ANÁLISE DA FUNÇÃO VELOCIDADE DO VENTO
NA EQUAÇÃO DE PENMAN

MIGUEL ANGELO MANIERO

Engenheiro Agrônomo

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:
Solos e Nutrição de Plantas.

P I R A C I C A B A
Estado de São Paulo - Brasil
Junho - 1993

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

M278a Maniero, Miguel Angelo
Análise da função velocidade do vento na Equação
de Penman. Piracicaba, 1993.
69p.

Tese - ESALQ
Bibliografia.

1. Climatologia 2. Equação de Penman 3. Evapotrans-
piração 4. Vento - Velocidade I. Escola Superior de
Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba

CDD 551.572

ANÁLISE DA FUNÇÃO VELOCIDADE DO VENTO
NA EQUAÇÃO DE PENMAN

MIGUEL ANGELO MANIERO

Aprovada em 28/06/1993

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Antonio Roberto Pereira	ESALQ/USP
Prof. Dr. Antonio Sanches de Oliveira	ESALQ/USP
Prof. Dr. Nilson Augusto Villa Nova	ESALQ/USP
Prof. Dr. Edson José de Arruda Leme	CCA/UFSCar
Prof. Dr. Rubismar Stolf	CCA/UFSCar

Prof. Dr. Antonio Roberto Pereira
Orientador

À memória de
minha mãe Amélia

OFEREÇO

A Sônia

DEDICO

AGRADECIMENTOS

- À Deus pela força dada na realização deste trabalho.
- Ao Centro de Ciências Agrárias da UFSCar pela oportunidade oferecida.
- Ao extinto Programa Nacional de Melhoramento da Cana-de-Açúcar - PLANALSUCAR, pela oportunidade de meu aprimoramento profissional.
- À CAPES - Coordenadoria de Aprimoramento de Pessoal de Nível Superior, pela concessão de bolsa de estudo.
- Ao amigo Antonio Roberto Pereira, pela orientação segura, amizade e compreensão ao longo do curso.
- Ao amigo Nilson Augusto Villa Nova, grande professor, orientador e conselheiro em todas as horas.
- À Agrônoma Sônia Maria De Stefano Piedade, pelas análises estatísticas realizadas.
- Ao Prof. Valter Barbieri, pelo auxílio na instalação e condução do experimento.
- Ao companheiro Caetano Brugnaro, pela colaboração na confecção do texto.
- À Coordenação do Curso de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, na pessoa do Prof. Dr. Geraldo Victorino de França, pelo apoio.
- Aos docentes e funcionários do Departamento de Recursos Naturais e Proteção Ambiental, pelo convívio e apoio constante.

- Aos técnicos agrícolas Armando, Divino, Rubens e Salassiel, pela amizade e colaboração na instalação e condução do experimento.
- Às bibliotecárias do CCA/UFScar, Ana e Sueli pela amizade e auxílio na elaboração das referências bibliográficas.
- Aos amigos José Carlos Casagrande e Luiz Carlos Ferreira da Silva, que juntamente conosco enfrentaram todas as adversidades oriundas da inveja e incompetência de pessoas inescrupulosas, que se esconderam atrás de cartas anônimas tentando impedir a concretização desta caminhada.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE TABELAS	ix
LISTA DE FIGURAS	xii
RESUMO	xvi
SUMMARY	xviii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
3. MATERIAL E MÉTODOS	13
3.1. Local	13
3.2. Evapotranspiração do Gramado (LE)	13
3.3. Radiação Líquida (R_n).....	14
3.4. Função da Velocidade do Vento ($f(u)$)	15
3.5. Média Diária do Déficit de Pressão de Vapor	16
3.5.1. Método Padrão	17
3.5.2. Método 1	18
3.5.3. Método 2	19
3.5.4. Método 3	19
3.5.5. Método 4	20
3.5.6. Método 5	20
3.5.7. Método 6	20
3.5.8. Temperatura de Ponto de Orvalho	21
3.6. Medidas e Observações Meteorológicas	23
3.6.1. Velocidade do Vento	23
3.6.2. Insolação	24

3.6.3. Temperatura e Umidade Relativa do Ar	24
3.7. Análises Estatísticas	24
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
4.1. Teste das Estimativas do Déficit Médio	
Diário de Pressão de Vapor	26
4.2. Estimativa dos Coeficientes da Função do	
Vento	37
5. CONCLUSÕES	58
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
APÊNDICE	64

LISTA DE TABELAS

	Página
Tabela 1	Valores de déficit de pressão de vapor médio (mmHg) estimado por diferentes métodos, usando dados de temperatura do ar coletados às 9h , 15h e 21h. 29
Tabela 2	Valores de déficit de pressão de vapor médio (mmHg) estimado por diferentes métodos, usando dados de temperatura do ar coletados às 9h , 15h. 30
Tabela 3	Valores da análise de regressão linear simples comparando os seis métodos com o método referência, para leituras das 9h , 15h e 21 h. 31
Tabela 4	Valores da análise de regressão linear simples comparando os seis métodos com o método referência, para leituras das 9h , 15h. 31
Tabela 5	Valores da velocidade média do vento e do déficit de pressão de vapor médio (mmHg) estimados pelos seis métodos testados para a estação da primavera de 1985. 43
Tabela 6	Valores da velocidade média do vento e do déficit de pressão de vapor médio (mmHg) estimados pelos seis métodos testados para a estação do verão de 1986. 44

Tabela 7	Valores da velocidade média do vento e do déficit de pressão de vapor médio (mmHg) estimados pelos seis métodos testados para a estação do outono de 1986.	45
Tabela 8	Valores da análise de regressão linear simples , entre a função do vento estimada pelos seis métodos e a velocidade do vento em m/seg , utilizando-se dados climáticos coletados às 9h , 15h e 21h para a estação da primavera de 1985.	46
Tabela 9	Valores da análise de regressão linear simples , entre a função do vento estimada pelos seis métodos e a velocidade do vento em m/seg , utilizando-se dados climáticos coletados às 9h , 15h e 21h para a estação do verão de 1986.	46
Tabela 10	Valores da análise de regressão linear simples , entre a função do vento estimada pelos seis métodos e a velocidade do vento em m/seg , utilizando-se dados climáticos coletados às 9h , 15h e 21h para a estação do outono de 1986.	47
Tabela 11	Valores de m , a e b do termo aerodinâmico da equação de Penman com dados de Araras - SP para a estação da primavera com velocidade do vento em km/dia.	47

- Tabela 12 Valores de m , a e b do termo aerodinâmico da equação de Penman com dados de Araras - SP para a estação do verão com velocidade do vento em km/dia. 47
- Tabela 13 Valores de m , a e b do termo aerodinâmico da equação de Penman com dados de Araras - SP para a estação do outono com velocidade do vento em km/dia. 48

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1	Regressão linear simples entre os métodos 1 e 2 e o método padrão de estimativa do déficit de pressão de vapor, para observações meteorológicas das 9h, 15h e 21h. 34
Figura 2	Regressão linear simples entre os métodos 3 e 4 e o método padrão de estimativa do déficit de pressão de vapor, para observações meteorológicas das 9h, 15h e 21h. 35
Figura 3	Regressão linear simples entre os métodos 5 e 6 e o método padrão de estimativa do déficit de pressão de vapor, para observações meteorológicas das 9h, 15h e 21h. 36
Figura 4	Regressão linear simples entre os métodos 1 e 2 e o método padrão de estimativa do déficit de pressão de vapor, para observações meteorológicas das 9h, 15h. 37
Figura 5	Regressão linear simples entre os métodos 3 e 4 e o método padrão de estimativa do déficit de pressão de vapor, para observações meteorológicas das 9h, 15h. 38

- Figura 6 Regressão linear simples entre os método 5 e o método padrão de estimativa do déficit de pressão de vapor, para observações meteorológicas das 9h e 15h. 39
- Figura 7 Equação original de Penman e regressão linear simples entre a função da velocidade do vento, calculada com base nos métodos 1 e 2 de estimativa do déficit de pressão de vapor, e a velocidade média diária do vento para a estação da primavera de 1985. 57
- Figura 8 Equação original de Penman e regressão linear simples entre a função da velocidade do vento, calculada com base nos métodos 3 e 4 de estimativa do déficit de pressão de vapor, e a velocidade média diária do vento para a estação da primavera de 1985. 58
- Figura 9 Equação original de Penman e regressão linear simples entre a função da velocidade do vento, calculada com base nos métodos 5 e 6 de estimativa do déficit de pressão de vapor, e a velocidade média diária do vento para a estação da primavera de 1985. 59

- Figura 10 Equação original de Penman e regressão linear simples entre a função da velocidade do vento, calculada com base nos métodos 1 e 2 de estimativa do déficit de pressão de vapor, e a velocidade média diária do vento para a estação do verão de 1986. 60
- Figura 11 Equação original de Penman e regressão linear simples entre a função da velocidade do vento, calculada com base nos métodos 3 e 4 de estimativa do déficit de pressão de vapor, e a velocidade média diária do vento para a estação do verão de 1986. 61
- Figura 12 Equação original de Penman e regressão linear simples entre a função da velocidade do vento, calculada com base nos métodos 5 e 6 de estimativa do déficit de pressão de vapor, e a velocidade média diária do vento para a estação do verão de 1986. 62
- Figura 13 Equação original de Penman e regressão linear simples entre a função da velocidade do vento, calculada com base nos métodos 1 e 2 de estimativa do déficit de pressão de vapor, e a velocidade média diária do vento para a estação do outono de 1986. 63

- Figura 14 Equação original de Penman e regressão linear simples entre a função da velocidade do vento, calculada com base nos métodos 3 e 4 de estimativa do déficit de pressão de vapor, e a velocidade média diária do vento para a estação do outono de 1986. 64
- Figura 15 Equação original de Penman e regressão linear simples entre a função da velocidade do vento, calculada com base nos métodos 5 e 6 de estimativa do déficit de pressão de vapor, e a velocidade média diária do vento para a estação do outono de 1986. 65

ANÁLISE DA FUNÇÃO VELOCIDADE DO VENTO NA EQUAÇÃO DE PENMAN

Autor: Miguel Angelo Maniero

Orientador: Prof. Dr. Antonio Roberto Pereira

RESUMO

A função original da velocidade do vento da equação de Penman, $f(u) = m (a + b u)$, tem sido usada extensivamente no mundo sem um teste de fidedignidade dos parâmetros m , a e b para os diferentes ambientes, principalmente o tropical. Alguns registros indicam que os parâmetros da função da velocidade do vento são também muito sensíveis à forma como o déficit de pressão de vapor médio diário (Δe) é computado. Os objetivos desse trabalho são dois. Primeiro, comparar seis diferentes métodos usados para estimar o Δe diário usando observações tomadas em estação meteorológica nos horários recomendados pela Organização Meteorológica Mundial, isto é, 9h, 15h e 21h. O Δe diário padrão foi computado dos déficits médios horários obtidos de termohigrógrafos entre o nascer e o pôr do sol. Segundo, encontrar parâmetros apropriados da função da velocidade do vento usando cada método de estimativa de Δe durante as estações da primavera, verão e outono. A evapotranspiração diária (LE) para grama foi medida com um lisímetro de nível freático constante. O experimento foi conduzido no Centro de Ciências Agrárias da UFSCar, localizado em Araras, SP, Brasil ($22^{\circ} 18'S$; $47^{\circ} 23'W$; 617m) onde a classificação de Koeppen indica

um clima tipo Cwa.

Todos os seis métodos testados subestimaram o Δe padrão, mostrando, entretanto, boas correlações. Os resultados mostraram também que a função original de vento, com $m = 0,35$, $a = 1$ e $b = 0,00625$ quando u é dado em km/dia e Δe em mmHg, estimou bem a LE medida durante o verão. Enquanto, nas estações da primavera e outono os parâmetros originais proporcionaram valores maiores para $f(u)$ do que o método usado para computar Δe , resultando numa superestimação de LE.

ANALYSIS OF THE WIND FUNCTION IN THE PENMAN'S EQUATION

Author: Miguel Angelo Maniero

Adviser: Prof. Dr. Antonio Roberto Pereira

SUMMARY

The original wind function of the Penman's equation, that is, $f(u) = m (a + bu)$, has been used extensively throughout the world without a test of goodness of the parameters m , a e b for different environments mainly the tropical. Some reports indicate that the wind function parameters are also very sensitive to the way the daily average vapor pressure deficit (Δe) is computed. Therefore, the objectives of this work are twofold. First, compare six different methods used to estimate the daily (Δe) using the observations taken at the weather station at the conventional times recommended by the World Meteorological Organization, that is, 9h, 15h and 21h local time. The standard daily Δe was computed from the average hourly deficits obtained between sunrise and sunset from a thermo-hygrograph. Second, find the appropriate parameters for the wind function using each Δe method during the summer, fall and spring seasons. The daily evapotranspiration (LE) for grass was measured with a constant water level lysimeter. The experiment was conducted at the Centro de Ciências Agrárias, UFSCar, located in Araras, SP, Brazil ($22^{\circ} 18'S$; $47^{\circ} 23'W$; 617m) where the Koeppen classification indicates a Cwa

climate.

All the six methods tested underestimated the standard Δe , showing, however, a good correlations. The results show also that the original wind function, with $m = 0,35$, $a = 1$ and $b = 0,00625$ when u is given in km/day and Δe in mm of Hg, estimated fairly well the measured LE during the summer. However, in the spring and fall seasons the original parameters give consistently larger values for $f(u)$ regardless of the method used to compute Δe , resulting in overestimation of LE.

1. INTRODUÇÃO

Quando se trabalha com planejamento e programação de uso de água em projetos de irrigação e estudos hidrológicos detalhados de bacias hidrográficas, há necessidade de estimativas consistentes da quantidade de água evaporada por uma superfície (solo ou água) ou evapotranspirada por uma comunidade vegetal, pois, a evapotranspiração é elemento fundamental para o balanço hídrico representando uma das perdas de água do sistema solo - planta.

Para suprir as necessidades hídricas das culturas utiliza-se a irrigação como complemento das chuvas quando essas não são suficientes. As regas leves, repõem água apenas nas camadas superficiais do solo, não umedecendo todo o volume de solo explorado pelo sistema radicular. Regas excessivas acarretam perda de água e nutrientes através da percolação abaixo da zonas das raízes.

Muito se tem discutido sobre a melhor e mais eficiente forma de se quantificar a evapotranspiração, seja ela, de uma pequena área experimental ou em escala regional. Os métodos de medida da evapotranspiração variam desde a utilização de um simples tanque de evaporação até métodos

micrometeorológicos muito sofisticados.

As necessidades de previsão e as dificuldades de utilização de cada método de medida da evapotranspiração levaram ao desenvolvimento de modelos de estimativa, sendo alguns com forte base teórica e outros totalmente empíricos. Alguns modelos teóricos exigem informações que não são obtidas nas observações de rotina dos postos meteorológicos. Tais modelos são de difícil operacionalização para as atividades cotidianas.

O primeiro tratamento físico adequado, na tentativa de se resolver o problema da estimativa da evaporação de superfícies naturais, foi feito por PENMAN (1948), utilizando dados de evaporação obtidos em lagos e tanques de evaporação. A partir desse trabalho vários outros foram desenvolvidos e alterações no método original foram sugeridas, inclusive pelo próprio Penman.

O método proposto por Penman é constituído de um termo que expressa o efeito do balanço local da radiação solar mais um termo que representa as condições aerodinâmicas do local. O termo aerodinâmico tem dois componentes, um é uma função empírica da velocidade do vento, isto é, da renovação do ar sobre a superfície evaporante, que depende também da rugosidade aerodinâmica da superfície e o outro é o déficit de pressão de vapor, que representa o poder evaporante do ar.

Alguns pesquisadores, como PRUITT & DOORENBOS (1977) e CUENCA & NICHOLSON (1982), concluíram

que a função empírica da velocidade do vento depende fundamentalmente da maneira como se determina o déficit de pressão de vapor.

Todas as tentativas de adaptação da função da velocidade do vento da equação de Penman foram feitas com dados obtidos na Inglaterra e Estados Unidos. Este trabalho tem por objetivo, analisar comparativamente alguns métodos utilizados para estimativa do déficit de pressão de vapor médio diário e estabelecer os coeficientes da função de vento da equação de Penman para as condições de Araras-SP utilizando-se de dados de evapotranspiração diária obtida em lisímetros de lençol freático constante e tendo grama como cultura de cobertura, condição semelhante àquela utilizada por PENMAN (1948).

2. REVISÃO DE LITERATURA

Os trabalhos desenvolvidos sobre evaporação de uma superfície (solo ou água) e evapotranspiração de comunidades vegetais começaram a ser intensivamente discutidos e analisados por pesquisadores de várias partes do mundo a partir dos trabalhos de PENMAN (1948) e de THORNTHWAITE (1948). Enquanto o método de Thornthwaite é totalmente empírico, o de Penman resultou da análise física do processo evaporativo em condições naturais. Utilizando dados de evaporação obtidos em lagos e tanques de evaporação PENMAN (1948) propôs a equação

$$LE = [s/(s+\gamma)] (R_n - G) + [\gamma/(s+\gamma)] \Delta e f(u) \quad (1)$$

para estimativa da taxa diária de evaporação, onde LE - taxa de evapotranspiração (mm/dia); R_n - saldo diário do balanço de radiação solar (expresso em milímetros equivalente de evaporação); G - fluxo de calor no solo (mm); s - tangente à curva de pressão de saturação do vapor d'água no ponto dado pela temperatura do bulbo úmido; γ -

constante psicrométrica; Δe - déficit de saturação médio diário do ar; $f(u)$ - função empírica da velocidade do vento (u), que determina o coeficiente de transporte turbulento de vapor d'água na atmosfera.

Nota-se, que a equação (1) é composta de um termo que expressa o efeito local da radiação solar mais outro que representa as condições aerodinâmicas da superfície. Essa equação combina as bases físicas do balanço de energia radiante com processos turbulentos de transferência de massa, sendo conhecida como método combinado de estimativa da evapotranspiração.

Em virtude das dificuldades de medida de R_n e G naquela época, PENMAN (1948) utilizou relações empíricas para estimar os valores diários de R_n assumindo que G é desprezível em superfícies bem supridas de umidade. Posteriormente, foram desenvolvidos equipamentos para tais medidas mas, mesmo em tempos recentes tais observações são feitas apenas de maneira intensiva em experimentos micrometeorológicos. Portanto, mesmo na atualidade as relações empíricas continuam como única alternativa e serão aqui utilizadas para permitir extrapolação dos resultados obtidos a outras regiões tropicais.

As expressões $s/(s + \gamma)$ e $\gamma/(s + \gamma)$ representam fatores de ponderação, respectivamente, dos termos radiativo e aerodinâmico visto que a soma dessas expressões

é igual a 1. Tais expressões podem ser interpretadas como eficiências de cada termo.

A função $f(u)$ depende fundamentalmente das características aerodinâmicas da superfície evaporante, onde a rugosidade determina a turbulência local e o processo de transporte. Em condições normais de tempo, quanto maior a rugosidade maior a mistura na camada imediatamente acima da superfície. A função empírica da velocidade do vento (u), geralmente é representada por uma regressão linear (PENMAN, 1948; TANNER & PELTON, 1960 e BRUTSAERT & YU, 1962), ou seja,

$$f(u) = m (a + b u) . \quad (2)$$

Inicialmente, PENMAN (1948) utilizou os parâmetros $m = 0,26$; $a = 1$; e $b = 0,00625$ quando u é medida a 2 metros acima da superfície evaporante em milhas / dia e Δe em mmHg. Posteriormente, PENMAN (1956) sugeriu que $a = 0,5$ seria mais adequado, mantendo-se m e b com os valores iniciais. Posteriormente, PENMAN (1963) retornou aos valores originais. Alguns autores como GRINDLEY (1972), MCGUINNESS & BORDNE (1972) e ALLEN (1986) adotam para uso de rotina em trabalhos com culturas os parâmetros de PENMAN (1948).

Após ampla revisão de observações coletadas

em diversos locais, DOORENBOS & PRUITT (1975) sugeriram os seguintes parâmetros para a função do vento : $m = 0,27$; $a = 1$ e $b = 0,01$ com vento em km/dia e Δe em mmHg. No Brasil, VILLA NOVA & REICHARDT (1989) recomendam os valores estabelecidos por PENMAN (1956). Comparando a equação estabelecida por DOORENBOS & PRUITT (1975) com uma expressão teórica STIGTER (1980) deduziu que o problema de calibração para a função vento permanece, e que somente experimentos com lisímetros podem resolver este problema. OMETTO (1981) sugere o uso dos coeficientes $m = 0,35$; $a = 1$ e $b = 0,5257$, para velocidade do vento em m/s e Δe em mmHg.

Usando dados obtidos para Idaho, EUA, WRIGHT & JENSEN (1972) estabeleceram para cultura de alfafa de porte alto, valores para os coeficientes $a = 0,75$ e $b = 0,01185$ com o vento medido em milhas/dia e Δe em mb. DOORENBOS & PRUITT (1977) sugeriram $a = 1,0$ e $b = 0,84$ para velocidade do vento em m/s medida a 2 metros de altura e Δe em mmHg. Esses valores requerem que a tensão atual de vapor seja calculada com base na temperatura média diária e tendo a grama como cultura de referência. A cultura de referência foi definida por DOORENBOS & PRUITT (1977) como uma extensa superfície coberta com grama de tamanho uniforme entre 8 e 15 cm de altura em franco crescimento, cobrindo totalmente o solo e sem deficiência de água. Nenhuma indicação foi

feita para o tipo específico de grama, se é grama para estação fria ou quente como discutido por HARGREAVES (1983).

Na tentativa de encontrar valores dos coeficientes a e b que variassem com a época do ano e auxiliassem a explicação dos efeitos das estações do ano sobre o termo aerodinâmico WRIGHT (1982) apresentou equações para estimativa desses parâmetros, num clima temperado semi-árido à 42° de latitude norte para evapotranspiração de alfafa como cultura de referência em cobertura.

A função velocidade do vento foi determinada por DOORENBOS & PRUITT (1977) também para o período noturno e não diferiu da relação determinada para o período diurno. STEINER et alii (1991) relata que formas do modelo de Penman com funções de vento ajustadas empiricamente superestimam a evapotranspiração potencial em 20 - 40% e tentativas para ajustar uma função linear do vento para os dados locais por regressão de $f(u)$ contra velocidade do vento foram mal sucedidas.

A equação (2) da velocidade do vento representa um coeficiente de transporte global do vapor d'água na atmosfera. Desta forma, um coeficiente global dificilmente se aplica com igual eficiência em todas as condições. Para eliminar essa deficiência é preciso que

$f(u)$ inclua nuances aerodinâmicas da superfície. Assim sendo, van BAVEL (1966) utilizando observações micrometeorológicas e lisimétricas na escala horária propôs a equação

$$f(u) = 0,102 u / \{ \ln [(Z - d)] / Z_0 \}^2 \quad (3)$$

onde u é a velocidade do vento em milhas/dia, d é o deslocamento do plano zero e Z_0 é o parâmetro de rugosidade da superfície (ambos em centímetros); ou seja, d e Z_0 caracterizam aerodinamicamente a superfície evaporante.

Tomando como base a equação proposta por PENMAN (1948) para o termo aerodinâmico da equação de evaporação, THOM & OLIVER (1977) propuseram a equação

$$f(u) = 13,8 (1 + 0,01 u) / [\ln (Z/Z_0)]^2, \quad (4)$$

onde u é a velocidade do vento em milhas/dia e Δe em mb, enquanto STIGTER (1980) sugere a equação

$$f(u) = 8 (1 + 0,01 u) / [\ln (Z/Z_0)]^2 \quad (5)$$

como a mais adequada e como uma adaptação da equação de função do vento proposta por DOORENBOS & PRUITT (1975).

Analisando dados de evaporação obtidos em

locais com climas bem distintos, PRUITT & DOORENBOS (1977) concluíram que $f(u)$, na forma proposta por Penman, depende fundamentalmente da maneira que se determina o déficit de saturação médio diário Δe ; e sugerem tres maneiras de calculo de Δe , baseadas em dados de temperaturas máximas e mínimas e umidades relativas máximas e mínimas do ar. STEINER et alii (1991) ressalta que cálculos do déficit de pressão de vapor baseados em $(T_{max} + T_{min})/2$ como descrito por DOORENBOS & PRUITT (1977) resultaram num déficit de pressão de vapor 3% mais alto quando comparado ao cálculo baseado em temperatura média de 24 horas. STIGTER (1978), JENSEN (1983) e SADLER & EVANS (1989) sugerem que a função do vento deve ser compatível com o método usado para calcular o termo do déficit de pressão de vapor utilizado para derivar a função vento.

O déficit de pressão de vapor proposto por BURMAN et alii (1983) e SMITH (1991) é calculado utilizando-se a diferença entre o valor médio das pressões de saturação de vapor para as temperaturas máximas e mínimas diárias do ar e a pressão de vapor para temperatura de ponto de orvalho média diária (todas em milibares). Os mesmos autores destacam que a temperatura de ponto de orvalho varia durante o período diurno, mas estudos não publicados indicam que a determinação do ponto de orvalho às 8 horas tende a representar a média diária.

Os métodos utilizados para estimar o déficit de pressão de vapor podem ser divididos basicamente em métodos baseados em temperatura média e métodos baseados em pressão média de vapor. No primeiro, a pressão de saturação de vapor, atual e pressão de vapor para o ponto de orvalho são computados com base na temperatura média. No método de pressão de vapor médio calcula-se o déficit de saturação várias vezes durante o dia e a média desses valores é usada. CUENCA & NICHOLSON (1982) descreveram seis métodos para estimativa de Δe , sendo tres baseados em temperatura média e tres em pressão média de vapor. Esses pesquisadores chamaram a atenção para o problema de que a pressão de vapor não varia linearmente com a temperatura e para um mesmo dado o déficit computado usando as médias das temperaturas máximas e mínimas é menor que o déficit computado usando a média das pressões de saturação de vapor para as temperaturas máximas e mínimas, exceto quando a umidade relativa é 100%.

A pressão de saturação de vapor de acordo com SMITH (1991) deve ser determinada através da equação de Tetens . A pressão atual de vapor definida como a pressão de saturação de vapor à temperatura de ponto de orvalho pode, ser determinada utilizando-se medidas de umidade relativa obtida através de psicrômetro utilizando-se termômetros seco e úmido e, na ausência de dados de umidade

assume-se a temperatura mínima como igual à temperatura de ponto de orvalho e, através da equação de Tetens estima-se a pressão atual de vapor.

A ausência de dados de umidade do ar é frequentemente citada como razão para não se usar equações combinadas para cálculo de evapotranspiração em projetos de irrigação. Existem alternativas para a estimativa da temperatura média de ponto de orvalho diária, e POCHOP (1973) apresentou uma relação empírica entre a temperatura média de ponto de orvalho e a temperatura mínima diária.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. LOCAL

Os dados utilizados neste trabalho foram obtidos no Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal de São Carlos em Araras - SP, cujas coordenadas geográficas são : latitude $22^{\circ} 18'S$, longitude $47^{\circ} 23'W$ e altitude média de 617 metros. O clima, pela classificação de Koppen, é do tipo C_{Wa}, mesotérmico com verões quentes e úmidos e invernos secos.

3.2. EVAPOTRANSPIRAÇÃO DO GRAMADO (LE)

A evapotranspiração do gramado foi determinada utilizando-se de um lisímetro de nível freático constante, com 4,5 m de largura, 6,7 m de comprimento e 1,5 m de profundidade, plantado com grama batatais (BARBIÉRI, 1981). A altura do nível de água para a cultura de grama foi mantida a 30 cm abaixo da superfície.

O abastecimento de água deu-se através de um

depósito externo, interligado ao lisímetro através de tubos e um sistema de bóias, no qual estava acoplado um sistema de registro, acionado por uma bóia, e uma escala graduada em função do volume de água requerida pela superfície gramada. O diagrama para registro tinha capacidade máxima de 9 mm acumulados de evapotranspiração, sendo suficiente para qualquer época nas condições de Araras - SP .

Para evitar a entrada de água, que não a do depósito, havia uma cobertura móvel sobre trilhos, que cobria todo o sistema em caso de chuva.

3.3. RADIAÇÃO LÍQUIDA (R_n)

A radiação líquida (R_n) foi estimada pelas equações desenvolvidas por OMETTO (1968) para duas épocas do ano, isto é,

primavera - verão

$$R_n = 198 \, n/N + 164 \quad (6)$$

outono - inverno

$$R_n = 131 \, n/N + 66 \quad (7)$$

onde: n - número de horas de insolação medida em heliógrafos; N - número possível de horas de insolação (fotoperíodo), obtido em tabelas astronômicas em função da época do ano e da latitude (SMITHSONIAN METEOROLOGICAL TABLES, 1951). O quociente n/N representa a insolação relativa (razão de insolação), isto é, uma função da duração do brilho solar num dado dia ou período.

Os valores de radiação líquida (R_n) resultantes das equações (6) e (7) são expressos em $\text{cal}/\text{cm}^2\text{dia}$ e foram convertidos em milímetros equivalentes de evaporação (mm), para padronização de unidades com a evapotranspiração de grama. Os valores de R_n foram divididos por 59, pois, em condições normais de temperatura e pressão, são necessárias $59 \text{ cal} / \text{cm}^2$ para evaporar 1 mm de água (calor latente de evaporação).

Seguindo a metodologia de PENMAN (1948) o fluxo de calor no solo (G) foi desprezado.

3.4. FUNÇÃO DA VELOCIDADE DO VENTO ($f(u)$)

A função velocidade do vento ($f(u)$) da equação de Penman foi determinada através da equação (1) isolando-se o termo $f(u)$, obtendo-se desta forma

$$f(u) = \frac{s/\gamma (LE - R_n) + LE}{\Delta e}, \quad (8)$$

sendo, no presente texto expressa em mm/mmHg. O termo s/γ foi calculado através da equação

$$s/\gamma = \frac{37576,4 \times 10^{\left[\frac{7,5 \times T}{237,5 + T} \right]}}{(237,5 + T)^2} \quad (9)$$

derivada a partir da equação de Tetens, sendo $\gamma = 0,5 \text{ mmHg}/^\circ\text{C}$.

Na estimativa da função da velocidade do vento utilizou-se dados meteorológicos coletados às 9, 15 e 21 horas, pois são estes horários recomendados pela Organização Meteorológica Mundial para observações meteorológicas no Estado de São Paulo, e poucos são os locais com registros contínuos de temperatura, umidade relativa e velocidade do vento.

3.5. MÉDIA DIÁRIA DO DÉFICIT DE PRESSÃO DE VAPOR

A pressão de saturação de vapor (mmHg) foi sempre calculada através da equação de Tetens, isto é,

$$e_s = 4,58 \times 10^3 \left[\frac{7,5 \times T}{237,5 + T} \right] \quad (10)$$

Para a comparação dos métodos de estimativa do déficit de pressão de vapor com o método padrão, utilizou-se de valores de temperatura e umidade relativa do ar das 9, 15 e 21 horas e das 9 e 15 horas.

Seguindo as indicações de DOORENBOS & PRUITT (1975), PRUITT & DOORENBOS (1977) e CUENCA & NICHOLSON (1982) seis métodos foram testados para a estimativa do déficit de pressão de vapor médio diário.

3.5.1. MÉTODO PADRÃO

O déficit de pressão de vapor médio diário utilizado como padrão ou referência (Δe_p) para fins de comparação foi calculado usando-se a média dos déficits de pressão de saturação de vapor horários no período compreendido entre 7 e 18 horas, a partir de dados de temperatura e umidade relativa obtidos de equipamentos tipo termohigrógrafo marca FUESS, modelo 195 R, de rotação semanal,

$$\Delta e_p = \frac{\Delta e_{(7h)} + \Delta e_{(8h)} + \dots + \Delta e_{(18h)}}{12} \quad (11)$$

O período compreendido entre as 7 e 18 horas é aquele representativo das horas de brilho solar, quando a energia solar está prontamente disponível para ser utilizada no processo evaporativo.

O déficit de pressão de saturação de vapor horário foi determinado através da diferença entre a pressão de saturação de vapor à temperatura do ar e a pressão atual de vapor para o horário sendo esta estimada pelo produto da pressão de saturação de vapor e a umidade relativa para o horário.

3.5.2. MÉTODO 1

Diferença entre as médias das pressões de saturação e atual no horário padrão de observação meteorológica, isto é, as 9, 15 e 21 horas e 9 e 15 horas. A pressão atual de vapor (e_a) é o produto de e_s pela umidade relativa no horário;

$$\Delta e_1 = \bar{e}_s - \bar{e}_a \quad (12)$$

onde:

$$\bar{e}_s = \frac{e_{s_{9h}} + e_{s_{15h}} + e_{s_{21h}}}{3} \quad \text{ou} \quad \bar{e}_s = \frac{e_{s_{9h}} + e_{s_{15h}}}{2} ;$$

$$\bar{e}_a = \frac{e_{a_{9h}} + e_{a_{15h}} + e_{a_{21h}}}{3} \quad \text{ou} \quad \bar{e}_a = \frac{e_{a_{9h}} + e_{a_{15h}}}{2} ;$$

3.5.3. MÉTODO 2

Diferença entre a pressão de saturação de vapor à temperatura média do ar ($\bar{T}$) e a pressão de vapor à temperatura mínima de ponto de orvalho (T_{0min}), calculada através da equação de Tetens com valores de temperatura do ar às 15 horas;

$$\Delta e_2 = e_{s(\bar{T})} - e_{(T_{0min})} \quad (13)$$

3.5.4. MÉTODO 3

Diferença entre a pressão de saturação de vapor à temperatura média ($\bar{T}$) e a pressão de vapor à temperatura média de ponto de orvalho ($\bar{T}_0$);

$$\Delta e_3 = e_{s(\bar{T})} - e_{(\bar{T}_0)} \quad (14)$$

3.5.5. MÉTODO 4

Diferença entre a pressão de saturação de vapor à temperatura média ($\bar{T}$) e o produto da umidade relativa média ($\overline{UR}$) pela pressão de saturação de vapor à temperatura média.

$$\Delta e_4 = e_{s(\bar{T})} - (\overline{UR} \times e_{s(\bar{T})}) = e_{s(\bar{T})} (1 - \overline{UR}) \quad (15)$$

onde: $\overline{UR} \times e_{s(\bar{T})} = e_{a(\bar{T})}$, que é a pressão atual de vapor à temperatura média do ar.

3.5.6. MÉTODO 5

Diferença entre a média das pressões de saturação de vapor às temperaturas máxima (T_{max}) e mínima (T_{min}) do ar e a pressão de vapor à temperatura média de ponto de orvalho ($\overline{T_0}$),

$$\Delta e_5 = \frac{e_{s(T_{max})} + e_{s(T_{min})}}{2} - e_{(\overline{T_0})} \quad (16)$$

3.5.7. MÉTODO 6

Média do déficit de saturação de vapor

computado às temperaturas máximas e mínimas do ar,

$$\Delta e_o = \frac{(e_{s(Tmax)} - e_{a(Tmax)}) + (e_{s(Tmin)} - e_{a(Tmin)})}{2} \quad (17)$$

A pressão atual de vapor para temperaturas máximas e mínimas do ar é o produto das respectivas pressões de saturação de vapor pelas umidades relativas correspondentes do ar.

3.5.8. TEMPERATURA DE PONTO DE ORVALHO

A pressão atual de vapor (e_a) é definida, como a pressão saturada de vapor à temperatura de ponto de orvalho. Pela definição de umidade relativa pode-se calcular a temperatura do ponto de orvalho (T_0) a qualquer instante, ou seja, $UR = e_a / e_s$. Tomando-se $e_a = e_s(T_0)$ resulta em :

$$e_a = 4,58 \times 10^{\left(\frac{a \times T_0}{b + T_0}\right)} \quad (18)$$

$$e_s = 4,58 \times 10^{\left(\frac{a \times T}{b + T}\right)} \quad (19)$$

Dividindo-se a equação 18 pela equação 19 tem-se:

$$UR = \frac{10^{\left(\frac{a \times TO}{b + TO}\right)}}{10^{\left(\frac{a \times T}{b + T}\right)}} \quad (20)$$

aplicando logarítmo decimal aos dois membros da equação (20) tem-se:

$$\log \left[UR \times 10^{\left(\frac{a \times T}{b + T}\right)} \right] = \frac{a}{\frac{b}{TO} + 1}$$

$$\frac{b}{TO} = \frac{a}{\log \left[UR \times 10^{\left(\frac{a \times T}{b + T}\right)} \right]} - 1$$

$$\frac{b}{TO} = \frac{a - \log \left[UR \times 10^{\left(\frac{a \times T}{b + T}\right)} \right]}{\log \left[UR \times 10^{\left(\frac{a \times T}{b + T}\right)} \right]}$$

$$TO = b \times \frac{\log \left[UR \times 10^{\left(\frac{a \times T}{b + T}\right)} \right]}{a - \log \left[UR \times 10^{\left(\frac{a \times T}{b + T}\right)} \right]} \quad (21)$$

onde $b = 237,5$ e $a = 7,5$; valores sobre a água. Dessa forma a equação usada para o cálculo da temperatura de ponto de orvalho é:

$$T_0 = 237,5 \times \frac{\log \left[UR \times 10^{\left(\frac{7,5 \times T}{237,5 + T} \right)} \right]}{7,5 - \log \left[UR \times 10^{\left(\frac{7,5 \times T}{237,5 + T} \right)} \right]} \quad (22)$$

onde UR = umidade relativa média do ar, em décimos, e T = temperatura média do ar, em °C.

3.6. MEDIDAS E OBSERVAÇÕES METEOROLÓGICAS

As observações meteorológicas utilizadas neste trabalho foram realizadas de setembro de 1985 a junho de 1986.

3.6.1. Velocidade do Vento

A velocidade do vento foi medida com anemômetro totalizador, de fabricação FUESS, modelo 91 G, instalado a uma altura de 2,0 metros da superfície do solo. As medidas foram efetuadas às 9, 15 e 21 horas e trabalhou-se com a média desses períodos.

3.6.2 Insolação

A insolação foi registrada através de um heliógrafo , marca FUESS , tipo Campbell - Stokes , modelo 95 C.

3.6.3. Temperatura e Umidade Relativa do Ar

A temperatura do ar foi medida em conjunto psicrométrico composto de dois termômetros de mercúrio em vidro, marca FUESS, sendo um deles coberto por uma musseline permanentemente embebida em água (bulbo úmido).

A umidade relativa do ar foi calculada a partir das temperaturas de bulbo úmido e bulbo seco. Usou-se também valores de umidade relativa registrada em termohigrógrafos, da marca FUESS, modelo 195 R, de rotação semanal.

3.7. ANÁLISES ESTATÍSTICAS

O presente trabalho foi desenvolvido em duas etapas: A primeira consistiu da comparação de seis métodos de estimativa do déficit de pressão de vapor com a metodologia assumida como padrão ou referência, com a finalidade de estabelecer qual das metodologias apresentava

a melhor aproximação com o padrão. Esta comparação foi feita através de regressão linear simples.

A segunda etapa do trabalho teve por finalidade estabelecer uma função da velocidade do vento da equação de Penman para obtenção dos coeficientes m , a e b para cada método de estimativa do déficit de pressão de vapor médio diário.

Para se estabelecer o nível de significância entre os métodos de estimativa do déficit de pressão de vapor e o método assumido como padrão ou referência, e também a relação entre a função da velocidade do vento da equação de Penman e a velocidade do vento utilizou-se do teste F para regressão linear.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. TESTE DAS ESTIMATIVAS DO DÉFICIT MÉDIO DIÁRIO DE PRESSÃO DE VAPOR

Os métodos utilizados requerem dados observados em pelo menos dois horários e serão analisados em duas situações. Uma, utilizando as observações feitas nos horários convencionais, isto é, 9h, 15h e 21h recomendados pelo Instituto Nacional de Meteorologia. Outra, utilizando apenas os dados observados às 9h e 15h, representativos dos extremos diários.

Analisando-se os resultados obtidos com três observações diárias observa-se, pela Tabela 1 e figuras 1 a 3, que a diferença entre os déficits estimados pelos seis métodos e o padrão foram pequenas para déficits baixos, mas as diferenças aumentaram para déficits maiores. Nota-se que todos os métodos testados subestimaram o valor padrão.

Utilizando-se os dados obtidos somente as 9h e 15h, os resultados mostrados na Tabela 2 e figuras 4 a 6 não indicam alterações expressivas quando comparados com as

estimativas obtidas com três observações diárias. O método 1 inclusive melhorou a estimativa em relação ao padrão. Todos os métodos continuaram subestimando o padrão.

Para testar a comparação dos métodos propostos com o método referência utilizou-se de uma Análise de Regressão Linear Simples que indicou resultados significativos ao nível de 1% de probabilidade, mostrando que cada um dos métodos propostos relaciona-se significativamente com o método referência (Tabelas 3 e 4).

Os métodos analisados requerem pelo menos duas leituras diárias de temperatura e umidade relativa do ar para se estabelecer os valores a serem usados nas equações de estimativas dos déficits de pressão de vapor; o método 1 (MET 1) necessita das médias das pressões de saturação e atual de vapor; o método 2 (MET 2) além da pressão de saturação de vapor à temperatura média do ar, utiliza a pressão de vapor à temperatura mínima de ponto de orvalho, que ocorre nas horas mais quentes do dia; o método 3 (MET 3) usa a pressão de saturação de vapor à temperatura média do ar e a pressão de vapor à temperatura média de ponto de orvalho; o método 4 (MET 4) usa a temperatura e a umidade relativa média do ar; o método 5 (MET 5) precisa das pressões de saturação de vapor obtidas a partir das temperaturas máximas e mínimas do ar, além da temperatura média de ponto de orvalho; no método 6 (MET 6) o uso das

pressões de saturação e atual de vapor com base nas temperaturas máximas e mínimas do ar também exigem mais de um horário de observação.

Como todos os métodos apresentaram boa correlação com o padrão, é melhor utilizar o mais simples, ou seja, o método 1 (MET 1) com duas observações diárias, 9h e 15h.

Tabela 1 - Valores de déficit de pressão de vapor médio (mmHg) estimado por diferentes métodos, usando dados de temperatura do ar coletados às 9h, 15h e 21h.

DIAS	MET 1	MET 2	MET 3	MET 4	MET 5	MET 6	PADRÃO
13/10/83	2,0132	2,3040	2,0197	1,9427	1,8721	1,7063	2,9485
26/06/82	3,3851	3,4792	3,1467	3,1376	3,2810	3,2223	3,6858
13/05/82	7,3049	6,8375	7,5458	6,0662	8,1308	8,0043	7,3615
03/09/87	8,2298	10,1389	8,2096	8,2014	7,9917	8,5764	9,9877
13/07/83	6,7609	6,5360	6,2217	5,8687	9,1924	7,2716	10,6774
15/07/83	7,8788	7,8029	7,1705	6,4884	9,7366	9,6043	13,7613
13/08/83	8,8601	8,7499	7,9839	7,2347	11,1698	11,8569	14,4061
17/08/83	8,8543	8,7236	8,0728	7,3883	9,9250	10,5552	17,4162
16/10/83	10,8588	11,2192	10,4301	10,0051	12,0592	11,6521	19,9551
11/10/84	14,2648	15,2067	13,9129	15,2067	16,3960	15,5556	20,1852
06/11/83	10,8340	12,3108	10,6178	10,2381	11,5625	12,5423	21,3625
18/01/84	13,4676	13,5780	12,7792	12,2373	14,6949	14,4620	22,4849
21/11/84	17,2006	17,9872	16,7653	16,2290	18,7443	19,1267	26,9533
30/10/84	20,9376	25,8386	24,0446	22,1358	18,7443	21,6591	29,9370

Tabela 2 - Valores de déficit de pressão de vapor médio (mmHg) estimado por diferentes métodos, usando dados de temperatura do ar coletados às 9h e 15h.

DIAS	MET 1	MET 2	MET 3	MET 4	MET 5	MET 6	PADRÃO
13/10/83	1,7062	2,0920	1,6155	1,6131	1,6799	1,7063	2,9485
26/06/82	4,2216	3,7842	4,1281	4,1775	4,1635	3,2223	3,6858
13/05/82	10,2546	10,0361	9,8180	9,5734	10,2535	8,0043	7,3615
03/09/87	8,4917	8,8461	8,4783	8,4671	8,4863	8,5764	9,9877
13/07/83	9,3825	9,4476	9,1333	8,9985	9,3814	7,2716	10,6774
15/07/83	10,6860	10,1651	9,8881	9,3443	10,6498	9,6043	13,7613
13/08/83	11,8568	10,8420	10,7802	10,1224	11,8740	11,8569	14,4061
17/08/83	11,8511	12,3059	11,3549	10,7067	11,9012	10,5552	17,4162
16/10/83	11,6521	12,0855	11,0125	10,3764	11,6034	11,6521	19,9551
11/10/84	15,5556	16,5672	15,0028	14,2217	15,6164	15,5556	20,1852
06/11/83	12,6239	14,4347	12,5837	12,0645	11,7675	12,5423	21,3625
18/01/84	17,4217	17,1311	16,6346	16,6717	17,8060	14,4620	22,4849
21/11/84	19,1267	19,1899	18,3619	17,7484	19,1382	19,1267	26,9533
30/10/84	25,4759	26,2290	25,2142	24,9144	25,5167	21,6591	29,9370

Tabela 3 - Valores da análise de regressão linear simples, comparando os seis métodos propostos com o método referência, para leituras das 9h , 15h e 21 h.

	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆
F	113,24**	56,61**	36,19**	64,04**	48,64**	98,18**
a	0,7876	0,4842	0,7238	1,0362	1,4328	2,0430
b	0,5871	0,5013	0,4436	0,4615	0,5010	0,5743
r	0,9509	0,9084	0,8666	0,9177	0,8956	0,9440

** = significativo ao nível de 1% de probabilidade

Tabela 4 - Valores da análise de regressão linear simples, comparando os seis métodos propostos com o método referência, para leituras das 9h e 15h.

	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆
F	84,88**	56,67**	48,34**	72,65**	60,87**	98,18**
a	1,4680	0,4605	0,3190	1,6344	1,0285	2,0430
b	0,6772	0,5024	0,4679	0,4868	0,5253	0,5743
r	0,9360	0,9084	0,8950	0,9264	0,9139	0,9440

** = significativo ao nível de 1% de probabilidade

Figura 1. Regressão linear simples entre os métodos 1 e 2 e o método padrão de estimativa do déficit de pressão de vapor, para observações meteorológicas das 9h, 15h e 21h.

Figura 2. Regressão linear simples entre os métodos 3 e 4 e o método padrão de estimativa do déficit de pressão de vapor, para observações meteorológicas das 9h, 15h e 21h.

Figura 3. Regressão linear simples entre os métodos 5 e 6 e o método padrão de estimativa do déficit de pressão de vapor, para observações meteorológicas das 9h, 15h e 21h.

Figura 4. Regressão linear simples entre os métodos 1 e 2 e o método padrão de estimativa do déficit de pressão de vapor, para observações meteorológicas das 9h, 15h.

Figura 5. Regressão linear simples entre os métodos 3 e 4 e o método padrão de estimativa do déficit de pressão de vapor, para observações meteorológicas das 9h, 15h.

Figura 6. Regressão linear simples entre o métodos 5 e o método padrão de estimativa do déficit de pressão de vapor, para observações meteorológicas das 9h, 15h.

4.2. ESTIMATIVA DOS COEFICIENTES DA FUNÇÃO DO VENTO

Evidentemente como o valor do déficit de pressão de vapor médio diário (Δe) depende do método de estimativa (Tabelas 5 a 7), os parâmetros m , a e b da função do vento ($f(u)$) também dependem do método utilizado.

É interessante notar que os parâmetros obtidos variaram significativamente com a estação do ano revelando que uma única função não se aplica adequadamente em todas as épocas. Independentemente do método de estimativa de Δe , as funções obtidas para a primavera e o outono revelaram valores menores que aqueles resultantes da função original de Penman (figuras 7, 8, 9, 13, 14 e 15). Isso significa que a função original superestima a evapotranspiração nessas estações.

Para o verão as funções obtidas mostraram valores semelhantes aos da função original de Penman, independentemente do método de estimativa de Δe utilizado (figuras 10, 11 e 12).

A análise conjunta dos valores das Tabelas 5, 6 e 7 mostra que os déficits de pressão de vapor estimados para o verão e o outono, (Tabelas 6 e 7), apresentam uma menor variabilidade entre si do que os déficits de pressão de vapor estimados para a primavera (Tabela 5). Isto acontece porque durante o verão e o

outono ocorre maior precipitação, ficando o ar mais úmido do que na primavera, fazendo com que as oscilações dos déficits sejam menores nestas estações.

Nas figuras de 7 a 9 e na Tabela 8 vê-se que há correlação alta entre a função do vento e a velocidade do vento em m/s , na primavera. Os resultados foram significativos ao nível de 1% de probabilidade com os métodos 2 e 6 mostrando as melhores correlações.

Apesar dos resultados mostrarem-se significativos para a maioria dos métodos empregados na estação de verão, figuras 10 a 12 e Tabela 9 , o grau de ajuste proporcionado não foi dos melhores para os métodos 4 e 5. A dispersão dos pontos foi muito acentuada, como podemos ver nas figuras 11 e 12 respectivamente.

Os resultados obtidos para a estação do outono, figuras 13 a 15 e Tabela 10, apesar da significância a nível de 1% de probabilidade e da correlação positiva indicada pelos altos coeficientes de correlação; mostram que para todas as metodologias empregadas, nesta estação, o ponto de intersecção com o eixo das ordenadas foi negativo, contrariando os resultados obtidos para as estações da primavera e verão e os relatados na literatura.

Como os resultados apresentados estão em função da velocidade do vento em m/s, para efeito de

comparação com os valores dos coeficientes do termo aerodinâmico da equação de Penman citados na literatura, as Tabelas 11, 12 e 13 mostram os valores dos coeficientes m , a e b obtidos para Araras - SP em função da velocidade do vento em km/dia.

Para a primavera os valores obtidos para o coeficiente m são muito diferentes e bem menores do que os valores citados na literatura, variando de 0,0066049 a 0,107405, conforme a Tabela 11; enquanto PENMAN (1948), PENMAN (1963) estabeleceu m igual a 0,26 e DOORENBOS & PRUITT (1975) recomendaram o valor de m igual a 0,27.

No caso do coeficiente a estabeleceu-se o seu valor igual a 1 para que se pudesse obter o valor do coeficiente m , desta forma este valor está de acordo com PENMAN (1948), PENMAN (1963), mas difere de PENMAN (1956) que utilizou o valor do coeficiente a igual a 0,5.

A Tabela 11 mostra os valores do coeficiente b para a primavera e estes valores são iguais ao estabelecido por DOORENBOS & PRUITT (1975) mas diferem totalmente do valor recomendado por PENMAN (1948), PENMAN (1956), PENMAN (1963) que é de 0,00625.

Para o verão os valores dos coeficientes m , a e b do termo aerodinâmico são mostrados na Tabela 12. O coeficiente m obtido utilizando-se o método 2 de estimativa do déficit de pressão de vapor é praticamente igual ao

estabelecido por PENMAN (1948) e DOORENBOS & PRUITT (1975). Os métodos 1, 3 e 6 de estimativa do déficit de pressão de vapor proporcionaram valores do coeficiente m da ordem de 0,205185, 0,341198 e 0,191163 respectivamente, sendo que o valor de 0,341198 é semelhante ao usado por OMETTO (1981). Os demais valores de m são bem menores em relação aos estabelecidos na literatura.

Os valores dos coeficientes b da Tabela 12 para o verão indicam que os métodos 2 e 3 proporcionaram valores semelhantes aos de PENMAN (1948) enquanto para os métodos 1, 5 e 6 os valores de b são praticamente iguais ao estabelecido por DOORENBOS & PRUITT (1975). Deve-se salientar que os coeficientes obtidos para o verão foram os que mais se aproximaram dos estabelecidos por PENMAN (1948).

A Tabela 13 mostra os valores dos coeficientes do termo aerodinâmico para a estação do outono. Neste caso ocorreu uma situação diferente das outras estações, primavera e verão, o coeficiente m assumiu valores negativos em função da interceptação do eixo das ordenadas ter apresentado valores negativos. Para a obtenção de m o coeficiente b foi dividido pelo valor de a (interceptação do eixo das ordenadas), em consequência disto este coeficiente também assumiu valores negativos, mas isto não implica que a inclinação da reta seja

negativa.

A ocorrência de valores baixos dos coeficientes m e b na primavera e negativos no outono, não é registrada na literatura, pois, a maioria dos trabalhos foi desenvolvida em condições climáticas diferentes das condições de Araras - SP. Nos locais onde Penman e outros pesquisadores desenvolveram seus trabalhos, na primavera e no outono, praticamente há ocorrência de neve, impossibilitando a obtenção de dados nestas estações, assim sendo, dados de evapotranspiração de alfafa ou grama somente foram obtidos no verão.

A ocorrência de valores negativos para os coeficientes das funções obtidas devem-se ao fato de que no outono principalmente a partir de meados de maio, apesar de não faltar água para a grama no lisímetro, ocorre baixa evapotranspiração em função do fotoperíodo e do gramado estar entrando em repouso, fazendo com que se tenha uma função fisicamente inconsistente em função da equação proposta por Penman.

Durante a estação de verão como a demanda de água é alta os valores dos coeficientes do termo aerodinâmico obtidos em Araras - SP assemelham-se bastante aos obtidos por outros pesquisadores, pois as condições climáticas são bem semelhantes às dos locais estudados.

O valor de $f(u)$ é muito sensível ao método

usado na determinação do déficit de pressão de saturação de vapor do ar (Δe). Uma das razões para estas diferenças no valor da função da velocidade do vento é devido ao uso de diferentes aproximações quando da obtenção de Δe , Tabelas 5, 6 e 7.

Analisando as figuras de 7 a 15 notamos que a relação entre a função velocidade do vento e a velocidade do vento pode ser descrita por uma relação linear, estando de acordo com PRUITT & DOORENBOS (1977), embora estes autores citem que Rijtema 1965 obteve uma relação não linear entre a função velocidade do vento e a velocidade do vento.

Ao analisar as figuras de 7 a 15 pode-se salientar que para as estações da primavera e outono, a função original de Penman superestima os valores de evapotranspiração, enquanto para o verão a diferença entre as duas funções é pequena, ora subestimando ora superestimando os valores de evapotranspiração.

Assim, para as condições de Araras, a função original de Penman pode ser aplicada durante o verão sem qualquer problema, ao passo que para as estações da primavera e outono, esta função superestima os valores de evapotranspiração.

Tabela 5 - Valores da velocidade média do vento e do déficit de pressão vapor médio (mmHg) estimados pelos seis métodos testados para a estação da primavera de 1985.

DIAS	MET 1	MET 2	MET 3	MET 4	MET 5	MET 6	vento m/s
25/09/85	11,9776	13,2997	11,3603	10,0993	11,9207	12,7581	1,08
26/09/85	12,5821	14,3789	11,9110	10,9181	11,5223	14,5950	2,31
27/09/85	11,9822	15,5262	11,8696	10,8805	8,9365	13,0510	2,69
01/10/85	9,3850	10,8279	8,8538	8,1513	8,2986	10,2697	1,91
02/10/85	12,0556	13,8067	11,3986	10,4567	11,7990	13,9541	2,69
03/10/85	11,6050	13,9623	11,1986	10,1606	12,0101	14,3981	3,09
04/10/85	12,2688	14,0664	11,6551	10,6606	11,7896	14,6603	3,12
07/10/85	8,4372	8,3253	8,2381	8,1205	8,8920	9,9327	2,34
11/10/85	12,2805	12,0506	11,8061	11,5538	11,1317	12,7582	2,23
15/10/85	22,8628	26,8091	22,9597	21,1157	21,3574	23,7579	3,18
16/10/85	25,0914	27,5103	24,8069	23,8258	22,2610	25,1119	3,66
17/10/85	22,3129	24,1500	22,0166	21,6697	18,0061	20,7520	2,86
18/10/85	13,7259	15,0375	12,9496	11,8068	13,6136	17,3213	3,26
22/10/85	13,4401	13,9386	12,8620	12,4273	12,2019	14,5669	2,94
23/10/85	19,2615	20,7500	18,8251	18,1339	16,7153	19,5922	3,26
25/10/85	13,5065	14,8106	13,1866	12,7361	11,2847	13,4687	2,23
29/10/85	7,8223	9,8843	7,7577	7,5405	9,2650	9,8322	2,66
30/10/85	13,2909	14,8705	13,0235	12,2374	11,0396	14,8079	1,66
07/11/85	11,9263	12,0711	11,6182	11,2517	10,3005	12,1816	2,97
08/11/85	18,4041	15,9137	14,3247	13,8352	12,7278	14,0503	3,28
10/11/85	15,1689	16,5750	14,5857	13,6768	14,3953	17,0877	2,26
12/11/85	18,4406	18,7142	17,9970	17,5862	16,7555	18,6645	3,15
14/11/85	20,3024	20,3962	19,4414	19,0710	18,8382	20,2211	3,50
20/11/85	11,1130	11,2795	10,3953	9,7183	11,8233	14,0709	2,38
29/11/85	5,1700	5,6640	5,0604	5,0349	5,0000	5,8027	2,25
02/12/85	10,6688	12,6528	10,1085	9,7867	10,3214	11,8967	2,23
06/12/85	9,2121	9,2372	8,9828	8,7150	7,9311	9,1131	3,38
09/12/85	15,6072	19,7639	16,9890	14,9977	15,9334	16,9483	3,40
11/12/85	11,1299	11,5152	10,8894	10,6305	9,6614	12,4449	1,50
16/12/85	5,6599	7,2314	5,2641	5,1956	7,1717	6,9779	2,02
17/12/85	7,4911	7,9585	7,2143	6,9240	7,1268	8,9155	1,39
19/12/85	18,2080	21,0728	18,1930	17,5524	15,9501	16,3419	3,60

Tabela 6 - Valores da velocidade média do vento e do déficit de pressão de vapor médio (mmHg) estimados pelos seis métodos testados para a estação do verão de 1986.

DIAS	MET 1	MET 2	MET 3	MET 4	MET 5	MET 6	vento m/s
30/12/85	5,3882	5,6640	5,3220	5,2234	9,4249	7,6115	1,44
03/01/86	11,3174	12,2761	10,6658	10,3118	10,4135	12,9225	1,86
06/01/86	8,3250	9,5697	7,9217	7,6647	9,0089	9,1607	2,48
07/01/86	7,9399	7,7572	7,5640	7,2990	6,6110	8,8963	2,22
08/01/86	8,1201	8,4474	7,7503	7,3698	9,3189	10,5979	1,72
10/01/86	4,9652	4,8877	4,5653	4,1289	6,4975	7,4139	2,42
13/01/86	5,7813	5,7875	5,4599	5,1963	5,9112	6,8117	1,38
16/01/86	7,9108	7,9940	7,6773	7,4842	6,6431	8,4725	2,09
17/01/86	10,2737	10,7290	9,8229	7,6518	9,8849	12,0378	2,00
22/01/86	8,9706	8,7807	7,6672	6,7691	8,8614	11,4542	2,13

Tabela 7 - Valores da velocidade média do vento e do déficit de pressão de vapor médio (mmHg) estimados pelos seis métodos testados para a estação do outono de 1986.

DIAS	MET 1	MET 2	MET 3	MET 4	MET 5	MET 6	vento m/s
02/04/86	13,6269	8,0371	7,2072	6,9720	5,8746	8,5111	0,79
04/04/86	8,6632	8,8686	8,1483	7,5069	7,2008	10,8498	1,03
07/04/86	7,0631	7,7242	6,7359	6,3308	6,3813	8,7974	1,38
08/04/86	6,9976	7,4001	6,5096	6,0055	6,2311	9,3022	1,17
09/04/86	7,0539	6,8838	6,3494	5,7273	7,3237	9,3389	0,93
10/04/86	7,6111	9,6671	7,3337	6,9176	6,7495	8,4284	1,28
11/04/86	8,5865	9,1347	8,1409	7,6172	6,3506	10,0965	2,02
15/04/86	3,5167	5,9076	3,2885	3,1692	4,7863	4,6024	2,15
17/04/86	7,2724	7,4972	6,6925	6,4004	7,1291	8,6728	1,30
18/04/86	6,2267	7,5515	6,1259	5,6381	4,9466	8,1564	1,25
23/04/86	8,0077	14,5294	13,6696	9,1756	6,4921	9,3249	1,65
25/04/86	8,2694	8,6008	8,0338	7,8527	6,9763	9,2975	1,35
29/04/86	7,1373	8,2340	6,8400	6,2208	6,7638	8,8114	1,41
30/04/86	6,9995	8,3940	6,7608	6,1283	5,2918	8,2342	0,93
05/05/86	11,2502	13,4252	11,1569	10,6249	7,7730	11,6630	1,03
06/05/86	10,7479	11,7386	10,1934	9,5443	8,4442	12,2689	1,62
16/05/86	5,1368	5,2008	4,7083	4,4836	4,8774	6,9238	0,82
17/05/86	7,0861	7,7203	6,5803	6,0022	5,8971	8,9134	1,51
23/05/86	5,1548	5,1763	4,7306	4,3069	4,7295	6,6274	0,94
27/05/86	11,5111	15,7516	11,5199	10,4108	9,8575	11,7393	1,22
28/05/86	7,4406	8,9193	7,0113	6,9827	6,9827	9,5213	1,30
29/05/86	8,7465	5,3700	4,9958	6,4497	8,0102	10,3770	1,29
30/05/86	8,5112	9,3146	8,1658	8,0113	7,2804	8,7317	1,71
02/06/86	5,9171	6,2721	5,5105	5,1374	5,5153	6,7104	0,90
03/06/86	5,5520	5,8354	5,2155	4,7341	4,5697	6,5627	1,16
09/06/86	7,2970	7,1550	6,6503	6,6522	6,7414	8,9504	0,98
10/06/86	6,7437	7,6132	6,2594	5,6733	6,2544	8,8397	1,06
11/06/86	9,0664	10,0253	8,5800	7,7354	8,2600	11,0635	0,85
17/06/86	7,8963	7,6485	7,3033	6,8218	6,9003	9,2705	1,11
18/06/86	9,8325	10,1960	9,4250	8,9970	8,4731	10,2620	1,14
19/06/86	8,0067	8,0250	7,3601	7,0928	6,9643	9,2868	0,64
20/06/86	7,6672	7,6536	7,1429	6,7919	6,7123	9,2569	0,72

Tabela 8 - Valores da análise de regressão linear simples, entre a função do vento estimada pelos seis métodos e a velocidade do vento em m/seg, utilizando-se dados climáticos coletados as 9h , 15h e 21 h para a estação da primavera de 1985.

	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆
F	167,58**	350,99**	255,50**	98,62**	110,44**	968,85**
a	0,0660	0,0964	0,1074	0,0972	0,0695	0,0648
b	0,1439	0,1551	0,1611	0,1633	0,1469	0,1607
r	0,9209	0,9598	0,9460	0,8756	0,8868	0,9849

** = significativo ao nível de 1% de probabilidade

Tabela 9 - Valores da análise de regressão linear simples, entre a função do vento estimada pelos seis métodos e a velocidade do vento em m/seg, utilizando-se dados climáticos coletados as 9h , 15h e 21 h para a estação do verão de 1986.

	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆
F	43,33**	66,14**	14,25**	4,95**	11,17**	144,18**
a	0,2052	0,2539	0,3412	0,0901	0,1088	0,1912
b	0,1969	0,1997	0,1795	0,2557	0,2020	0,2136
r	0,9188	0,9445	0,8003	0,6183	0,7633	0,9734

** = significativo ao nível de 1% de probabilidade

Tabela 10 - Valores da análise de regressão linear simples, entre a função do vento estimada pelos seis métodos e a velocidade do vento em m/seg, utilizando-se dados climáticos coletados as 9h, 15h e 21 h para a estação da outono de 1986.

	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆
F	103,88**	234,55**	353,40**	129,81**	270,01**	888,36**
a	-0,0031	-0,0721	-0,0816	-0,0610	-0,0573	-0,0941
b	0,1744	0,2626	0,2844	0,2703	0,2088	0,2678
r	0,8809	0,8866	0,9601	0,9013	0,9487	0,9835

** = significativo ao nível de 1% de probabilidade

Tabela 11 - Valores de m, a e b do termo aerodinâmico da equação de Penman com dados de Araras - SP para a estação da primavera com velocidade do vento em km/dia.

	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆
m	0,066605	0,096399	0,107405	0,097041	0,065953	0,064756
a	1	1	1	1	1	1
b	0,011576	0,011577	0,011572	0,011577	0,011574	0,011573

Tabela 12 - Valores de m, a e b do termo aerodinâmico da equação de Penman com dados de Araras - SP para a estação do verão com velocidade do vento em km/dia.

	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆
m	0,205185	0,253921	0,341198	0,090108	0,108787	0,191163
a	1	1	1	1	1	1
b	0,011107	0,009104	0,006087	0,032849	0,021492	0,012931

Tabela 13 - Valores de m , a e b do termo aerodinâmico da equação de Penman com dados de Araras - SP para a estação do outono com velocidade do vento em km/dia.

	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄	M ₅	M ₆
m	-0,003115	-0,072124	-0,081587	-0,061044	-0,057341	-0,094082
a	1	1	1	1	1	1
b	-0,647833	-0,042136	-0,040337	-0,051242	-0,042134	-0,032946

Figura 7. Equação original de Penman e regressão linear simples entre a função da velocidade do vento, calculada com base nos métodos 1 e 2 de estimativa do déficit de pressão de vapor, e a velocidade média diária do vento para a estação da primavera de 1985.

Figura 8. Equação original de Penman e regressão linear simples entre a função da velocidade do vento, calculada com base nos métodos 3 e 4 de estimativa do déficit de pressão de vapor, e a velocidade média diária do vento para a estação da primavera de 1985.

Figura 9. Equação original de Penman e regressão linear simples entre a função da velocidade do vento, calculada com base nos métodos 5 e 6 de estimativa do déficit de pressão de vapor, e a velocidade média diária do vento para a estação da primavera de 1985.

Figura 10. Equação original de Penman e regressão linear simples entre a função da velocidade do vento, calculada com base nos métodos 1 e 2 de estimativa do déficit de pressão de vapor, e a velocidade média diária do vento para a estação do verão de 1986.

Figura 11. Equação original de Penman e regressão linear simples entre a função da velocidade do vento, calculada com base nos métodos 3 e 4 de estimativa do déficit de pressão de vapor, e a velocidade média diária do vento para a estação do verão de 1986.

Figura 12. Equação original de Penman e regressão linear simples entre a função da velocidade do vento, calculada com base nos métodos 5 e 6 de estimativa do déficit de pressão de vapor, e a velocidade média diária do vento para a estação do verão de 1986.

Figura 13. Equação original de Penman e regressão linear simples entre a função da velocidade do vento, calculada com base nos métodos 1 e 2 de estimativa do déficit de pressão de vapor, e a velocidade média diária do vento para a estação do outono de 1986.

Figura 14. Equação original de Penman e regressão linear simples entre a função da velocidade do vento, calculada com base nos métodos 3 e 4 de estimativa do déficit de pressão de vapor, e a velocidade média diária do vento para a estação do outono de 1986.

Figura 15. Equação original de Penman e regressão linear simples entre a função da velocidade do vento, calculada com base nos métodos 5 e 6 de estimativa do déficit de pressão de vapor, e a velocidade média diária do vento para a estação do outono de 1986.

5. CONCLUSÕES

Os resultados mostrados neste trabalho permitem concluir que:

a) existe uma forte evidência de correlação positiva entre cada um dos métodos de estimativa do déficit de pressão de vapor estudados e o método padrão;

b) é indiferente para a estimativa do déficit de pressão de vapor, os valores médios de temperatura e umidade relativa do ar obtidos em observações meteorológicas das 9h, 15h e 21h ou 9h e 15h;

c) como todos métodos de estimativa de Δe apresentaram boa correlação com o padrão é melhor utilizar o mais simples, ou seja, o método 1 (MET 1) com duas observações diárias (9h e 15h);

d) os valores dos coeficientes m , a e b da equação de Penman para a região de Araras - SP, obtidos através dos diferentes métodos de estimativa do déficit de pressão de vapor são os mostrados nas Tabelas 11, 12 e 13;

e) para as condições de Araras, a função original de Penman pode ser aplicada durante o verão,

enquanto para as estações da primavera e outono esta função superestima os valores de evapotranspiração.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R. G. A Penman for all seasons. *J. Irrig. and Drain. Engrg.* ASCE, New York, 112(4): 348-68, 1986.
- BARBIERI, V. Medidas e estimativas de consumo hídrico em cana-de-açúcar (*Saccharum* spp). Piracicaba, 1981. 82p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP.
- BRUTSAERT, W. & YU, S. L. Mass transfer aspects of pan evaporation. *J. Appl. Meteorol.* , Boston, 7(4): 563-6, 1968.
- BURMAN, R. D.; CUENCA, R. H.; WEISS, A. Techniques for estimating irrigation water requirements. *Advances in Irrigation*, 3:335 - 93, 1983.
- CUENCA, R. H. & NICHOLSON, M. T. Application of Penman equation wind function. *J. Irrig. and Drain. Engrg.*, ASCE, New York, 108: 13 -23, 1982.
- DOORENBOS, J. & PRUITT, W. D. *Crop water requirements*. Roma, FAO, 1975. 170p. (Irrigation and Drainage Papers, 24).
- DOORENBOS, J. & PRUITT, W. O. *Crop water requirements*. Roma, FAO, 1977. 144p. (Irrigation and Drainage Papers, 24).

- GRINDLEY, J. Estimating and mapping of evaporation. In: IASH - UNESCO - WMO. **World water balance**. 1972. v.1, p.200-13.
- HARGREAVES, G. H. Discussion of "application of Penman wind function", by R. H. Cuenca and M. T. Nicholson. **J. Irrig. and Drain. Div. ASCE**, New York, 109(2): 277 - 8, 1983.
- JENSEN, M. E. Design and Operation of Farm Irrigation Systems. In: ASAE Monograph, NO 3, 829p. 1983.
- LIST, R. J. **Smithsonian meteorological tables**. 6th rev. ed. Washington, Smithsonian Institute, 1971.
- MCGUINNESS, J.L. & BORDNE, E. F. A comparison of lysimeter derived potential evapotranspiration with computed values. Washington, U:S Dep. Hydrol., Agric. Res. Sect., 1972. 71p. (Tech. Bull, 1452).
- OMETTO, J.C. Estudo das relações entre: radiação solar global, radiação líquida, insolação. Piracicaba, 1968. 64p. (Doutorado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"/USP).
- OMETTO, J. C. **Bioclimatologia Vegetal**. São Paulo, Ceres, 1981. 425p.
- PENMAN, H.L. Natural evaporation from open water, bare, soil and grass. **Proc. Roy. Soc. London, A**, 193: 120-46, 1948.
- PENMAN, H. L. Evaporation: an introductory survey. **Neth. J. Agric. Sci.**, Wageningen, 4: 9 - 29, 1956.
- PENMAN, H. L. **Vegetation and hydrology**. Harpenden, Comm. Bur. Sils, 1963. 124p. (Tech. Comm., 53).

- POCHOP, L. O. Psychrometric data patterns and prediction models, Univ. of Wyo:(Wyo. Water Res. Ser., 48).
- PRUITT, W. O. & DOORENBOS, J. Empirical calibration, a requisite for evapotranspiration formulae based on daily or longer mean climate data. International Round Table Conference on Evapotranspiration, Budapest, 1977. 20p.
- SADLER, E. J. & EVANS, D. E. Vapor pressure deficit calculations and their effect on the combination equation. *Agric. For. Meteorol.* Amsterdam, 49: 55 - 80, 1989.
- SMITH, M. Report on expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines for prediction of crop water requirements. Roma, FAO; 1991. 45p.
- STEINER, J.L.; HOWELL, T. A.; SCHNEIDER, A. D. Lysimetric evaluation of daily potential evapotranspiration models for grain sorghum. *Agron. J.*, Madison, 83: 240 - 7, 1991.
- STIGTER, C. J. On the pressure dependence of the wind function in Dalton's and Penman's evaporation equations. *Arch. Meteorol. Geophys. Bioklimatol.*, Ser. A, 27: 147 - 54, 1978.
- STIGTER, C. J. Assessment of the quality of generalized wind functions in Penman's equation. *J. of Hydrology*, Amsterdam, 45: 321 - 31, 1980.

- TANNER, C. B. & PELTON, W.L. Potential evapotranspiration estimates by the approximate energy balance method of Penman. *J. Geophys. Res.*, New York, 65: 3391 -413, 1960.
- THOM, A. S. & OLIVER, H. R. On Penman's equation for estimating regional evaporation. *Quart. J. R. Met. Soc.*, Bracknell, 103: 345 - 57, 1977.
- THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. *Geograph. Rev.*; Washington, 38 :55-94, 1948.
- van BAVEL, C. H. M. Potential evaporation: the combination concept and its experimental verification. *Water Resour. Res.*, Washington, 2: 455 - 67, 1966.
- VILLA NOVA, N. A. & REICHARDT, K. Evaporação e evapotranspiração de um sistema e suas relações com o meio ambiente. In: ABRH. *Engenharia hidrológica*. Rio de Janeiro, 1989. p.145 - 97. (Coleção ABRH, 2).
- WRIGHT, J. L. New evapotranspiration crop coefficients. *J. Irrig. Drain. Div. ASCE*, New York, 108(2): 57 - 74, 1982.
- WRIGHT, J. L. & JENSEN, M. E. Peak water requirements of crops in Southern Idaho. *J. Irrig. and Drain. Div. ASCE* New York ,96(IR1): 193 - 201, 1972.

A P Ê N D I C E

abela 14 - Valores de temperaturas máxima, mínima e média do ar em °C, umidade relativa média do ar em % e temperaturas dos termômetros de bulbo úmido (BU) e bulbo seco (BS), coletadas as 9h, 15h e 21h, para a estação da primavera de 1985.

DIAS	Tmax	Tmin	$\bar{T}$	$\overline{UR}$	9h		15h		21h	
					BU	BS	BU	BS	BU	BS
25/09/85	30,4	15,0	23,8	54,3	17,6	19,0	18,6	30,4	16,0	22,0
26/09/85	31,4	14,0	24,9	53,7	16,8	20,6	19,2	31,2	19,0	23,0
27/09/85	30,0	13,8	25,7	56,0	16,8	21,0	18,6	30,0	22,0	26,0
01/10/85	27,0	11,8	21,4	57,3	16,0	18,4	16,6	26,4	15,4	19,9
02/10/85	29,8	13,0	22,9	50,0	16,4	20,4	16,8	28,8	15,2	19,4
03/10/85	30,2	13,8	23,1	52,0	16,4	20,6	17,0	29,0	16,2	19,6
04/10/85	31,6	13,4	24,5	53,7	17,2	21,6	18,8	30,8	17,4	21,0
07/10/85	29,8	16,2	23,7	63,0	19,2	23,8	20,0	26,4	18,0	21,0
11/10/85	31,2	16,2	25,6	53,0	18,0	22,4	21,0	30,4	18,4	24,0
15/10/85	35,6	16,0	29,1	30,0	18,6	26,2	16,8	35,0	17,2	26,0
16/10/85	36,0	16,4	30,0	25,0	16,6	27,8	17,2	35,2	18,0	27,0
17/10/85	34,6	16,0	29,8	31,0	16,8	28,4	20,2	34,0	19,0	27,0
18/10/85	34,6	18,0	27,6	57,3	20,2	26,0	21,8	33,8	21,0	23,0
22/10/85	31,2	13,8	24,9	47,3	18,0	23,6	19,0	30,2	16,0	21,0
23/10/85	34,2	14,6	28,1	36,3	18,2	25,8	19,0	33,4	17,6	25,0
25/10/85	30,4	16,8	26,1	49,7	18,6	23,0	19,4	30,0	19,0	25,4
29/10/85	29,6	17,6	23,4	65,0	17,6	23,4	20,4	25,8	19,0	21,0
30/10/85	32,2	18,2	27,7	56,0	21,0	26,6	21,6	32,2	21,0	24,2
07/11/85	30,6	13,2	24,8	52,0	17,0	21,4	19,6	29,0	18,0	24,0
08/11/85	32,0	14,6	26,3	46,0	18,0	22,4	20,2	31,4	17,0	25,0
10/11/85	31,4	16,2	25,4	43,7	16,0	20,2	18,0	31,0	17,6	25,0
12/11/85	34,6	20,2	29,4	42,7	20,0	26,6	21,6	34,0	19,8	27,6
14/11/85	35,0	18,2	28,7	35,3	17,8	25,0	21,0	35,0	17,0	26,0
20/11/85	32,8	17,6	25,7	60,7	20,2	24,8	21,6	31,4	18,6	21,0
29/11/85	24,8	16,6	21,2	73,3	17,8	21,0	19,6	23,6	17,0	19,0
02/12/85	30,6	16,6	24,7	58,0	16,2	21,6	22,8	31,2	18,0	21,2
06/12/85	28,8	15,2	24,0	61,6	18,0	20,6	20,0	27,2	18,8	24,2
09/12/85	33,4	18,2	27,9	46,7	18,6	24,6	21,8	32,2	19,6	26,8
11/12/85	32,4	19,6	27,8	62,0	21,8	25,2	23,2	31,2	22,2	25,6
16/12/85	30,4	19,6	24,4	77,3	21,0	23,4	24,2	29,0	19,4	21,2
17/12/85	30,0	20,0	25,7	72,0	20,8	23,0	23,2	29,6	22,0	24,2
19/12/85	33,2	17,2	28,2	38,7	19,6	26,6	20,0	31,6	16,6	27,8

Tabella 15 - Valores de temperaturas máxima, mínima e média do ar em °C, umidade relativa média do ar em % e temperaturas dos termômetros de bulbo úmido (BU) e bulbo seco (BS), coletadas as 9h, 15h e 21h, para a estação do verão de 1986.

DIAS	Tmax	Tmin	$\bar{T}$	$\overline{UR}$	9h		15h		21h	
					BU	BS	BU	BS	BU	BS
30/12/85	30,0	16,6	21,2	72,3	17,8	21,0	19,2	23,6	17,0	19,0
03/01/86	31,6	16,6	25,7	58,3	18,0	22,8	22,2	31,4	19,8	23,0
06/01/86	29,8	18,0	24,0	65,7	19,0	21,4	22,0	29,0	17,6	21,6
07/01/86	29,0	16,6	24,5	68,3	19,6	22,4	22,0	29,0	19,4	22,0
08/01/86	31,0	20,0	25,2	69,3	20,0	23,0	22,2	29,6	21,0	23,0
10/01/86	30,0	18,8	23,8	81,3	21,0	22,8	23,2	28,6	19,8	20,0
13/01/86	29,0	20,0	24,7	77,7	21,0	22,2	23,4	28,8	21,0	23,0
16/01/86	30,2	20,4	26,6	71,3	22,0	24,6	24,2	30,2	22,0	25,0
17/01/86	32,0	19,8	26,8	71,0	21,6	24,8	22,8	31,6	21,0	24,0
22/01/86	32,2	17,8	25,5	72,3	21,2	23,4	23,0	32,0	20,0	21,0

abela 16 - Valores de temperaturas máxima, mínima e média do ar em °C, umidade relativa média do ar em % e temperaturas dos termômetros de bulbo úmido (BU) e bulbo seco (BS), coletadas as 9h, 15h e 21h, para a estação do outono de 1986.

DIAS	Tmax	Tmin	$\bar{T}$	$\overline{UR}$	9h		15h		21h	
					BU	BS	BU	BS	BU	BS
02/04/86	30,0	16,6	25,4	71,3	21,2	24,4	23,6	29,8	20,0	22,0
04/04/86	31,0	17,0	25,9	70,0	21,0	24,6	23,0	31,0	21,0	22,0
07/04/86	30,6	19,0	25,9	74,7	21,6	25,0	24,6	30,6	21,0	22,0
08/04/86	31,0	18,4	25,9	76,0	21,6	24,6	24,2	30,8	21,8	22,2
09/04/86	31,2	18,2	25,1	76,0	21,2	23,0	23,8	31,2	20,0	21,0
10/04/86	31,2	18,6	26,3	73,0	22,6	24,6	24,8	31,2	20,2	23,0
11/04/86	31,6	17,2	26,9	71,3	23,6	26,0	23,8	31,6	21,0	23,0
15/04/86	25,6	19,8	21,7	83,7	21,4	22,8	21,4	25,0	16,4	17,2
17/04/86	26,6	13,2	20,7	65,0	16,2	19,6	19,0	26,4	14,0	16,0
18/04/86	27,0	12,4	22,1	71,7	16,6	19,2	19,0	26,0	20,0	21,0
23/04/86	28,0	14,6	23,4	66,7	29,0	22,2	20,2	28,0	18,0	20,0
25/04/86	29,4	16,2	24,7	66,3	29,8	23,2	21,2	28,0	20,0	23,0
29/04/86	25,6	12,0	20,1	64,7	15,4	18,0	16,8	25,2	15,0	17,0
30/04/86	26,0	11,0	21,3	67,7	28,6	20,8	18,0	26,0	15,0	17,0
05/05/86	28,2	11,4	24,3	53,3	26,2	21,0	18,0	28,0	20,0	24,0
06/05/86	30,0	12,0	24,4	58,3	27,2	21,6	19,8	30,0	19,0	21,6
16/05/86	29,0	13,6	22,7	78,3	29,6	22,0	22,0	27,2	18,4	19,0
17/05/86	28,2	13,8	22,9	71,3	29,0	21,2	20,4	28,2	18,2	19,4
23/05/86	27,2	12,6	21,3	77,3	17,2	18,8	21,2	27,0	17,0	18,0
27/05/86	27,6	14,2	23,4	51,7	24,2	24,6	20,2	27,6	16,2	18,0
28/05/86	27,6	13,2	22,4	69,0	28,0	20,6	19,0	27,6	18,0	19,0
29/05/86	27,9	13,0	19,2	61,3	26,2	20,4	19,2	27,8	16,0	18,0
30/05/86	27,2	14,4	22,6	61,0	27,2	20,6	20,0	27,2	18,0	20,0
02/06/86	22,3	7,2	16,3	63,0	11,8	13,6	14,8	22,2	10,2	13,0
03/06/86	22,8	7,0	17,3	68,0	13,4	15,0	15,6	22,8	12,0	14,0
09/06/86	25,4	9,0	18,9	63,0	14,0	17,4	16,8	25,4	12,6	14,0
10/06/86	26,0	10,0	19,7	67,0	15,0	18,0	17,0	25,2	15,0	16,0
11/06/86	27,4	9,0	20,7	57,7	14,0	18,0	16,8	27,0	15,0	17,0
17/06/86	26,4	10,2	20,4	62,0	15,2	18,8	18,0	26,4	14,0	16,0
18/06/86	26,4	10,6	21,0	51,7	15,4	19,0	16,8	26,4	13,0	17,6
19/06/86	26,2	10,0	20,2	60,0	14,8	18,2	17,4	25,8	14,0	16,6
20/06/86	26,4	10,2	19,5	60,0	15,0	19,6	17,2	24,8	12,0	14,0

Tabela 17 - Valores medidos de evapotranspiração de grama (ETg) em milímetros, insolação (n) em horas e estimados de radiação líquida (Rn) em milímetros equivalentes de evaporação, para a estação da primavera de 1985.

DIAS	ETg	n	Rn	DIAS	ETg	n	Rn
25/09/85	5,1	11,0	5,8559	29/10/85	4,4	5,3	4,1993
26/09/85	6,0	11,0	5,8559	30/10/85	5,2	9,0	5,1768
27/09/85	5,2	10,0	5,5763	07/11/85	5,8	10,0	5,3220
01/10/85	4,8	8,5	5,0436	08/11/85	6,0	11,0	5,5763
02/10/85	5,6	10,5	5,5763	10/11/85	6,0	12,5	5,9576
03/10/85	5,5	11,0	5,7094	12/11/85	7,2	12,0	5,8305
04/10/85	5,8	11,0	5,7094	14/11/85	7,0	12,0	5,8305
07/10/85	3,7	4,0	3,8450	20/11/85	4,5	8,0	4,8136
11/10/85	5,6	10,0	5,4431	29/11/85	3,5	5,0	4,0508
15/10/85	7,7	12,0	5,9758	02/12/85	5,0	9,5	5,0915
16/10/85	7,8	10,0	5,4431	06/12/85	5,6	12,5	5,8373
17/10/85	7,1	11,7	5,8879	09/12/85	6,7	6,0	5,7627
18/10/85	6,2	9,3	5,2646	11/12/85	5,0	12,0	4,8429
22/10/85	6,3	12,0	5,9758	16/12/85	3,7	4,0	4,0226
23/10/85	7,3	12,0	5,9758	17/12/85	3,7	3,5	4,2712
25/10/85	5,2	6,0	4,3377	19/12/85	5,8	3,0	5,7627

Tabela 18 - Valores medidos de evapotranspiração de grama (ETg) em milímetros, insolação (n) em horas e estimados de radiação líquida (Rn) em milímetros equivalentes de evaporação, para a estação do verão de 1986.

DIAS	ETg	n	Rn	DIAS	ETg	n	Rn
30/12/85	5,0	12,0	5,7627	10/01/86	4,5	9,0	5,0336
03/01/86	5,9	12,0	5,7850	13/01/86	3,9	6,0	4,2823
06/01/86	5,6	11,0	5,5345	16/01/86	5,5	11,0	5,5345
07/01/86	5,0	8,0	4,7832	17/01/86	5,8	12,0	5,7850
08/01/86	5,2	9,0	5,0336	22/01/86	4,7	8,0	4,7832

Tabela 19 - Valores medidos de evapotranspiração de grama (ETg) em milímetros, insolação (n) em horas e estimados de radiação líquida (Rn) em milímetros equivalentes de evaporação, para a estação do outono de 1986.

DIAS	ETg	n	Rn	DIAS	ETg	n	Rn
02/04/86	2,6	10,0	3,0327	16/05/86	2,0	7,2	2,5529
04/04/86	3,0	10,5	3,1284	17/05/86	2,4	9,0	2,9189
07/04/86	2,7	10,0	3,0327	23/05/86	2,4	9,8	3,0849
08/04/86	2,9	10,0	3,0327	27/05/86	3,3	10,2	3,1530
09/04/86	2,6	10,3	3,0959	28/05/86	2,6	10,0	3,1189
10/04/86	2,7	9,0	2,8413	29/05/86	2,4	10,0	3,1189
11/04/86	3,2	10,3	3,0959	30/05/86	2,5	6,5	2,4188
15/04/86	1,5	1,3	1,3732	02/06/86	2,4	10,0	3,1745
17/04/86	2,4	10,3	3,0959	03/06/86	2,5	10,0	3,1745
18/04/86	2,8	10,0	3,0327	09/06/86	2,5	10,0	3,1745
23/04/86	2,6	10,5	3,1284	10/06/86	2,6	10,0	3,1745
25/04/86	2,7	9,3	2,9045	11/06/86	2,4	9,0	2,9649
29/04/86	2,8	10,5	3,1284	17/06/86	2,7	10,0	3,1745
30/04/86	2,5	10,5	3,1284	18/06/86	2,6	10,0	3,1745
05/05/86	2,9	9,5	3,0189	19/06/86	2,0	7,0	2,5578
06/05/86	2,9	9,0	2,9189	20/06/86	2,3	8,3	2,8312