando a sua homogeneização e retirada de material grosseiro. Para facilitar o processo de drenagem, foi colocado em cada caixa uma camada de 8 cm de pedra britada e, sobre esta, uma fina camada de areia grossa. A água drenada era coletada em um fosso próximo aos evaporímetros.

Tanto os lisímetros quanto as áreas circunvizinhas foram vegetadas com grama batatais (*Paspalum notatum flügge*), mantida com altura adequada através de cortes periódicos. Uma bordadura com aproximadamente 10 m foi mantida de cada lado dos evapotranspirometros, e adequadamente irrigados de modo a propiciar condições à obtenção da evapotranspiração potencial.

No início, os lisímetros eram irrigados diariamente pela superfície, sendo que, após um período de adaptação, as irrigações passaram a ser feitas em dias alternados, utilizando-se de um volume de água suficiente

para promover uma pequena drenagem. Esta técnica permitiu manter o solo com umidade próxima da capacidade de campo, o que era monitorado por meio de tensiômetros instalados a diferentes profundidades nas caixas.

Como pode ser concluído, as informações coletadas nos evapotranspirômetros representam, de fato, a evapotranspiração potencial de referência (ET_o), como definido por DOORENBOS & PRUITT (1975). O cálculo de ET_o foi feito através da equação de conservação de massa:

$$ET_o = I + P - D \pm \Delta S$$

onde: I = irrigação; P = precipitação ; D = drenagem; e ΔS = variação do armazenamento de água. Como a irrigação era freqüente e o solo foi mantido praticamente na capacidade de campo, a variação do armazenamento pode ser considerada desprezível, ou seja, $\Delta S \cong 0$.

A evapotranspiração foi coletada em bases decadiárias e, posteriormente, processada em termos mensais, visto o equipamento utilizado não possuir sensibilidade para obtenção de valores diários. Para os efeitos desta pesquisa, os dados originais foram submetidos a uma triagem, descartando-se aqueles considerados suspeitos.

Estas informações experimentais já foram objeto de estudos desenvolvidos anteriormente por FERREIRA (1972), VILLA NOVA & OMETTO (1981), PEREIRA & CAMARGO (1989), PEREIRA (1990) e LIMA (1991).

3.1.2. Obtenção dos dados climáticos

As informações climáticas utilizadas neste trabalho foram coletadas (leituras às 7, 14 e 21 horas) pela Seção de Climatologia Agrícola, do Instituto Agronômico de Campinas (IAC), nas localidades anteriormente descritas, e processadas de acordo com suas normas e procedimentos. Faz exceção, o cálculo da temperatura média diária, aqui definida como sendo a média entre as temperaturas máxima e mínima diária.

3.2. Métodos

3.2.1. Cálculo dos parâmetros climáticos

A palavra padronização é fundamental no processo de revisão da metodologia proposto pela FAO. Para se atingir a uniformização dos procedimentos de trabalho, foram desenvolvidos algoritmos para cálculo dos diferentes parâmetros climáticos, tomando-se como base sua aceitação geral e simplicidade de uso. Alguns parâmetros tiveram seu valor fixado com base em sua validade global.

Os algoritmos a seguir, com exceção do utilizado para cálculo da radiação líquida, estão apresentados em SMITH (1991).

3.2.1.1. Calor latente de vaporização (λ)

O calor latente de vaporização da água é uma função linear da sua temperatura:

$$\lambda = 2,501 - (2,361 \cdot 10^{-3}) T \quad (1)$$

onde: λ = calor latente de vaporização (MJ kg^{-1}).

T = temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$).

Como o calor latente de vaporização varia muito pouco com a temperatura, será adotado um valor único, tomando-se $T = 20^{\circ}\text{C}$ como padrão, $\lambda = 2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$.

3.2.1.2. Tangente à curva da pressão de saturação do vapor d'água (Δ)

A tangente à curva da pressão de saturação do vapor d'água em função da temperatura pode ser

calculada pela expressão:

$$\Delta = \frac{4098e_s}{(T+237,3)^2} \quad (2)$$

onde: Δ = tangente à curva de pressão de saturação do vapor d'água no ponto dado pela temperatura média do ar ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$).

T = temperatura média diária do ar ($^\circ\text{C}$).

e_s = pressão de saturação do vapor d'água à temperatura média diária do ar (kPa).

3.2.1.3. Pressão atmosférica (P)

A pressão atmosférica pode ser obtida pela seguinte relação termodinâmica:

$$P = P_o \left[\frac{T_o - \alpha Z}{T_o} \right]^{g/\alpha R} \quad (3)$$

onde: P = pressão atmosférica na altitude Z (kPa).

P_o = pressão atmosférica ao nível do mar (Z_o)
($P_o = 101,3 \text{ kPa}$).

Z = altitude do local (m).

g = aceleração da gravidade terrestre
($g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$).

R = constante universal dos gases
($R = 287 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$).

T_o = temperatura absoluta do ar em Z_o (K).

Utilizando-se a expressão $T_o = 273,16 + T$, onde

T = temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$) e assumindo-se que $T = 20^{\circ}\text{C}$ em Z_o , obtém-se que $T_o = 293,16$ K.

α = gradiente adiabático do ar saturado ($\alpha = 0,0065 \text{ K m}^{-1}$).

Para se evitar cálculos excessivos, tomou-se um valor médio $Z = 620$ m para a altitude das três localidades.

Substituindo-se estes valores em (3) resulta que $P = 94,19$ kPa.

3.2.1.4. Constante psicrométrica (γ)

A constante psicrométrica sem ventilação forçada foi calculada através da expressão:

$$\gamma = 10^{-9} \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda} \quad (4)$$

onde: γ = constante psicrométrica (kPa $^{\circ}\text{C}^{-1}$).

c_p = calor específico do ar à pressão constante ($c_p = 1,013 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$).

P = pressão atmosférica ($P = 94,19$ kPa).

ε = razão entre o peso molecular do vapor d'água e do ar atmosférico seco ($\varepsilon = 0,622$).

λ = calor latente de vaporização ($\lambda = 2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$).

Substituindo-se estes valores na expressão (4) obtém-se $\gamma = 0,0623 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$.

3.2.1.4.1. Constante psicrométrica modificada (γ^*)

Segundo MONTEITH (1965), a constante psicrométrica modificada pode ser calculada pela fórmula:

$$\gamma^* = \gamma \left[1 + \frac{r_c}{r_a} \right] \quad (5)$$

onde: γ^* = constante psicrométrica modificada ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$).

γ = constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$).

r_c = resistência do dossel (s m^{-1}).

r_a = resistência aerodinâmica (s m^{-1}).

Substituindo-se na expressão (5) os valores padronizados de $r_c = 69 \text{ s m}^{-1}$ (eq. 22) e $r_a = \frac{208}{U_2} \text{ s m}^{-1}$ (eq. 20), para o padrão grama, se tem que:

$$\gamma^* = \gamma (1 + 0,332 U_2) \quad (6)$$

onde: U_2 = velocidade média diária do vento medida a 2 m de altura (m s^{-1}).

3.2.1.5. Massa específica do ar (ρ)

A massa específica do ar atmosférico pode ser calculada através da equação dos gases ideais:

$$\rho = \frac{P}{T_v R} \quad (7)$$

onde: ρ = massa específica do ar (kg m^{-3}).

P = pressão atmosférica (P = 94,19 kPa).

R = constante universal dos gases
(R = 0,287 kJ $\text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$).

T_v = temperatura virtual do ar (K).

Segundo SMITH (1991), a temperatura virtual pode ser aproximada pela seguinte expressão:

$$T_v = T + 275 \quad (8)$$

onde: T = temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$).

Substituindo-se os valores anteriores na equação (7), resulta em:

$$\rho = \frac{3182}{(T+275)} \text{ kg m}^{-3} \quad (9)$$

3.2.1.6. Pressão de saturação do vapor d'água (e_s)

A pressão de saturação do vapor d'água atmosférico pode ser estimada em função da temperatura pela equação:

$$e_s = 0,6108 \exp \left(\frac{17,27 T}{T + 237,3} \right) \quad (10)$$

onde: e_s = pressão de saturação do vapor d'água (kPa).

T = temperatura média diária do ar ($^{\circ}\text{C}$).

3.2.1.7. Pressão atual do vapor d'água (e_a)

A pressão atual de vapor pode ser calculada conhecendo-se a temperatura e a umidade relativa do ar, ou seja:

$$e_a = e_s \frac{UR}{100} \quad (11)$$

onde: e_a = pressão atual do vapor d'água (kPa).

UR = umidade relativa média diária do ar (%).

3.2.1.8. Velocidade do vento (U_2)

O ajustamento da velocidade do vento obtida por instrumentos colocados a alturas diferentes da padrão ($z = 2$ m) deve levar em consideração a rugosidade da superfície. Admitindo-se que o perfil vertical da velocidade do vento seja logarítmico, a velocidade a 2 m de altura pode ser calculada através da relação:

$$U_2 = U_z \frac{\ln \left(\frac{2 - d}{z_{om}} \right)}{\ln \left(\frac{z - d}{z_{om}} \right)} \quad (12)$$

onde: U_2 = velocidade do vento à altura padrão de 2 m (m s^{-1}).

U_z = velocidade do vento à altura z (m s^{-1}).

d = deslocamento do plano zero do perfil do vento (m).

z_{om} = comprimento de rugosidade equivalente para transferência de momento (m).

z = altura na qual o vento foi medido (m).

Os valores de d e z_{om} devem ser referenciados a rugosidade da grama, como pode ser visto nas equações (16) e (17) adiante.

3.2.1.9. Radiação solar líquida (R_n)

A radiação solar líquida (R_n) foi estimada através das equações desenvolvidas por OMETTO (1981) para as condições do Estado de São Paulo. Foram consideradas duas épocas do ano: primavera-verão (PV), abrangendo os meses de outubro a março, e outono-inverno (OI), relativa aos meses de abril a setembro. Estas equações foram obtidas através de análise de regressão linear simples, a partir de valores medidos da radiação solar líquida (R_n) e da razão de insolação (n/N), e valores tabelados da radiação solar global na ausência da atmosfera (Q_o).

. primavera-verão (PV)

$$R_n = Q_o \left[0,17 + 0,22 \frac{n}{N} \right] \quad (13)$$

. outono-inverno (OI)

$$R_n = Q_o \left[0,15 + 0,12 \frac{n}{N} \right] \quad (14)$$

onde: R_n = radiação solar líquida na superfície do solo ($\text{cal cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

Q_o = radiação solar global na ausência de atmosfera, obtida em tabelas astronômicas em função da época do ano e da latitude ($\text{cal cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$).

n = número de horas de insolação medida em heliógrafo (h).

N = número máximo de horas de insolação, obtido em tabelas astronômicas em função da época do ano e da latitude (h).

Para conversão dos valores de R_n em $\text{cal cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ para $\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ e mm dia^{-1} podem ser utilizadas as seguintes equivalências de unidade:

$$. 1 \text{ cal cm}^{-2} \text{ dia}^{-1} = 0,041868 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$$

$$. 1 \text{ cal cm}^{-2} \text{ dia}^{-1} = \frac{1}{59} \text{ mm dia}^{-1}$$

3.2.2. Estimativa da resistência aerodinâmica e do dossel

3.2.2.1. Resistência aerodinâmica (r_a)

Segundo ALLEN et al (1989) a resistência aerodinâmica pode ser obtida a partir da seguinte expressão:

$$r_a = \frac{L_n \left(\frac{z_m - d}{z_{om}} \right) \cdot L_n \left(\frac{z_h - d}{z_{oh}} \right)}{K^2 U_z} \quad (15)$$

onde: r_a = resistência aerodinâmica à transferência de calor sensível e vapor d'água ($s\ m^{-1}$).

z_m = altura de medição da velocidade do vento (m).

z_h = altura de medição da temperatura e da umidade do ar (m).

d = deslocamento do plano zero do perfil do vento (m).

z_{om} = comprimento de rugosidade equivalente para transferência de momento (m).

z_{oh} = comprimento de rugosidade equivalente para transferência de calor sensível e latente (m).

K = constante de von Karman ($K = 0,41$).

U_z = velocidade do vento medida à altura z ($m\ s^{-1}$).

De acordo com MONTEITH (1981) e BRUTSAERT (1982) o deslocamento do plano zero (d) pode ser obtido em função da altura média da vegetação, a partir da seguinte expressão:

$$d = \frac{2}{3} h_c \quad (16)$$

onde: h_c = altura média da vegetação (m).

BRUTSAERT (1982) sugere que o comprimento de rugosidade equivalente para transferência de momento (z_{om}) pode ser estimado em função da altura média da vegetação (h_c) de acordo com a expressão:

$$z_{om} = 0,123 h_c \quad (17)$$

onde: h_c = altura média da vegetação (m)

Quanto ao comprimento de rugosidade equivalente para transferência de calor sensível e vapor d'água (z_{oh}), MONTEITH (1981) e BRUTSAERT (1982) propõem sua estimativa a partir de:

$$z_{oh} = 0,1 z_{om} \quad (18)$$

ou

$$z_{oh} = 0,0123 h_c \quad (19)$$

Adotando-se uma altura média $h_c = 0,12$ m para a grama, como sugerido por ALLEN et al. (1989) e SMITH (1991), são obtidas as seguintes relações: $d = 0,08$ m, $z_{om} = 0,01476$ m e $z_{oh} = 0,001476$ m.

Padronizando-se a leitura da velocidade do vento, da temperatura e umidade para uma altura $z = 2$ m e substituindo-se os valores para d , z_{om} e z_{oh} em (15), a resistência aerodinâmica para a grama pode ser obtida pela seguinte expressão:

$$r_a = \frac{208}{U_z} \quad (20)$$

3.2.2.2. Resistência do dossel (r_c)

ALLEN (1986) e ALLEN et al. (1989) sugerem que a resistência do dossel de uma vegetação de referência, sob condições adequadas de umidade e em desenvolvimento vegetativo ativo, pode ser estimada a partir da resistência estomática mínima de uma folha (estômatos abertos) e do índice de área foliar da vegetação. A fórmula proposta é a seguinte:

$$r_c = \frac{r_l}{0,5 \text{ IAF}} \quad (21)$$

onde: r_c = resistência do dossel (s m^{-1}).

r_l = resistência estomática mínima para uma folha.

Segundo MONTEITH (1981) e SHARMA (1983) pode ser adotado um valor $r_l = 100 \text{ s m}^{-1}$.

IAF = índice de área foliar. Segundo ALLEN et al. (1989), quando a vegetação de referência é a grama, o IAF é dado pela expressão:

$$\text{IAF} = 24 h_c \quad (22)$$

onde: h_c = altura média da vegetação (m)

Adotando-se um valor médio $h_c = 0,12 \text{ m}$ para a grama tem-se $\text{IAF} = 2,88$.

Substituindo-se os valores de $r_l = 100 \text{ s m}^{-1}$ e $\text{IAF} = 2,88$ em (21), obtem-se o valor da resistência do dossel padronizado para grama. Assim, $r_c = 69 \text{ s m}^{-1}$.

Baseado em evidências experimentais, ALLEN (1986) sugere que a resistência do dossel pode ser calculada como uma função da radiação solar líquida e do índice de área foliar. Para tanto, apresentou a seguinte fórmula empírica:

$$r_c = \frac{500 - 0,85 R_n}{IAF} \quad (23)$$

onde: r_c = resistência do dossel ($s\ m^{-1}$).

R_n = radiação líquida ($cal\ cm^{-2}\ dia^{-1}$).

IAF = índice de área foliar, calculado segundo equação (22).

Esta equação foi utilizada em complementação à equação (21), buscando a parametrização da resistência do dossel a partir de um elemento climático de fácil obtenção direta ou indiretamente por algoritmos.

3.2.3. Estimativa da evapotranspiração de referência pelo modelo de Penman-Monteith

O desenvolvimento teórico detalhado do modelo de Penman-Monteith pode ser encontrado em MONTEITH (1965, 1981, 1985) e VILLA NOVA & REICHARDT (1989). A apresentação matemática original do modelo é a seguinte:

$$\lambda ETo = \frac{\Delta (R_n - G) + \rho c_p (e_s - e_a) / r_a}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a} \right)} \quad (25)$$

onde: λETo = densidade de fluxo de calor latente,
 R_n = radiação solar líquida na superfície evaporante;
 G = fluxo de calor no solo; λ = calor latente de vaporização;
 Δ = tangente à curva de pressão de saturação do vapor d'água;
 γ = constante psicrométrica; ρ = massa específica do ar atmosférico;
 c_p = calor específico à pressão constante do ar atmosférico;
 e_s = pressão de saturação do vapor d'água;
 e_a = pressão atual do vapor d'água; r_c = resistência do dossel;
 r_a = resistência aerodinâmica.

Uma forma para facilitar o desenvolvimento da equação anterior para cálculo da evapotranspiração de referência consiste em dividi-la em dois termos: da radiação ou energético e aerodinâmico. Assim:

$$EToM = ET_{rad} + ET_{aero} \quad (26)$$

onde: $EToM$ = evapotranspiração de referência para grama, segundo Penman-Monteith (mm dia^{-1}).

ET_{rad} = termo da radiação ou energético (mm dia^{-1}).

ET_{aero} = termo aerodinâmico (mm dia^{-1}).

O termo energético pode ser obtido pela aplicação da seguinte fórmula:

$$ET_{\text{rad}} = \frac{1}{\lambda} \frac{\Delta}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a} \right)} (R_n - G) \quad (27)$$

onde: ET_{rad} = termo energético (mm dia⁻¹).

Δ = tangente à curva de pressão de saturação do vapor d'água no ponto dado pela temperatura média diária do ar (kPa °C⁻¹).

λ = calor latente de vaporização (MJ kg⁻¹).

γ = constante psicrométrica (kPa °C⁻¹).

r_c = resistência do dossel (s m⁻¹).

r_a = resistência aerodinâmica (s m⁻¹).

R_n = radiação solar líquida à superfície evaporante (MJ m⁻² d⁻¹).

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

A ordem de grandeza do fluxo diário de calor no solo, para períodos iguais ou superiores a 10 ou 20 dias, é suficientemente pequena, podendo ser desprezada nos cálculos (JENSEN, 1973; PEREIRA, 1990; SMITH, 1991).

Substituindo-se na equação (27)

$\lambda = 2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$, $\gamma^* = \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a} \right)$ e $G = 0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$:

$$ET_{\text{rad}} = 0,408 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma^*} R_n \quad (28)$$

onde: 0,408 = fator para conversão de unidades (kg MJ⁻¹).

O termo aerodinâmico pode ser calculado pela expressão:

$$ET_{aero} = \frac{86400}{\lambda} \cdot \frac{1}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a} \right)} \cdot \frac{\rho c_p (e_s - e_a)}{r_a} \quad (29)$$

onde: ET_{aero} = termo aerodinâmico (mm dia^{-1}).

86400 = fator para converter a unidade de tempo segundo (s) em dia.

ρ = massa específica do ar atmosférico (kg m^{-3}).

c_p = calor específico do ar atmosférico a pressão constante ($\text{MJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$).

e_s = pressão de saturação do vapor d'água à temperatura média diária do ar (kPa).

e_a = pressão atual do vapor d'água à temperatura média diária do ar (kPa).

Para os demais parâmetros, são válidas as definições e unidades de medidas anteriormente descritas.

Substituindo-se c_p (eq. 4), γ^* (eq. 5) e ρ (eq. 9) na equação (29), resulta em:

$$ET_{aero} = 187340,4 \cdot \frac{\gamma}{\Delta + \gamma^*} \cdot \frac{(e_s - e_a)}{r_a (T+275)} \quad (30)$$

Transportando-se as equações (28) e (30) para a equação (26), e tomando-se como padrão a grama, cuja resistência aerodinâmica é dada por $r_a = \frac{208}{U_2} \text{ s m}^{-1}$, obtem-se a expressão final proposta por SMITH (1991):

$$ET_{oM} = 0,408 \cdot \frac{\Delta}{\Delta + \gamma^*} R_n + \frac{900}{(T+275)} \cdot \frac{\gamma}{\Delta + \gamma^*} (e_s - e_a) U_2 \quad (31)$$

, cujos parâmetros e respectivas unidades já foram definidos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Relativos à evapotranspiração de referência estimada pelo modelo de Penman-Monteith (EToM), padrão FAO.

4.1.1. Periodicidade decadiária.

Nas Tabelas 1, 2 e 3 (Apêndice 1) estão apresentados os valores decadiários da evapotranspiração de referência medida em lisímetro (ETo) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (EToM). Da Tabela 4 constam os parâmetros estatísticos relativos às equações de regressão linear simples entre os valores medidos e estimados da evapotranspiração de referência para as 03 localidades estudadas. Nas Figuras 1, 2 e 3 estão as representações gráficas das correlações entre valores medidos e estimados, tomando-se como referencial a reta 1:1.

Tabela 4: Número de observações (n), coeficiente linear (a), coeficiente angular (b), erro padrão da estimativa (s) e coeficiente de determinação (r^2) para as equações de regressão linear simples entre os valores decadiários da evapotranspiração de referência medida (ETo) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (EToM), em Campinas-SP, Ribeirão Preto-SP e Pindamonhagaba-SP.

EToM = a + b ETo					
	n	a	b	s	r^2
Campinas	142	13,03 ³	0,79 ³	6,36	0,66 ³
R. Preto	138	18,27 ²	0,51 ³	8,72	0,38 ³
Pinda.	99	10,15 ¹	0,59 ³	6,65	0,54 ³

¹ = não significativo a 5% de probabilidade

² = significativo a 5% de probabilidade

³ = significativo a 1% de probabilidade

Figura 1: Evapotranspiração de referência decadiária estimada pelo modelo de Penman-Monteith (EToM) versus a medida em evapotranspirômetros de drenagem (ETo) em relação à reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a 1959.

Figura 2: Evapotranspiração de referência decadiária estimada pelo modelo de Penman-Monteith (EToM) versus a medida em evapotranspirômetros de drenagem (ETo) em relação à reta 1:1. Ribeirão Preto-SP. Período de 1956 a 1959.

Figura 3: Evapotranspiração de referência decadiária estimada pelo modelo de Penman-Monteith (EToM) versus a medida em evapotranspirômetros de drenagem (ETo) em relação à reta 1:1. Pindamonhangaba-SP. Período de 1954 a 1956.

Da observação da Tabela 4 pode se verificar que as estimativas da evapotranspiração de referência ajustaram-se com razoável precisão aos valores medidos, conforme pode ser conferido pelos coeficientes de determinação (r^2) e pelos erros padrões da estimativa (s). Também deve ser observado que a correlação entre os valores estimados e medidos em Campinas-SP mostrou-se bastante estreita, como indicado pelo coeficiente de correlação ($r = 0,81$), bastante elevado e significativo ao nível de 1% de probabilidade, o mesmo não ocorrendo em Pindamonhangaba-SP e Ribeirão Preto-SP.

O melhor ajuste verificado em Campinas-SP pode ser explicado, em parte, pelo fato dos evapotranspirômetros ali instalados terem sido operados com maiores cuidados do que nas outras duas localidades (CAMARGO, 1966). Observe-se que em Ribeirão Preto-SP foi verificado o coeficiente de correlação mais baixo ($r = 0,62$), porém significativo ao nível de 1% de probabilidade, indicando que, apesar de ocorrer correlação direta positiva entre as variáveis envolvidas, o modelo de regressão linear simples obtido explica somente pequena parcela da variação total verificada. LIMA (1991) trabalhando com estes mesmos dados, na escala decadiária, e utilizando uma variação da fórmula de Penman proposta por VILLA NOVA & OMETTO (1981), obteve índice de correlação superior ao aqui citado.

As Figuras 1, 2 e 3 mostram que as estimativas da evapotranspiração de referência em Ribeirão Preto-SP e Pindamonhangaba-SP apresentaram maior dispersão do que aquelas obtidas em Campinas-SP, o que já era previsto pelos coeficientes de determinação e erros padrões da estimativa apresentados na Tabela 4. Observando-se as Figuras 1, 2 e 3 verifica-se que o modelo superestimou a evapotranspiração de referência em Campinas-SP, enquanto que, apesar da maior dispersão verificada nas estimativas, em Pindamonhangaba-SP e Ribeirão Preto-SP, a maioria dos pontos plotados alinhou-se segundo a reta de isovalores, indicando existir um alto grau de concordância entre os valores estimados e medidos de ETo .

O fato do modelo de Penman-Monteith ter superestimado a evapotranspiração de referência medida em Campinas-SP pode ser explicado pela utilização nos cálculos de temperaturas anormalmente elevadas pelo processo de urbanização verificado junto à estação coletora deste parâmetro climático (CAMARGO, 1966).

4.1.2. Periodicidade mensal

Nas Tabelas 5, 6 e 7 (Apêndice 1) estão apresentados os valores mensais da evapotranspiração de referência medida (ETo) e estimada pelos modelos de

Penman-Monteith (ET_{oM}). Da Tabela 8 fazem parte os parâmetros estatísticos relativos às equações de regressão linear simples entre os valores medidos e estimados da evapotranspiração de referência para as 03 localidades estudadas. Nas Figuras 4, 5 e 6 estão as representações gráficas das correlações entre valores medidos e estimados, tomando-se como referencial a reta 1:1.

Tabela 8: Número de observações (n), coeficiente linear (a), coeficiente angular (b), erro padrão da estimativa (s) e coeficiente de determinação (r^2) para as equações de regressão linear simples entre os valores mensais da evapotranspiração de referência medida (ET_o) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (ET_{oM}), em Campinas-SP, Ribeirão Preto-SP e Pindamonhagaba-SP.

	n	ET _{oM} = a + b ET _o		s	r^2
		a	b		
Campinas	48	30,58 ²	0,89 ³	12,08	0,83 ³
R. Preto	48	35,10 ²	0,71 ³	17,39	0,64 ³
Pinda.	34	11,56 ¹	0,80 ³	13,50	0,77 ³

1 = não significativo a 5% de probabilidade

2 = significativo a 5% de probabilidade

3 = significativo a 1% de probabilidade

Figura 4: Evapotranspiração de referência mensal estimada pelo modelo de Penman-Monteith (EToM) versus a medida em evapotranspirômetros de drenagem (ETo) em relação à reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a 1959.

Figura 5: Evapotranspiração de referência mensal estimada pelo modelo de Penman-Monteith (EToM) versus a medida em evapotranspirômetros de drenagem (ETo) em relação à reta 1:1. Ribeirão Preto-SP. Período de 1956 a 1959.

Figura 6: Evapotranspiração de referência mensal estimada pelo modelo de Penman-Monteith (EToM) versus a medida em evapotranspirômetros de drenagem (ETo) em relação à reta 1:1. Pindamonhangaba-SP. Período de 1954 a 1956.

Pelas informações constantes da Tabela 8, verifica-se que na periodicidade mensal houve uma melhoria substancial dos indicadores estatísticos que avaliam a correlação entre os valores estimados por Penman-Monteith e os medidos nos lisímetros. Assim, os coeficientes de correlação variaram de um mínimo de 0,80 em Ribeirão Preto-SP até um valor máximo de 0,91 em Campinas-SP, ambos estatisticamente significativos ao nível de 1% de probabilidade.

Outro fato a ser destacado é que o erro padrão da estimativa também diminuiu, passando de um valor

médio aproximado de $0,67 \text{ mm dia}^{-1}$ na periodicidade decadiária para $0,48 \text{ mm dia}^{-1}$ na escala mensal. Estes números refletiram em uma menor dispersão dos pontos em relação à reta de isovalores.

Pela observação das Figuras 4, 5 e 6 verifica-se que, em Campinas-SP, o modelo superestimou a evapotranspiração de referência, enquanto que em Pindamonhangaba-SP ela foi subestimada, embora de forma menos acentuada. No caso de Ribeirão Preto-SP, apesar das estimativas apresentarem uma dispersão maior do que nas outras localidades, elas se alinharam ao longo da reta 1:1, indicando boa concordância entre os valores medidos e estimados.

Outro ponto a ser destacado, é a maior dispersão das estimativas verificada na escala decadiária em relação à mensal, traduzindo-se em coeficientes de determinação mais baixos e erros padrões de estimativa mais elevados. A explicação para esta ocorrência está na inércia apresentada pelos evapotranspirômetros no que se refere a sua drenagem, caracterizada por uma retenção temporária de água livre, viciando os dados coletados. Esta situação torna-se mais acentuada se a precipitação, ou mesmo irrigação, ocorrer no final do período de análise.

4.2 Relativos à sensibilidade do modelo de Penman-Monteith a variações da altura da vegetação e da resistência do dossel.

A maior dificuldade à aplicação prática do modelo de Penman-Monteith está na obtenção de valores confiáveis e representativos para a resistência do dossel (r_c). Na literatura especializada não se encontra uma definição clara acerca do valor de r_c que, de fato, represente as condições de evapotranspiração potencial. No geral, são utilizados valores de r_c na faixa de 0 a 80 s m^{-1} .

Nesta simulação, foram utilizados valores constantes de r_c , aqueles normalmente citados na literatura, da ordem de 0, 20, 40, 60 e 80 s m^{-1} , além de um valor variável, em função da radiação solar líquida e do índice de área foliar da vegetação.

Outro aspecto importante considerado foi o valor utilizado para a altura da vegetação (h_c), parâmetro fisiológico de fundamental importância à parametrização da resistência aerodinâmica e do dossel. Neste estudo foram analisadas 02 alturas de vegetação, $h_c = 0,12 \text{ m}$ e $h_c = 0,06 \text{ m}$, a primeira representando o valor padronizado para grama proposto pela FAO (SMITH, 1991) e o segundo por ser mais adequado ao porte da grama batatais.

A combinação de 06 valores para resistência e de 02 para a altura da vegetação resultou no estabelecimento de 12 formulações alternativas, que permitiram testar a sensibilidade do modelo de Penman-Monteith a variações numéricas destes parâmetros fisiológicos, facilitando a escolha da alternativa que melhor se ajustou à evapotranspiração de referência medida.

Na realização desta análise de sensibilidade foram utilizadas as informações levantadas por CAMARGO (1966), em Campinas-SP, no período de 1956 a 1959.

A simbologia utilizada neste texto pode criar algum tipo de problema para seu entendimento e, desse modo, os exemplos a seguir procuram contornar as dificuldades porventura apresentadas pela notação.

. $EToM_{0600}$: evapotranspiração de referência para grama estimada pelo modelo de Penman-Monteith, considerando uma altura de vegetação igual a 0,06 m (06) e uma resistência do dossel igual a 0 s m^{-1} (00).

. $EToM_{1269}$: evapotranspiração de referência para grama estimada pelo modelo de Penman-Monteith, considerando uma altura de vegetação igual a 0,12 m (12) e uma resistência do dossel igual a 69

s m^{-1} (69). Esta alternativa, que não faz parte das 12 anteriormente citadas, representa a formulação padronizada pela FAO (SMITH, 1991), discutida anteriormente no item 4.1 sob denominação de EToM.

- . $\text{EToM}_{12\text{VR}}$: evapotranspiração de referência para grama estimada pelo modelo de Penman-Monteith, considerando uma altura de vegetação igual a 0,12 m (12) e uma resistência do dossel variável (VR) de acordo com a equação 23.

Nas Tabelas 9 a 16 (Apêndice 2) e 18 a 25 (Apêndice 2) estão apresentados, respectivamente, os valores decadiários e mensais da evapotranspiração de referência medida em lisímetro de drenagem (ETo) e a estimada pelo modelo de Penman-Monteith, considerando diferentes resistências do dossel e diferentes alturas da vegetação. Das Tabelas 17 e 26 fazem parte os parâmetros estatísticos relativos à análise de regressão linear simples entre os valores medidos e estimados de evapotranspiração de referência. As representações gráficas das correlações entre as variáveis medidas e estimadas estão nas Figuras 7 a 18,

escala decadiária, e Figuras 19 a 30, relativas à escala mensal.

Tabela 17: Número de observações (n), coeficiente linear (a), coeficiente angular (b), erro padrão da estimativa (s) e coeficiente de determinação (r^2) para as equações de regressão linear simples entre os valores decadiários da evapotranspiração de referência medida (ETo) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (EToM). Campinas-SP. Período de 1956 a 1959.

Combinação	n	a	b	s	r^2
EToM ₀₆₀₀	142	14,37 ¹	0,88 ³	7,41	0,647 ³
EToM ₀₆₂₀	142	13,54 ¹	0,85 ³	6,94	0,660 ³
EToM ₀₆₄₀	142	12,82 ¹	0,82 ³	6,56	0,670 ³
EToM ₀₆₆₀	142	12,16 ¹	0,80 ³	6,23	0,678 ³
EToM ₀₆₈₀	142	11,74 ¹	0,77 ³	6,03	0,679 ³
EToM _{06VR}	142	5,50 ¹	0,77 ³	5,85	0,690 ³
EToM ₁₂₀₀	142	16,40 ²	0,91 ³	8,17	0,616 ³
EToM ₁₂₂₀	142	15,25 ²	0,87 ³	7,50	0,635 ³
EToM ₁₂₄₀	142	14,25 ²	0,84 ³	6,96	0,649 ³
EToM ₁₂₆₀	142	13,38 ²	0,80 ³	6,53	0,660 ³
EToM ₁₂₆₉	142	13,03 ²	0,79 ³	6,36	0,660 ³
EToM ₁₂₈₀	142	12,60 ²	0,77 ³	6,17	0,668 ³
EToM _{12VR}	142	8,84 ¹	0,84 ³	6,39	0,688 ³

¹ = não significativo a 5% de probabilidade

² = significativo a 5% de probabilidade

³ = significativo a 1% de probabilidade

Tabela 26: Número de observações (n), coeficiente linear (a), coeficiente angular (b), erro padrão da estimativa (s) e coeficiente de determinação (r^2) para as equações de regressão linear simples entre os valores mensais da evapotranspiração de referência medida (ETo) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (EToM). Campinas-SP. Período de 1956 a 1959.

Combinação	n	a	b	s	r^2
EToM ₀₆₀₀	48	32,92 ²	1,01 ³	14,15	0,822 ³
EToM ₀₆₂₀	48	30,80 ²	0,97 ³	13,19	0,832 ³
EToM ₀₆₄₀	48	28,96 ²	0,94 ³	12,41	0,839 ³
EToM ₀₆₆₀	48	27,28 ²	0,91 ³	11,74	0,845 ³
EToM ₀₆₈₀	48	26,22 ²	0,88 ³	11,47	0,843 ³
EToM _{06VR}	48	7,42 ¹	0,88 ³	10,88	0,855 ³
EToM ₁₂₀₀	48	39,42 ²	1,03 ³	15,83	0,794 ³
EToM ₁₂₂₀	48	36,39 ²	0,98 ³	14,44	0,809 ³
EToM ₁₂₄₀	48	33,77 ²	0,94 ³	13,32	0,821 ³
EToM ₁₂₆₀	48	31,48 ²	0,96 ³	12,42	0,829 ³
EToM ₁₂₆₉	48	30,58 ²	0,89 ³	12,08	0,830 ³
EToM ₁₂₈₀	48	29,47 ²	0,87 ³	11,69	0,835 ³
EToM _{12VR}	48	16,75 ¹	0,95 ³	11,88	0,855 ³

1 = não significativo a 5% de probabilidade

2 = significativo a 5% de probabilidade

3 = significativo a 1% de probabilidade

Figura 7: Evapotranspiração de referência decadiária estimada pelo modelo de Penman-Monteith ($EToM_{0600}$) versus a medida em evapotranspirômetros de drenagem (ETo) em relação à reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a 1959.

Figura 8: Evapotranspiração de referência decadiária estimada pelo modelo de Penman-Monteith ($EToM_{0620}$) versus a medida em evapotranspirômetros de drenagem (ETo) em relação à reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a 1959.

Figura 9: Evapotranspiração de referência decadiária estimada pelo modelo de Penman-Monteith ($EToM_{0640}$) versus a medida em evapotranspirômetros de drenagem (ETo) em relação à reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a 1959.

Figura 10: Evapotranspiração de referência decadiária estimada pelo modelo de Penman-Monteith ($EToM_{0660}$) versus a medida em evapotranspirômetros de drenagem (ETo) em relação à reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a 1959.

Figura 11: Evapotranspiração de referência decadiária estimada pelo modelo de Penman-Monteith ($EToM_{0080}$) versus a medida em evapotranspirômetros de drenagem (ETo) em relação à reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a 1959.

Figura 12: Evapotranspiração de referência decadiária estimada pelo modelo de Penman-Monteith ($EToM_{00VR}$) versus a medida em evapotranspirômetros de drenagem (ETo) em relação à reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a 1959.

Figura 13: Evapotranspiração de referência decadiária estimada pelo modelo de Penman-Monteith ($EToM_{1200}$) versus a medida em evapotranspirômetros de drenagem (ETo) em relação à reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a 1959.

Figura 14: Evapotranspiração de referência decadiária estimada pelo modelo de Penman-Monteith ($EToM_{1220}$) versus a medida em evapotranspirômetros de drenagem (ETo) em relação à reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a 1959.

Figura 15: Evapotranspiração de referência decadiária estimada pelo modelo de Penman-Monteith ($EToM_{1240}$) versus a medida em evapotranspirômetros de drenagem (ETo) em relação à reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a 1959.

Figura 16: Evapotranspiração de referência decadiária estimada pelo modelo de Penman-Monteith ($EToM_{1260}$) versus a medida em evapotranspirômetros de drenagem (ETo) em relação à reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a 1959.

Figura 17: Evapotranspiração de referência decadiária estimada pelo modelo de Penman-Monteith ($EToM_{1280}$) versus a medida em evapotranspirômetros de drenagem (ETo) em relação à reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a 1959.

Figura 18: Evapotranspiração de referência decadiária estimada pelo modelo de Penman-Monteith ($EToM_{12VR}$) versus a medida em evapotranspirômetros de drenagem (ETo) em relação à reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a 1959.

Figura 19: Evapotranspiração de referência mensal estimada pelo modelo de Penman-Monteith ($EToM_{0600}$) versus a medida em evapotranspirômetros de drenagem (ETo) em relação à reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a 1959.

Figura 20: Evapotranspiração de referência mensal estimada pelo modelo de Penman-Monteith ($EToM_{0620}$) versus a medida em evapotranspirômetros de drenagem (ETo) em relação à reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a 1959.

Figura 21: Evapotranspiração de referência mensal estimada pelo modelo de Penman-Monteith ($EToM_{0640}$) versus a medida em evapotranspirômetros de drenagem (ETo) em relação à reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a 1959.

Figura 22: Evapotranspiração de referência mensal estimada pelo modelo de Penman-Monteith ($EToM_{0660}$) versus a medida em evapotranspirômetros de drenagem (ETo) em relação à reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a 1959.

Figura 23: Evapotranspiração de referência mensal estimada pelo modelo de Penman-Monteith ($EToM_{0680}$) versus a medida em evapotranspirômetros de drenagem (ETo) em relação à reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a 1959.

Figura 24: Evapotranspiração de referência mensal estimada pelo modelo de Penman-Monteith ($EToM_{06VR}$) versus a medida em evapotranspirômetros de drenagem (ETo) em relação à reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a 1959.

Figura 25: Evapotranspiração de referência mensal estimada pelo modelo de Penman-Monteith ($EToM_{1200}$) versus a medida em evapotranspirômetros de drenagem (ETo) em relação à reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a 1959.

Figura 26: Evapotranspiração de referência mensal estimada pelo modelo de Penman-Monteith ($EToM_{1220}$) versus a medida em evapotranspirômetros de drenagem (ETo) em relação à reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a 1959.

Figura 27: Evapotranspiração de referência mensal estimada pelo modelo de Penman-Monteith ($EToM_{1240}$) versus a medida em evapotranspirômetros de drenagem (ETo) em relação à reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a 1959.

Figura 28: Evapotranspiração de referência mensal estimada pelo modelo de Penman-Monteith ($EToM_{1260}$) versus a medida em evapotranspirômetros de drenagem (ETo) em relação à reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a 1959.

Figura 29: Evapotranspiração de referência mensal estimada pelo modelo de Penman-Monteith ($EToM_{1280}$) versus a medida em evapotranspirômetros de drenagem (ETo) em relação à reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a 1959.

Figura 30: Evapotranspiração de referência mensal estimada pelo modelo de Penman-Monteith ($EToM_{12VR}$) versus a medida em evapotranspirômetros de drenagem (ETo) em relação à reta 1:1. Campinas-SP. Período de 1956 a 1959.

As Tabelas 17 e 26 permitem observar que todas as combinações, decadiárias e mensais, incorporando a altura da vegetação igual a 0,06 m, correlacionaram a evapotranspiração de referência medida de forma mais estreita do que quando se utilizou $h_c = 0,12$ m, como proposto pela FAO.

As Figuras 7 a 11, 13 a 17, 19 a 23 e 25 a 29 mostram claramente que a altura da vegetação igual a 0,06 m determina uma menor dispersão das variáveis envolvidas em relação a reta 1:1, indicando que ela gera estimativas mais coerentes com os valores medidos, ratificando, assim, o que era sinalizado pelos indicadores estatísticos constantes das Tabelas 17 e 26. A explicação a esta ocorrência está no fato de evapotranspirômetros instalados em Campinas-SP terem tido seus gramados aparados com maior frequência, resultando em uma vegetação de porte mais baixo e uniforme. Assim sendo, esta evidência experimental ratifica a importância de se padronizar e manter constante a altura da vegetação nos lisímetros de referência, para sua utilização futura na equação de Penman-Monteith.

Outro ponto que deve ser comentado é que todas as combinações incorporando $h_c = 0,06$ m geram estimativas da evapotranspiração de referência mais baixas do que aquelas incorporando $h_c = 0,12$ m. A explicação a esta evidência experimental é dada pelo fato da vegetação mais elevada apresentar resistências aerodinâmicas menores do que aquelas de menor porte e, por consequência, taxas de

evapotranspiração mais elevadas. Do ponto de vista aerodinâmico, plantas de porte mais alto apresentam comprimentos de rugosidade para transferência de momento e calor (Z_{om} e Z_{oh}) maiores, implicando em uma superfície de contato mais extensa, o que facilita a sua difusão turbulenta para a atmosfera.

Pelos números apresentados nas Tabelas 17 e 26 pode ser detectado o bom ajustamento entre valores medidos e estimados na escala mensal, muito superior ao verificado na escala decadiária. Em termos médios, o coeficiente de correlação e o erro padrão da estimativa mensal foram da ordem de 0,833, significativo ao nível de 1% de probabilidade, e de 0,42 mm dia⁻¹, contra os 0,662 e 0,67 mm dia⁻¹ verificados na escala decadiária. Estes números são indicativos da necessidade de se tomar cuidados adicionais quando se utiliza de escalas de tempo curtas, especialmente quando se trabalhar com lisímetros de drenagem.

As combinações $ET_{om_{0600}}$ e $ET_{om_{1200}}$, que representam as condições de evaporação de uma superfície de água livre, foram aquelas que apresentaram as estimativas de ETo menos correlacionadas com os valores medidos, confirmando os trabalhos de JACKSON et al. (1981), JACKSON (1983) e MONTEITH (1985), donde se conclui que mesmo sob condições ótimas de umidade as plantas ainda apresentam uma resistência do dossel mensurável, contrapondo-se, portanto, às conclusões de van BAVEL (1967), van BAVEL &

EHRLER (1968), SLABBERS (1977) e JOHNS et al. (1983), que sustentam não haver controle do consumo de água pelas plantas, via estômatos, enquanto o solo estiver bem suprido de água.

Embora HATFIELD (1988) tenha sugerido a adoção de uma resistência do dossel de 20 s m^{-1} como representativa da evapotranspiração potencial, as combinações pertinentes (EToM_{0620} e EToM_{1220}), nas duas escalas de tempo consideradas, foram as que apresentaram a segunda pior correlação entre valores estimados e medidos. Esta evidência experimental mostra que 20 s m^{-1} é um valor muito baixo para a resistência do dossel nas condições potenciais, o que está de acordo com MONTEITH (1985), que sugere um valor mínimo de $r_c = 50 \text{ s m}^{-1}$ para esta situação.

As Figuras 7, 8, 13, 14, 19, 20, 25 e 26 mostram que as combinações que incorporam em sua estrutura valores de resistência do dossel entre 0 e 20 s m^{-1} superestimaram a evapotranspiração de referência, apesar da alta correlação verificada, sinalizando que resistências do dossel tão baixas estimam valores iguais ou próximos à evaporação de uma superfície de água livre.

Observando-se atentamente as Tabelas 17 e 26, nota-se a evidência de que foi no intervalo de 40 a 80 s m^{-1} onde foram obtidos os melhores indicadores estatísticos relativos à correlação entre valores medidos e estimados. Os acréscimos verificados nestes indicadores são marginais em relação aos acréscimos muito maiores na re-

sistência do dossel, principalmente acima de 60 s m^{-1} , sinalizando que a resistência do dossel, que representa a condição de evapotranspiração potencial, situa-se na faixa de $60\text{-}80 \text{ s m}^{-1}$, o que vem referendar os números de BRUIN & HOLTSLAG (1982), ALLEN (1986), ALLEN et al. (1989) e OKE (1992). Deve ser salientado, no entanto, que os melhores indicadores estatísticos foram obtidos com a combinação EToM_{0680} , ligeiramente superior à EToM_{0660} .

A combinação EToM_{1260} , que representa a padronização proposta pela FAO (SMITH, 1991), forneceu valores estimativos da evapotranspiração de referência altamente correlacionados com os valores medidos, principalmente na escala mensal, onde foram obtidos coeficiente de correlação igual a 0,91, significativo ao nível de 1% de probabilidade, e erro padrão da estimativa da ordem de $0,40 \text{ mm dia}^{-1}$, valores estes, muito próximos aos citados por ALLEN (1986) e ALLEN et al. (1989). Na escala decadiária estes números são, respectivamente, 0,81 e $0,64 \text{ mm dia}^{-1}$. Isto posto, pode se afirmar que a proposição da FAO encontra justificativa técnica nos dados experimentais aqui reproduzidos.

As Figuras 10, 11, 16, 17, 22, 23, 28 e 29 mostram que ocorre uma melhoria crescente no nível de concordância dos valores estimados e medidos, à medida que se aumenta o valor da resistência do dossel, independentemente da altura da vegetação. Apesar de apresentar indicadores estatísticos bastante elevados, significando alta cor-

relação entre valores estimados e medidos, pode se observar que todas as combinações pertinentes às figuras anteriores superestimaram a evapotranspiração de referência, o que pode ser explicado pela utilização no modelo de temperaturas anormalmente elevadas, como já explicado anteriormente.

As combinações anteriores utilizam, em sua estrutura, uma resistência do dossel constante no tempo, desconsiderando os efeitos da radiação solar na abertura e fechamento dos estômatos e, por consequência, na resistência do dossel. Assim, quando se relaciona a resistência do dossel à disponibilidade de energia, as estimativas obtidas pelas combinações $ET_{0.06VR}$ e $ET_{0.12VR}$ apresentam correlação mais estreita com os valores medidos do que qualquer outra combinação constante das Tabelas 17 e 26. Um fato que deve ser destacado é que, quando se considera a resistência do dossel variável com o nível de energia disponível, a influência da altura da vegetação passa a ser desprezível, como pode ser observado pelos coeficientes de determinação e erros padrões da estimativa das combinações $ET_{0.06VR}$ e $ET_{0.12VR}$, considerando-se as duas escalas escalas de tempo. No entanto, a prova mais cabal das vantagens de se parametrizar a resistência do dossel em função da radiação solar líquida pode ser vista nas Figuras 12, 18, 24 e 30, nas quais nota-se que existe uma concordância muito grande entre os valores estimados e medidos, caracterizada por um alinhamento bastante próximo da reta 1:1,

superior a todas as combinações anteriormente avaliadas. Desse modo, dentre todas as combinações analisadas, aquelas que incorporam em sua estrutura resistências do dossel variáveis são as que fornecem estimativas com correlação mais estreita e de maior concordância com os valores medidos. Embora de forma bastante ligeira, a combinação $EToM_{06VR}$ provê melhor ajustamento das informações estimadas e medidas da evapotranspiração de referência do que a combinação $EToM_{12VR}$.

4.3. Relativos à resistência do dossel

Quando se conhece a evapotranspiração e as variáveis climáticas envolvidas no processo, a resistência do dossel (r_c) pode ser calculada de forma residual pela aplicação do modelo de Penman-Monteith, o que foi feito nesta pesquisa com base nas informações de evapotranspiração de referência medida em Campinas-SP, no período de 1956 a 1959 (CAMARGO, 1966). Foi verificado nos cálculos que as diferenças resultantes da aplicação de informações decadiárias ou mensais são irrelevantes, razão pela qual os resultados e comentários a seguir se aplicam indistintamente às duas escalas de tempo.

Tomando-se a resistência do dossel como incógnita do modelo, observou-se que, para a altura da

vegetação igual a 0,06 m, seu valor médio no período foi da ordem de 300 s m^{-1} para os meses de abril a setembro (outono-inverno); de 202 s m^{-1} de outubro a março (primavera-verão), passando por um valor médio anual de 250 s m^{-1} , sendo que, no caso de $h_c = 0,12 \text{ m}$, estes valores foram, respectivamente, de 365, 241 e 303 s m^{-1} . Um aspecto que deve ser salientado é a extrema variabilidade temporal da resistência do dossel, caracterizada por coeficientes de variação da magnitude de 40%.

As Figuras 31 e 32 mostram a variação temporal da resistência do dossel com a disponibilidade de energia solar, observando-se claramente que esta resistência apresenta-se mais elevada nos meses de menor insolação (abril a setembro) e mais baixas nos meses onde esta disponibilidade energética é maior (outubro a março).

Os números e figuras anteriores mostram a evidente influência da disponibilidade de energia solar sobre o comportamento numérico da resistência do dossel, que cresce à medida que a disponibilidade de energia diminui, ratificando, assim, as conclusões de BAYLEY & DAVIES (1981) MONTEITH (1981; 1985) e HATFIELD (1985). Estas evidências experimentais sinalizam que a adoção de uma resistência do dossel única e constante ao longo do tempo, não encontra sustentação nos resultados obtidos nesta pesquisa.

Figura 31: Variação temporal decadiária média da resistência do dossel, considerando 02 alturas de vegetação, obtida a partir da aplicação do modelo de Penman-Monteith aos valores medidos da evapotranspiração de referência coletados em Campinas-SP, no período de 1956 a 1959.

Figura 32: Variação temporal mensal média da resistência do dossel, considerando 02 alturas de vegetação, obtida a partir da aplicação do modelo de Penman-Monteith aos valores medidos da evapotranspiração de referência coletados em Campinas-SP, no período de 1956 a 1959.

Quando se trabalhou com a equação 23 para determinação da resistência do dossel, foi verificado que, para $h_c = 0,06$ m, ela assumiu valores médios de 259 s m^{-1} nos meses de abril a setembro (outono-inverno); de 174 s m^{-1} no período de outubro a março (primavera-verão), que resultaram em um valor médio anual de aproximadamente 219 s m^{-1} . Para a altura da vegetação igual a $0,12$ m, estes valores são exatamente a metade dos anteriores, fato decorrente da estrutura linear da equação utilizada na estimativa da resistência do dossel (eq. 23). Nos mesmos períodos, constatou-se que a radiação solar líquida foi da ordem de 150 , 285 e $217 \text{ cal cm}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ (≈ 75 , 143 e 109 W m^{-2}), confirmando numericamente que resistência do dossel aumenta com a diminuição da disponibilidade de radiação solar.

Nas duas situações anteriormente analisadas, pode ser constatado que a resistência do dossel assume valores muito mais elevados do que os propostos por MONTEITH (1981, 1985), ALLEN (1986), ALLEN et al. (1989) e SMITH (1991), embora números desta ordem de grandeza e variabilidade tenham sido encontrados por RUSSEL (1980), HATFIELD (1981) e BRUIN & HOLTSLAG (1982).

A extrema variabilidade temporal da resistência do dossel tem sido ressaltada por muitos pesquisadores e, dentre eles, LUCHIARI Jr. & RIHA (1991) constataram que nas condições edafoclimáticas do Planalto Central brasileiro, ela variou de 15 a 50 s m^{-1} , entre $8\text{h}30'$ e

14h30', até valores superiores a 200 s m^{-1} pelas 16h30', no dia imediatamente após a irrigação. Assim sendo, parece não haver sustentação científica à tese de que a resistência do dossel para períodos longos de 10 a 30 dias possa ser considerada como uma resistência fisiológica, controlada pelos estômatos das plantas. Por isso, como querem BEN-ASHER et al. (1989), a resistência do dossel deve ser considerada como um coeficiente de proporcionalidade de determinação empírica, sem nenhum significado fisiológico mais claro.

5. CONCLUSÕES

A partir das informações coletadas, processadas e interpretadas nesta pesquisa, foram obtidas as seguintes conclusões:

a) nas 03 localidades estudadas, o modelo de Penman-Monteith, desenvolvido segundo a padronização proposta pela FAO (altura da vegetação de 0,12 m, resistência do dossel de 69 s m^{-1} e albedo de 23%) estimou a evapotranspiração de referência para grama de forma consistente e bem correlacionada com os valores medidos em evapotranspirômetros, tanto na escala de tempo decadiária quanto na mensal, indicando que este modelo pode ser utilizado com sucesso na determinação das necessidades de água das culturas;

b) as estimativas mensais obtidas com a aplicação do modelo de Penman-Monteith padronizado são muito mais consistentes do que as decadiárias;

c) o modelo de Penman-Monteith é sensível a variações da altura da vegetação e da resistência do dossel. A melhor combinação destes fatores para as condições

desta pesquisa foi a seguinte: altura da vegetação de 0,06 m e resistência do dossel de 80 s m^{-1} ;

d) a melhor correlação e concordância entre os valores estimados e medidos da evapotranspiração de referência foi obtida quando se utilizou no modelo de Penman-Monteith uma resistência do dossel variável, calculada em função da radiação solar líquida e do índice de área foliar da vegetação;

e) a resistência do dossel que melhor representa as condições de evapotranspiração potencial situa-se na faixa de 60 a 80 s m^{-1} ;

f) tomando-se a resistência do dossel como incógnita do modelo, verificou-se que para $h_c = 0,06 \text{ m}$ seu valor variou entre 300 s m^{-1} , no período de outono-inverno, e 202 s m^{-1} , no período de primavera-verão; enquanto que, para $h_c = 0,12 \text{ m}$, estes valores foram, respectivamente, 365 e 241 s m^{-1} ; e

g) a resistência do dossel para períodos de tempo longos comporta-se como um coeficiente empírico de proporcionalidade, sem nenhum significado fisiológico mais claro.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AGUIAR NETTO, A. O.; BASTOS, E. A.; LUNARDI, D. M. C.; MARTINS, D. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para Botucatu-SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 22., Ilhéus, 1993. *Anais*. Ilhéus, SBEA, 1993. v. 4, p. 2285-92.

ALLEN, R. G. Daily reference evapotranspiration in arid and humid environment. In: NATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN EVAPOTRANSPIRATION, Chicago, 1985. *Proceedings*. St. Joseph, ASAE, 1985. p. 4-12.

ALLEN, R. G. A Penman for all seasons. *Journal Irrig. Drain. Engineering*, New York, 112(4):348-68, 1986.

ALLEN, R. G.; JENSEN, M. E.; WRIGHT, J. L.; BURMAN, R. D. Operational estimates of reference evapotranspiration. *Agronomy J.*, Madison, 81:650-62, 1989.

- ALLEN, R. G.; PRUEGER, J. R.; HILL, R. W.
Evapotranspiration from isolated stands of hydrophytes:
cattail and bulrush. *Transactions of the ASAE*, St.
Joseph, 35(4):1191-8, 1992.
- AZEVEDO, P. V.; RAO, T. U. R.; NETO, M. S. A.; SOBRINHO,
J. E.; MACIEL, G. F. Resistência aerodinâmica e
estomática da cultura do algodão herbáceo. *Revista
Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria,
1(1):19-24, 1993.
- BAILEY, W. G.; DAVIES, J. A. Bulk stomatal resistance
control on evaporation. *Boundary Layer Meteor.*,
Dordrecht, 20:401-15, 1981.
- BARBIERI, V. Medidas e estimativas de consumo hídrico em
cana-de-açúcar. Piracicaba, 1981. 82p. (Mestrado-
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).
- BEN-ASHER, J.; MEEK, D. W.; HUTMACHER, R. B.; PHENE, C. J.
Computational approach to assess actual transpiration
from aerodynamic and canopy resistance. *Agronomy J.*,
Madison, 81:776-82, 1989.
- BLANEY, H. F. & CRIDDLE, W. D. *Determining water
requirements in irrigated areas from climatological and*

irrigation data. Washington, USDA, 1950. 48p.

BRUIN, H. A. R.; & HOLTSLAG, A. A. M. A simple parameterization of the surface fluxes of sensible and latent heat during daytime with the Penman-Monteith concept. *J. Appl. Meteor.*, Boston, 21:1610-21, 1982.

BRUTSAERT, W. *Evaporation into the atmosphere: Theory, History and Applications.* Dordrecht, Kluwer Academic, 1982. 299p. (Environmental Fluid Mechanics, 1).

BURMAN, R. D.; NIXON, P. R.; WRIGHT, J. L.; PRUITT, W. O. Water requirements. In: JENSEN, M. E., ed. *Design and operation of farm irrigation system.* St. Joseph, ASAE, 1983. Chap. 6, p. 189-232.

BURMAN, R. D. Evapotranspiration. In: NATIONAL CONFERENCE ON ADVANCES IN EVAPOTRANSPIRATION, Chicago, 1985. *Proceedings.* St. Joseph, ASAE, 1985. p. 185-92.

CAMARGO, A. P. *Contribuição para determinação da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo.* Campinas, Instituto Agronômico, 1966. 60p. (Boletim, 161).

CUENCA, R. H. *Irrigation system design. An engineering approach.* Englewood Cliffs, Prentice-Hall Inc, 1989. 522p.

DOORENBOS, J. & PRUITT, J. O. *Guidelines for predicting crop water requirements.* Rome, FAO, 1975. 179p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 24).

FERREIRA, W. A. *Utilização da evaporação "Piche" na estimativa da evapotranspiração potencial.* Botucatu, 1972. 72p. (Doutorado - Faculdade de Ciências Médicas e Biológicas de Botucatu).

FOLEGATTI, M. V. *Avaliação do desempenho de um "scheduler" na detecção do estresse hídrico em cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*, L.) irrigada com diferentes lâminas.* Piracicaba, 1988. 188p. (Doutorado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).

GRANT, D. R. Comparison of evaporation from barley with Penman estimates. *Agric. Meteorology*, Amsterdam, 15:49-60, 1975.

HARGREAVES, G. H. *Water requirements manual for irrigated crop and rainfed agriculture*. Logan, Utah State University, 1977. 41p.

HATFIELD, J. L. Wheat canopy resistance determined by energy balance techniques. *Agronomy J.*, Madison, 77:279-83, 1985.

HATFIELD, J. L. Research priorities in ET: evolving methods. *Transactions of the ASAE*, St. Joseph, 31(2):491-95, 1988.

JACKSON, R. D.; IDSO, S. B.; REGINATO, R. J.; WINTER Jr, P. J. Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Res. Research*, 17(4):1133-38, 1981.

JACKSON, R. D. Canopy temperature and crop water stress. In: HILLEL, D. *Advances in irrigation*. New York, Academic Press, 1983. v.1, p. 43-85.

JENSEN, M. E. & HAISE, H. R. Estimating evapotranspiration from solar radiation. *Journal Irrig and Drain Division*, New York, 89:15-41, 1963.

JENSEN, M. E., ed. *Consumptive use of water and irrigation water requirements*. New York, ASCE, 1973. 215p.

JOHNS, D. ; BEARD, J. B. ; van BAVEL, C. H. M. Resistances to evapotranspiration from a St. Augustinegrass turf canopy. *Agronomy J.*, Madison, 75(3):419-22, 1983.

KROON, L. J. M. & BRUIN, H. A. R. Atmosphere-vegetation interaction in local advection conditions: effect of lower boundary conditions. *Agric. Forest Meteor.* Amsterdam, 64:1-28, 1993.

LIMA, S. F. F. Comparação de métodos de estimativa de evapotranspiração potencial para o município de Ribeirão Preto (SP). Piracicaba, 1991. 69p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).

LHOMME, J. P. The concept of canopy resistance: historical survey and comparison of different approaches. *Agric. Forest Meteor.*, Amsterdam, 54:227-40, 1991.

LUCHIARI Jr., A. *Measurements and predictions of evapotranspiration rates from irrigated wheat in the Cerrado region of Central Brazil*. Ithaca, 1988. 171p. (PhD - Cornell University).

LUCHIARI Jr., A. & RIHA, S. J. Bulk surface resistance and its effect on evapotranspiration rates in irrigated

- wheat. *Agronomy J.*, Madison, 83:888-95, 1991.
- MONTEITH, J. L. Evaporation and environment. *Symp. Soc. Exp. Biology*. London, 19:205-34, 1965.
- MONTEITH, J. L. The development and extension of Penman's evaporation formula. In: HILLEL, D., ed. *Applications of soil physics*. New York, Academic Press, 1980. Chap. 10, p. 247-53.
- MONTEITH, J. L. Evaporation from land surfaces: progress in analysis and prediction since 1948. In: National Conference on Advances in Evapotranspiration, Chicago, 1985. *Proceedings*. St. Joseph, ASAE, 1985. p. 4-12.
- MONTEITH, J. L. Evaporation and surface temperature. *Quart. J. R. Met. Society*, London, 107(451):1-27, 1981.
- MONTEITH, J. L. & UNSWORTH, M. H. *Principles of environmental physics*. 2ed. London, Routledge, 1990. 191p.
- NORMAN, J. M. & CAMPBELL, G. Application of a plant-environment model to problems in irrigation. In: HILLEL, D. *Advances in irrigation*. New York, Academic Press, 1983. v. 2, p. 155-88.

- OKE, T. R. *Boudary Layer Climates*. 2ed. London, Routledge, 1992. 435p.
- OMETTO, J. C. *Bioclimatologia Vegetal*. São Paulo, CERES, 1981. 425p.
- ORTOLANI, A. A.; CAMARGO, A. P.; VILLA NOVA, N. A. Correlação entre valores decendiais da evapotranspiração potencial calculados segundo métodos de Penman e Thornthwaite e dados de evpotranspirômetros na região de Ribeirão Preto. *Bragantia*, Campinas, 25:65-8, 1966. (Nota, 15).
- O'TOOLE, J.C. & REAL, J. G. Estimation of aerodynamic and crop resistances from canopy temperature. *Agronomy J.*, Madison, 78:305-10, 1986.
- PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Royal Society of London, Serie A*, London, 193:120-45, 1948.
- PENMAN, H. L. The dependence of evapotranspiration on weather and soil conditions. *Journal of Soil Science*, 1:74-89, 1949.
- PEREIRA, A. R. Análise do modelo de Priestley-Taylor para estimativa da evapotranspiração potencial. Piracicaba,

1990. 68p. (Livre docência - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).

PEREIRA, A. R. *Evapo(transpi)ração*. Piracicaba, ESALQ-Departamento de Física e Meteorologia, 1992. 51p.

PEREIRA, A. R. & CAMARGO, A. P. Analysis of the criticism of Thornthwaite's equation for estimating potential evapotranspiration. *Agric. Forest Meteor.*, Amsterdam, 46:149-57, 1989.

PERES, J. G. & SCARDUA, R. Estudo de métodos agroclimatológicos para estimativa da evapotranspiração potencial de referência (ET_o), segundo DOORENBOS & PRUITT. *Engenharia Rural*, Piracicaba, 2(2):46-63, 1991.

PRIESTLEY, C. H. B. & TAYLOR, R. J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Rev.*, Washington, 100:81-92, 1972.

RUSSELL, G. Crop evaporation, surface resistance and soil water status. *Agric. Meteor.*, Amsterdam, 21:213-26, 1980.

- SANTOS, R. Z. & ANDRÉ, R. G. B. Relações energéticas e aerodinâmicas em uma cultura de feijão. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, 1(1):11-8, 1993.
- SEDIYAMA, G. C. *Necessidade de água para os cultivos*. Brasília, ABEAS, 1987. 143p.
- SHARMA, M. L. Estimating evapotranspiration. In: HILLEL, D. *Advances in irrigation*. New York, Academic Press, 1983. v.3, p. 213-81.
- SILVA, A. A. G. Avaliação da eficiência de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Parnaíba-PI. Piracicaba, 1989. 81p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).
- SLABBERS, P. J. Surface roughness of crops and potential evapotranspiration. *J. Hydrology*, Amsterdam, 34:181-91, 1977.
- SMITH, M., ed. *Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for predictions of crop water requirements*. Rome, FAO, 1991. 45p.

- TANNER, C. B. Evaporation of water from plants and soil.
In: KOZLOWSKI, T. T. *Water deficits and plant growth*.
New York, Academic Press, 1968. v.1, Chap. 4, p.
73-106.
- THOM, A. S. Momentum, mass and heat exchange of plant
communities. In: MONTEITH, J. L., ed. *Vegetation and
the atmosphere*. London, Academic Press, 1975. v.1,
Chap. 3, p. 57-109.
- THOM, A. S. & OLIVER, H. R. On Penman's equation for
estimating regional evaporation. *Quart. J. R. Met.
Society*, London, 103:345-57, 1977.
- THORNTWAITE, G. W. An approach toward a rational
classification of climate. *Geographical Rev.*, New
York, 38(1):55-94, 1948.
- Van BAVEL, C. H. M. Changes in canopy resistances to
water loss from alfalfa induced by soil water
depletion. *Agric. Meteor.*, Amsterdam, 4:165-76, 1967.
- Van BAVEL, C. H. M. & EHRLER, W. L. Water loss from a
sorghum field and stomatal control. *Agronomy J.*
Madison, 60:84-6, 1968.

Van ZYL, W. H. & JAGER, J. M. Accuracy of the Penman-Monteith equation adjusted for atmospheric stability. *Agric. Forest Meteor.*, Amsterdam, 41:57-64, 1987.

VILLA NOVA, N. A. A estimativa da evaporação potencial no Estado de São Paulo. Piracicaba, 1967. 66p. (Doutorado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).

VILLA NOVA, N. A. & OMETTO, J. C. Adaptação e simplificação do método de Penman às condições climáticas do Estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS, IV, Fortaleza, 1981. *Anais.* São Paulo, ABRH, 1981. v.3, p. 281-99.

VILLA NOVA, N. A. & REICHARDT, K. Evaporação e evapotranspiração. In: RAMOS, F.; OCCHIPINTI, A. G.; VILLA NOVA, N. A. & REICHARDT, K.; MAGALHÃES, P. C.; CLEARY, R. W. *Engenharia Hidrológica*, Rio de Janeiro, ABRH, 1989. Cap. 3, p. 145-97. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos, 2).

WRIGHT, J. L. New evapotranspiration crop coefficients. *Journal Irrig and Drain Division*, New York, ASCE, 108(2):57-74, 1982.

ZHANG, L. & LEMEUR, R. Effect of aerodynamic resistance on energy balance and Penman-Monteith estimates of evapotranspiration in greenhouse conditions. *Agric. Forest Meteor.*, Amsterdam, 58:209-28, 1992.

A P P E N D I C E 1

Tabela 1: Valores decadiários da evapotranspiração de referência medida (ET_o) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (ET_{oM}), em Campinas-SP. Período de 1956 a 1959. Valores em mm de água.

Período		1956		1957		1958		1959	
		ET _o	ET _{oM}	ET _o	ET _{oM}	ET _o	ET _{oM}	ET _o	ET _{oM}
JAN	1	44	56	43	47	50	57	21	40
	2	59	52	21	34	28	39	40	34
	3	52	61	37	49	47	36	39	52
FEV	1	59	57	42	35	32	38	25	34
	2	33	30	34	40	44	50	35	40
	3	23	29	36	28	22	21	26	34
MAR	1	34	44	43	42	25	36	30	43
	2	38	41	29	42	31	32	31	32
	3	39	43	36	34	38	43	32	34
ABR	1	29	29	27	27	24	27	26	30
	2	21	28	30	28	19	23	29	30
	3	23	23	25	25	23	27	31	24
MAI	1	13	18	12	24	14	23	15	27
	2	17	24	17	23	15	25	21	23
	3	19	17	27	28	17	17	14	23
JUN	1	10	16	12	21	19	24	18	20
	2	11	15	21	24	16	19	6	22
	3	8	20	17	21	9	24	13	23
JUL	1	11	22	11	19	17	26	13	26
	2	14	22	17	17	11	19	16	26
	3	16	20	8	28	17	29	18	29
AGO	1	11	21	21	30	16	28	12	20
	2	17	31	14	23	21	35	18	23
	3	21	36	26	38	27	37	19	37
SET	1	--	30	15	23	20	31	15	27
	2	--	28	20	28	15	27	22	35
	3	25	34	25	28	23	34	27	36
OUT	1	31	49	34	51	33	47	25	47
	2	27	40	43	49	23	44	32	35
	3	30	41	44	39	23	36	34	45
NOV	1	33	44	36	42	44	50	31	40
	2	41	56	32	35	26	45	23	42
	3	33	48	39	45	34	45	44	38
DEZ	1	28	48	44	40	42	52	40	40
	2	49	45	27	35	35	34	31	52
	3	32	51	42	55	41	52	40	46

Tabela 2: Valores decadiários da evapotranspiração de referência medida (ET_o) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (ET_{oM}), em Ribeirão Preto-SP. Período de 1956 a 1959. Valores em mm de água.

Período		1956		1957		1958		1959	
		ET _o	ET _{oM}	ET _o	ET _{oM}	ET _o	ET _{oM}	ET _o	ET _{oM}
JAN	1	41	49	59	45	62	51	55	35
	2	40	53	29	33	49	34	26	29
	3	38	60	39	43	35	33	31	41
FEV	1	51	65	53	34	35	34	30	39
	2	46	37	31	43	36	46	45	43
	3	28	35	41	25	51	26	58	31
MAR	1	27	47	44	43	39	38	36	34
	2	40	44	28	41	45	35	31	32
	3	30	45	52	31	52	45	26	33
ABR	1	32	28	23	24	22	25	27	28
	2	27	35	33	31	29	21	27	31
	3	26	25	38	25	22	26	40	25
MAI	1	24	20	17	26	26	23	32	28
	2	21	25	15	26	17	26	24	23
	3	10	21	25	30	45	17	26	28
JUN	1	21	17	14	23	21	21	15	21
	2	6	16	17	27	22	19	12	24
	3	12	24	21	27	16	23	17	27
JUL	1	12	23	23	23	17	24	21	29
	2	14	28	27	16	16	17	27	30
	3	22	25	9	36	24	27	40	33
AGO	1	13	23	28	32	19	26	28	20
	2	16	38	31	24	37	31	22	29
	3	24	48	27	41	29	36	38	42
SET	1	30	42	31	25	22	32	35	33
	2	--	33	36	32	23	30	35	42
	3	28	43	29	31	35	35	57	43
OUT	1	25	58	46	51	52	44	51	58
	2	57	48	41	51	37	44	20	34
	3	36	42	61	44	37	36	49	47
NOV	1	25	54	41	41	34	49	--	46
	2	67	66	42	36	45	49	--	46
	3	46	49	40	46	56	48	--	38
DEZ	1	63	53	35	38	44	51	58	38
	2	42	45	50	35	--	32	35	46
	3	38	48	49	57	--	52	37	46

Tabella 3: Valores decadiários da evapotranspiração de referência medida (ET_o) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (ET_{oM}), em Pindamonhangaba-SP. Período de 1954 a 1956. Valores em mm de água.

Período		1954		1955		1956	
		ET _o	ET _{oM}	ET _o	ET _{oM}	ET _o	ET _{oM}
JAN	1	--	34	32	37	33	45
	2	--	43	49	36	57	47
	3	--	51	48	43	57	49
FEV	1	--	32	26	44	55	47
	2	--	33	48	45	40	28
	3	--	34	31	24	33	28
MAR	1	40	36	36	34	34	34
	2	31	36	38	33	43	32
	3	43	35	50	37	46	37
ABR	1	29	25	14	22	48	25
	2	30	23	48	20	23	19
	3	29	22	28	21	14	19
MAI	1	8	18	24	19	20	17
	2	18	16	29	18	23	17
	3	14	18	17	18	16	15
JUN	1	10	16	17	16	17	16
	2	5	18	11	18	12	12
	3	13	17	22	16	16	15
JUL	1	27	20	19	18	19	15
	2	18	22	24	20	16	17
	3	18	23	23	19	24	17
AGO	1	22	25	18	19	--	15
	2	33	24	31	22	--	21
	3	15	28	25	22	--	22
SET	1	28	26	24	20	34	23
	2	38	27	25	26	12	19
	3	29	23	36	24	43	24
OUT	1	19	36	48	26	25	40
	2	35	27	30	25	33	29
	3	42	42	47	30	41	33
NOV	1	38	44	37	27	43	36
	2	25	38	36	33	41	41
	3	36	41	26	40	37	35
DEZ	1	40	41	37	36	35	36
	2	37	39	40	38	37	39
	3	27	43	54	35	46	40

Tabela 5: Valores mensais da evapotranspiração de referência medida (ET_o) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (ET_{oM}) em Campinas-SP. Período de 1956 a 1959. Valores em mm de água.

Período	1956		1957		1958		1959	
	ET _o	ET _{oM}	ET _o	ET _{oM}	ET _o	ET _{oM}	ET _o	ET _{oM}
JAN	155	170	101	129	125	132	100	126
FEV	115	114	112	103	98	107	88	110
MAR	111	128	108	118	94	110	93	109
ABR	73	79	82	81	6	77	86	84
MAI	49	59	56	75	46	64	50	72
JUN	29	51	50	66	44	67	37	66
JUL	41	64	36	64	45	73	47	81
AGO	49	88	61	90	64	100	49	78
SET	66	92	60	78	58	93	64	98
OUT	88	129	121	140	79	127	91	126
NOV	107	149	107	122	104	140	96	120
DEZ	109	143	113	129	118	137	111	139

Tabela 6: Valores mensais da evapotranspiração de referência medida (ET_o) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (ET_{oM}), em Ribeirão Preto-SP. Período de 1956 a 1959. Valores em mm de água.

Período	1956		1957		1958		1959	
	ET _o	ET _{oM}	ET _o	ET _{oM}	ET _o	ET _{oM}	ET _o	ET _{oM}
JAN	119	162	127	121	146	121	112	105
FEV	125	135	125	101	122	105	133	113
MAR	97	136	124	114	136	118	95	99
ABR	85	88	94	80	73	72	94	84
MAI	55	66	57	84	88	66	84	80
JUN	39	57	52	76	59	63	44	72
JUL	48	76	59	75	57	67	88	91
AGO	53	108	86	96	85	93	88	90
SET	64	117	96	87	80	98	127	118
OUT	118	148	148	148	126	125	120	137
NOV	138	169	123	123	135	146	141	130
DEZ	143	145	134	129	108	134	130	131

Tabella 7: Valores mensais da evapotranspiração de referência medida (ET_o) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (ET_{oM}), em Pindamonhangaba-SP. Período de 1954 a 1956. Valores em mm de água.

Período	1954		1955		1956	
	ET _o	ET _{oM}	ET _o	ET _{oM}	ET _o	ET _{oM}
JAN	--	129	129	117	147	140
FEV	--	101	105	111	128	103
MAR	114	107	124	105	123	102
ABR	88	69	70	63	85	62
MAI	40	52	70	55	59	49
JUN	28	51	50	50	45	42
JUL	63	64	66	57	59	49
AGO	70	77	74	63	--	58
SET	95	77	85	70	89	66
OUT	96	103	125	82	99	102
NOV	99	123	99	102	121	112
DEZ	104	122	131	110	118	115

A P P E N D I C E 2

Tabella 9: Valores decadiários da evapotranspiração de referência medida (ET_o) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (ET_{oM}), considerando diferentes resistências do dossel e altura de vegetação igual a 0,06m, em Campinas-SP, ano de 1956. Valores em mm de água.

Período	ET _o	ET _{oM} ₀₆₀₀	ET _{oM} ₀₆₂₀	ET _{oM} ₀₆₄₀	ET _{oM} ₀₆₆₀	ET _{oM} ₀₆₈₀	ET _{oM} _{06VR}	
JAN	1	44	65	62	58	55	53	46
	2	59	56	54	53	51	50	45
	3	52	68	65	62	60	58	52
FEV	1	59	62	60	58	56	54	49
	2	33	34	33	31	30	29	24
	3	23	32	31	30	29	28	23
MAR	1	34	50	48	46	44	42	36
	2	38	45	43	42	40	39	33
	3	39	48	46	44	43	41	39
ABR	1	29	31	30	29	28	27	22
	2	21	32	30	28	27	26	18
	3	23	26	25	24	23	22	16
MAI	1	13	19	19	18	17	17	13
	2	17	28	26	25	24	23	16
	3	19	19	18	17	17	16	11
JUN	1	10	18	17	16	15	15	10
	2	11	17	16	16	15	14	10
	3	8	22	21	20	19	19	14
JUL	1	11	25	24	22	21	20	14
	2	14	24	23	22	21	21	16
	3	16	22	21	20	19	19	14
AGO	1	11	25	24	22	21	20	13
	2	17	35	33	31	30	28	20
	3	21	41	38	36	35	33	24
SET	1	--	33	31	30	29	28	22
	2	--	31	30	28	27	26	19
	3	25	38	36	34	33	31	23
OUT	1	31	57	53	50	48	45	36
	2	27	48	45	42	39	37	28
	3	30	45	43	42	40	39	33
NOV	1	33	48	46	45	43	42	37
	2	41	70	64	60	56	52	44
	3	33	57	53	50	48	45	37
DEZ	1	28	55	52	50	47	45	38
	2	49	50	48	46	44	42	36
	3	32	57	55	52	50	48	42

Tabela 10: Valores decadiários da evapotranspiração de referência medida (ETo) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (EToM), considerando diferentes resistências do dossel e altura de vegetação igual a 0,06m, em Campinas-SP, ano de 1957. Valores em mm de água.

Período	ETo	EToM ₀₆₀₀	EToM ₀₆₂₀	EToM ₀₆₄₀	EToM ₀₆₆₀	EToM ₀₆₈₀	EToM _{06VR}	
JAN	1	43	53	51	48	46	44	38
	2	21	40	38	36	34	33	26
	3	37	56	54	51	49	47	40
FEV	1	42	41	36	37	35	33	28
	2	34	47	45	42	40	38	31
	3	36	33	31	30	28	27	21
MAR	1	43	47	45	43	42	40	35
	2	29	48	45	43	41	40	33
	3	36	38	36	35	34	32	26
ABR	1	27	32	30	28	27	25	18
	2	30	32	30	29	28	26	19
	3	25	28	27	26	25	24	17
MAI	1	12	28	26	25	23	22	15
	2	17	25	24	24	23	22	17
	3	27	31	29	28	27	25	18
JUN	1	12	23	22	21	20	19	13
	2	21	27	25	24	23	22	15
	3	17	23	22	21	20	20	15
JUL	1	11	21	20	19	19	18	13
	2	17	20	19	18	17	16	11
	3	8	32	30	28	27	26	18
AGO	1	21	33	31	30	28	27	19
	2	14	26	24	23	22	21	15
	3	26	45	41	39	36	34	23
SET	1	15	26	24	23	22	21	15
	2	20	32	30	29	27	26	19
	3	25	33	31	29	28	26	19
OUT	1	34	58	55	52	50	47	40
	2	43	54	52	50	48	46	39
	3	44	44	42	40	38	36	28
NOV	1	36	46	45	43	41	39	31
	2	32	40	38	37	35	34	28
	3	39	51	49	47	45	43	36
DEZ	1	44	46	44	42	40	38	32
	2	27	39	38	36	35	34	29
	3	42	60	58	56	54	53	48

Tabela 11: Valores decadiários da evapotranspiração de referência medida (ETo) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (EToM), considerando diferentes resistências do dossel e altura de vegetação igual a 0,06m, em Campinas-SP, ano de 1958. Valores em mm de água.

Período	ETo	EToM ₀₆₀₀	EToM ₀₆₂₀	EToM ₀₆₄₀	EToM ₀₆₆₀	EToM ₀₆₈₀	EToM _{06VR}	
JAN	1	50	62	60	58	56	54	50
	2	28	43	42	40	39	39	32
	3	47	41	39	37	36	36	28
FEV	1	32	42	41	39	38	27	30
	2	44	54	52	51	49	49	44
	3	22	23	22	22	21	21	17
MAR	1	25	39	38	37	36	36	30
	2	31	34	33	32	32	32	27
	3	38	49	47	45	43	42	33
ABR	1	24	30	29	27	26	26	19
	2	19	26	25	24	23	23	16
	3	23	31	29	28	27	26	18
MAI	1	14	25	24	23	22	22	16
	2	15	28	27	25	24	24	16
	3	17	20	18	18	17	16	11
JUN	1	19	26	25	24	23	23	17
	2	16	21	20	19	18	18	12
	3	9	27	26	25	23	23	16
JUL	1	17	29	27	26	24	24	16
	2	11	22	21	20	19	19	12
	3	17	33	31	29	28	27	19
AGO	1	16	30	29	28	27	26	19
	2	21	38	36	34	33	32	24
	3	27	42	40	38	36	35	24
SET	1	20	34	32	31	30	29	21
	2	15	33	31	29	27	26	17
	3	23	37	36	34	33	32	24
OUT	1	33	54	51	49	47	46	37
	2	23	52	49	46	44	43	34
	3	23	40	38	37	35	35	28
NOV	1	44	56	53	51	49	49	41
	2	26	48	47	45	44	44	37
	3	34	50	48	46	44	44	38
DEZ	1	42	56	54	53	51	51	45
	2	35	36	35	35	34	34	30
	3	41	59	57	54	51	51	42

Tabela 12: Valores decadiários da evapotranspiração de referência medida (ETo) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (EToM, considerando diferentes resistências do dossel e altura de vegetação igual a 0,06m, em Campinas-SP, ano de 1959. Valores em mm de água.

Período	ETo	EToM ₀₆₀₀	EToM ₀₆₂₀	EToM ₀₆₄₀	EToM ₀₆₆₀	EToM ₀₆₈₀	EToM _{06VR}
1	21	45	43	41	40	39	33
JAN 2	40	38	37	35	34	33	28
3	39	56	55	53	52	50	46
1	25	37	36	35	34	33	29
FEV 2	35	44	42	41	40	39	35
3	26	36	36	35	34	33	31
1	30	47	46	44	43	41	36
MAR 2	31	36	35	33	32	31	25
3	32	37	36	35	34	34	30
1	26	31	30	30	29	28	24
ABR 2	29	31	31	30	29	29	15
3	31	26	25	25	24	23	18
1	15	28	28	27	26	25	21
MAI 2	21	25	24	23	22	21	16
3	14	24	23	23	22	21	17
1	18	22	21	20	20	19	14
JUN 2	6	25	24	23	22	21	16
3	13	24	23	23	22	22	17
1	13	28	26	25	24	24	18
JUL 2	16	27	27	26	25	24	20
3	18	29	29	28	27	26	22
1	12	21	20	20	19	18	14
AGO 2	18	26	25	24	23	22	16
3	19	39	38	36	35	34	26
1	15	27	26	26	25	25	21
SET 2	22	40	37	35	34	32	23
3	27	39	37	36	34	33	26
1	25	51	49	47	45	44	36
OUT 2	32	38	37	36	35	34	29
3	34	50	48	46	44	42	35
1	31	43	42	41	40	39	35
NOV 2	23	48	46	44	42	40	34
3	44	41	40	39	38	36	31
1	40	43	41	40	39	38	34
DEZ 2	31	57	55	53	52	50	46
3	40	53	51	50	48	47	43

Tabela 13: Valores decadiários da evapotranspiração de referência medida (ETo) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (EToM), considerando diferentes resistências do dossel e altura de vegetação igual a 0,12m, em Campinas-SP, ano de 1956. Valores em mm de água.

Período	ETo	EToM ₁₂₀₀	EToM ₁₂₂₀	EToM ₁₂₄₀	EToM ₁₂₆₀	EToM ₁₂₈₀	EToM _{12VR}
1	44	71	66	61	57	54	54
JAN 2	59	59	57	55	53	51	50
3	52	72	69	65	62	59	59
1	59	68	63	60	58	55	55
FEV 2	33	35	34	32	31	29	28
3	23	34	32	31	30	28	27
1	34	54	51	48	45	43	42
MAR 2	38	48	45	43	42	40	39
3	39	51	48	46	44	42	40
1	29	33	32	30	29	28	26
ABR 2	21	35	33	31	29	27	23
3	23	28	27	25	24	22	20
1	13	21	20	19	18	17	16
MAI 2	17	30	28	26	25	24	21
3	19	20	19	18	17	16	14
1	10	19	18	17	16	15	13
JUN 2	11	19	17	16	15	15	13
3	8	24	23	21	20	20	17
1	11	27	26	24	23	21	18
JUL 2	14	26	25	24	23	22	19
3	16	23	22	21	20	19	17
1	11	28	26	24	22	21	18
AGO 2	17	39	36	34	32	30	26
3	21	45	42	39	37	35	31
1	--	36	34	32	31	29	26
SET 2	--	34	32	30	29	27	24
3	25	42	39	37	35	33	29
1	31	62	57	53	50	47	45
OUT 2	27	52	48	44	41	38	36
3	30	47	45	43	41	40	39
1	33	51	48	46	45	43	42
NOV 2	41	77	69	63	58	54	55
3	33	62	57	53	50	47	45
1	28	60	56	53	50	47	45
DEZ 2	49	53	50	48	46	43	43
3	32	61	57	54	52	49	49

Tabela 14: Valores decadiários da evapotranspiração de referência medida (ETo) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (EToM), considerando diferentes resistências do dossel e altura de vegetação igual a 0,12m, em Campinas-SP, ano de 1957. Valores em mm de água.

Período	ETo	EToM ₁₂₀₀	EToM ₁₂₂₀	EToM ₁₂₄₀	EToM ₁₂₆₀	EToM ₁₂₈₀	EToM _{12VR}
1	43	57	54	50	48	45	45
JAN 2	21	42	39	37	35	33	32
3	37	60	56	53	50	48	47
1	42	43	40	38	36	34	32
FEV 2	34	50	47	44	41	39	38
3	36	35	33	31	29	27	26
1	43	49	47	45	43	41	40
MAR 2	29	51	48	45	43	41	39
3	36	40	38	36	34	33	31
1	27	35	32	30	28	26	23
ABR 2	30	35	32	31	29	27	25
3	25	31	29	27	26	24	22
1	12	31	29	27	25	23	20
MAI 2	17	27	26	25	24	23	21
3	27	34	32	30	28	27	23
1	12	26	24	23	21	20	17
JUN 2	21	30	28	26	25	23	20
3	17	25	24	23	21	21	18
1	11	23	22	21	20	19	16
JUL 2	17	22	20	19	18	17	14
3	8	35	33	31	29	27	23
1	21	37	35	32	30	29	25
AGO 2	14	28	26	25	23	22	19
3	26	50	46	42	39	37	31
1	15	28	26	24	23	22	20
SET 2	20	34	32	30	29	27	24
3	25	36	33	31	29	27	24
1	34	63	59	55	52	49	48
OUT 2	43	59	56	53	50	48	46
3	44	47	44	42	40	37	35
1	36	52	48	45	43	40	38
NOV 2	32	42	40	38	36	34	33
3	39	55	52	49	46	44	42
1	44	49	46	43	41	39	38
DEZ 2	27	41	39	37	36	34	34
3	42	63	60	58	56	54	53

abela 15: Valores decadiários da evapotranspiração de referência medida (ETo) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (EToM, considerando diferentes resistências do dossel e altura de vegetação igual a 0,12m, em Campinas-SP, ano de 1958. Valores em mm de água.

Período	ETo	EToM ₁₂₀₀	EToM ₁₂₂₀	EToM ₁₂₄₀	EToM ₁₂₆₀	EToM ₁₂₈₀	EToM _{12VR}
1	50	66	63	60	58	56	55
JAN 2	28	45	43	42	40	38	37
3	47	42	40	38	37	35	34
1	32	44	42	40	38	37	36
FEV 2	44	56	54	52	51	49	49
3	22	24	23	22	22	21	20
1	25	41	39	38	37	35	34
MAR 2	31	35	34	33	32	31	30
3	38	52	49	46	44	42	40
1	24	32	30	29	27	26	24
ABR 2	19	29	27	25	24	23	20
3	23	34	32	30	28	27	23
1	14	27	26	25	23	22	20
MAI 2	15	31	29	27	25	24	21
3	17	21	20	18	17	16	14
1	19	28	27	26	24	23	21
JUN 2	16	23	22	20	19	18	16
3	9	30	28	26	25	24	20
1	17	33	30	28	26	25	21
JUL 2	11	24	23	21	20	19	16
3	17	36	34	32	30	28	24
1	16	33	32	30	28	27	24
AGO 2	21	42	40	37	36	34	30
3	27	47	44	41	38	36	31
1	20	37	35	33	32	30	27
SET 2	15	37	33	31	28	26	23
3	23	41	39	37	35	33	30
1	33	59	55	52	49	46	45
OUT 2	23	56	52	48	45	42	42
3	23	42	40	38	36	35	33
1	44	60	57	54	51	49	48
NOV 2	26	51	49	47	45	44	43
3	34	53	50	48	46	44	43
1	42	59	57	55	53	51	51
DEZ 2	35	37	36	35	34	34	33
3	41	64	60	56	53	50	50

Tabela 16: Valores decadiários da evapotranspiração de referência medida (ETo) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (EToM), considerando diferentes resistências do dossel e altura de vegetação igual a 0,12m, em Campinas-SP, ano de 1959. Valores em mm de água.

Período	ETo	EToM ₁₂₀₀	EToM ₁₂₂₀	EToM ₁₂₄₀	EToM ₁₂₆₀	EToM ₁₂₈₀	EToM _{12VR}
1	21	47	45	43	41	39	38
JAN 2	40	40	38	37	35	33	32
3	39	59	57	55	53	51	51
1	25	38	37	36	35	33	33
FEV 2	35	45	44	42	41	40	39
3	26	38	37	36	35	34	33
1	30	50	48	46	44	42	41
MAR 2	31	39	36	35	33	31	30
3	32	38	37	36	35	34	33
1	26	33	32	31	30	29	28
ABR 2	29	33	32	31	31	30	28
3	31	28	27	26	25	24	21
1	15	30	29	28	27	26	24
MAI 2	21	27	25	24	23	22	19
3	14	26	25	24	23	22	20
1	18	23	22	21	21	20	18
JUN 2	6	27	25	24	23	22	19
3	13	26	25	24	23	23	20
1	13	31	29	28	26	25	22
JUL 2	16	30	29	28	27	26	23
3	18	32	31	30	28	28	25
1	12	23	22	21	20	19	17
AGO 2	18	38	26	25	24	23	20
3	19	43	41	39	38	36	32
1	15	29	28	28	27	26	24
SET 2	22	44	41	39	36	34	30
3	27	43	41	39	37	35	31
1	25	56	53	50	48	46	43
OUT 2	32	40	39	38	37	35	33
3	34	53	50	48	46	44	42
1	31	44	43	42	41	40	39
NOV 2	23	51	48	46	43	41	40
3	44	43	42	40	38	37	36
1	40	45	43	41	40	39	38
DEZ 2	31	60	57	55	53	51	51
3	40	54	52	51	49	47	48

Tabella 18: Valores mensais da evapotranspiração de referência medida (ET_o) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (ET_{oM}), considerando diferentes resistências do dossel e uma altura da vegetação de 0,06m, em Campinas-SP, ano de 1956. Valores em mm de água.

Período	ET _o	ET _{oM} ₀₆₀₀	ET _{oM} ₀₆₂₀	ET _{oM} ₀₆₄₀	ET _{oM} ₀₆₆₀	ET _{oM} ₀₆₈₀	ET _{oM} _{06VR}
JAN	155	190	182	174	167	161	143
FEV	115	126	121	117	113	109	92
MAR	111	143	138	132	127	122	103
ABR	73	89	84	81	77	74	55
MAI	49	66	63	60	58	55	40
JUN	29	57	54	52	49	47	34
JUL	41	71	68	65	62	60	43
AGO	49	100	94	89	85	81	57
SET	66	102	97	93	89	85	64
OUT	88	149	141	133	127	121	97
NOV	107	174	164	155	147	140	118
DEZ	109	162	154	148	141	136	115

Tabella 19: Valores mensais da evapotranspiração de referência medida (ET_o) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (ET_{oM}), considerando diferentes resistências do dossel e altura de vegetação igual a 0,06m, em Campinas-SP, ano de 1957. Valores em mm de água.

Período	ET _o	ET _{oM} ₀₆₀₀	ET _{oM} ₀₆₂₀	ET _{oM} ₀₆₄₀	ET _{oM} ₀₆₆₀	ET _{oM} ₀₆₈₀	ET _{oM} _{06VR}
JAN	101	149	142	135	129	124	103
FEV	112	120	114	108	103	98	78
MAR	108	133	127	122	117	113	93
ABR	82	92	87	83	79	75	54
MAI	56	84	80	76	72	69	50
JUN	50	73	69	66	63	60	43
JUL	36	72	68	65	62	59	41
AGO	61	102	96	91	86	82	57
SET	60	89	85	80	77	73	53
OUT	121	157	150	143	137	131	107
NOV	107	139	132	126	121	115	94
DEZ	113	144	138	133	128	124	106

Tabela 20: Valores mensais da evapotranspiração de referência medida (ETo) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (EToM), considerando diferentes resistências do dossel e altura de vegetação igual a 0,06m, em Campinas-SP, ano de 1958. Valores em mm de água.

Período	ETo	EToM ₀₆₀₀	EToM ₀₆₂₀	EToM ₀₆₄₀	EToM ₀₆₆₀	EToM ₀₆₈₀	EToM _{06VR}
JAN	125	146	141	136	131	130	109
FEV	98	116	112	109	106	105	88
MAR	94	121	117	113	109	109	90
ABR	66	87	83	79	76	75	53
MAI	46	73	70	66	63	62	43
JUN	44	75	71	68	65	64	44
JUL	45	83	78	74	71	69	46
AGO	64	110	104	99	95	93	67
SET	58	106	100	95	90	88	62
OUT	79	146	139	132	126	124	98
NOV	104	154	148	143	138	137	117
DEZ	118	149	145	140	136	135	116

Tabela 21: Valores mensais de evapotranspiração de referência medida (ETo) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (EToM), considerando diferentes resistências do dossel e altura de vegetação igual a 0,06m, em Campinas-SP, ano de 1959. Valores em mm de água.

Período	ETo	EToM ₀₆₀₀	EToM ₀₆₂₀	EToM ₀₆₄₀	EToM ₀₆₆₀	EToM ₀₆₈₀	EToM _{06VR}
JAN	100	139	134	130	125	121	106
FEV	88	118	115	112	110	107	96
MAR	93	120	116	112	109	105	89
ABR	86	89	86	84	82	80	66
MAI	50	77	75	72	70	68	53
JUN	37	70	68	66	63	61	47
JUL	47	85	82	80	77	75	59
AGO	49	84	81	78	75	72	55
SET	64	105	101	97	94	90	69
OUT	91	138	133	128	123	119	100
NOV	98	132	127	123	119	116	100
DEZ	111	152	147	143	139	135	122

Tabela 22: Valores mensais de evapotranspiração de referência medida (ETo) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (EToM), considerando diferentes resistências do dossel e altura de vegetação igual a 0,12m, em Campinas-SP, ano de 1956. Valores em mm de água.

Período	ETo	EToM ₁₂₀₀	EToM ₁₂₂₀	EToM ₁₂₄₀	EToM ₁₂₆₀	EToM ₁₂₈₀	EToM _{12VR}
JAN	155	203	192	182	174	165	165
FEV	115	133	127	121	116	111	107
MAR	111	152	144	137	131	125	121
ABR	73	96	91	86	81	77	69
MAI	49	71	67	63	60	57	51
JUN	29	61	58	55	52	49	43
JUL	41	77	73	69	66	62	55
AGO	49	111	103	96	90	85	74
SET	66	112	106	101	95	90	80
OUT	88	160	150	140	132	125	119
NOV	107	188	175	163	153	141	142
DEZ	109	173	163	154	146	139	136

Tabela 23: Valores mensais de evapotranspiração de referência medida (ETo) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (EToM), considerando diferentes resistências do dossel e altura de vegetação igual a 0,12m, em Campinas-SP, ano de 1957. Valores em mm de água.

Período	ETo	EToM ₁₂₀₀	EToM ₁₂₂₀	EToM ₁₂₄₀	EToM ₁₂₆₀	EToM ₁₂₈₀	EToM _{12VR}
JAN	101	158	149	140	133	126	123
FEV	112	128	120	112	106	100	96
MAR	108	140	133	126	120	115	111
ABR	82	100	93	88	83	78	70
MAI	56	92	86	81	77	73	64
JUN	50	80	75	71	67	64	55
JUL	36	79	74	70	66	62	53
AGO	61	114	106	98	92	87	74
SET	60	97	91	85	80	76	68
OUT	121	170	160	151	143	136	129
NOV	107	149	140	132	125	119	114
DEZ	113	151	144	137	131	126	124

Tabela 24: Valores mensais de evapotranspiração de referência medida (ETo) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (EToM), considerando diferentes resistências do dossel e altura de vegetação igual a 0,12m, em Campinas-SP, ano de 1958. Valores em mm de água.

Período	ETo	EToM ₁₂₀₀	EToM ₁₂₂₀	EToM ₁₂₄₀	EToM ₁₂₆₀	EToM ₁₂₈₀	EToM _{12VR}
JAN	125	154	147	141	135	129	126
FEV	98	122	117	112	108	104	101
MAR	94	126	121	116	111	107	104
ABR	66	94	89	84	79	75	67
MAI	46	79	74	70	66	63	55
JUN	44	82	77	72	69	65	57
JUL	45	92	86	80	75	71	61
AGO	64	122	115	108	102	97	84
SET	58	116	109	102	96	90	80
OUT	79	156	147	138	130	123	119
NOV	104	164	156	149	143	137	134
DEZ	118	157	151	145	139	134	132

Tabela 25: Valores mensais de evapotranspiração de referência medida (ETo) e estimada pelo modelo de Penman-Monteith (EToM), considerando diferentes resistências do dossel e altura de vegetação igual a 0,12m, em Campinas-SP, ano de 1959. Valores em mm de água.

Período	ETo	EToM ₁₂₀₀	EToM ₁₂₂₀	EToM ₁₂₄₀	EToM ₁₂₆₀	EToM ₁₂₈₀	EToM _{12VR}
JAN	100	145	139	133	128	123	121
FEV	88	122	119	115	112	108	106
MAR	93	126	121	116	111	107	103
ABR	86	94	91	88	85	83	77
MAI	50	83	79	76	73	71	64
JUN	37	76	73	70	67	64	57
JUL	47	93	90	86	83	80	70
AGO	49	92	87	83	80	76	67
SET	64	116	110	105	100	96	85
OUT	91	147	140	134	128	123	117
NOV	98	139	133	128	123	118	115
DEZ	111	158	152	147	142	137	136