

# AJUSTE DO MÉTODO DE PRIESTLEY-TAYLOR ÀS CONDIÇÕES CLIMÁTICAS LOCAIS

NILSON A. VILLA NOVA<sup>1</sup>, ANDRÉ B. PEREIRA<sup>2</sup>

**RESUMO:** A sustentabilidade da agricultura irrigada depende primariamente do manejo eficiente da irrigação, de modo a aumentar a produtividade primária de uma cultura em determinada localidade. A eficiência no uso de água pode ser melhorada pelo próprio esquema de irrigação adotado, sendo essencialmente governado pelas condições climáticas. O planejamento da irrigação e a tomada de decisão são funções do conhecimento da demanda evaporativa da atmosfera, sendo expressa pela demanda potencial (ET<sub>o</sub>). Em geral, quase todos os métodos de estimativa de ET<sub>o</sub> reportados na literatura referem-se a valores diários, incluindo-se nessa situação as perdas noturnas de evaporação, as quais serão expressivas apenas em alguns dias após a chuva ou irrigação. Desenvolveu-se, no presente estudo, método corrigido para estimar ET<sub>o</sub>, baseado no balanço de energia local, a partir de dados meteorológicos monitorados em postos de observação de superfície durante o período de luz. Para validação do método de Priestley-Taylor ajustado às condições locais, foram utilizados dados observados em estação meteorológica automática instalada em Piracicaba - SP, bem como medidas lisimétricas coletadas na Fazenda Areião da área experimental da ESALQ/USP. Estudos de regressão revelaram que o método proposto apresentou excelentes resultados quando comparado com o método de Penman-Monteith e com medidas realizadas em lisímetros de pesagem com célula de carga, dados os elevados valores de coeficiente de determinação obtidos, podendo ser recomendado, portanto, em estudos de avaliação de consumo de água das culturas em diversas localidades.

**PALAVRAS-CHAVE:** balanço de energia, modelagem, demanda atmosférica.

## ADJUSTMENT OF THE PRIESTLEY-TAYLOR METHOD TO LOCAL CLIMATIC CONDITIONS

**ABSTRACT:** The sustainability of irrigated agriculture depends primarily on the efficient management of irrigation in order to increase the crop primary productivity in a given site. The efficiency in water use can be enhanced by the irrigation schedule adopted, being mainly governed by the climatic conditions. The irrigation planning and the decision making is a function of the knowledge of atmospheric demand, which might be expressed by the reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>). In general, almost all the ET<sub>o</sub> estimation methods reported by the literature refers to daily values, including in such situation the night evaporation losses, which must be taken into account only during some days after rain or irrigation. In the current study a corrected method for estimating ET<sub>o</sub>, based on the local energy balance, was proposed from meteorological data monitored in an automated weather station throughout light periods. To validate the current methodology a set of climatic data observed in Piracicaba, SP, Brazil, as well as lysimetric measurements collected at the "Areião" Agricultural Experiment Station of the University of São Paulo - ESALQ/USP - were used for such a purpose. Regression analyses have revealed that the proposed method showed excellent results when compared with Penman-Monteith method and also with measurements made by weighting lysimeters, given the high coefficient of determination values obtained, being able to be recommended, however, in studies for assessment of crop water use at several sites.

**KEYWORDS:** energy balance, modeling, atmospheric demand.

<sup>1</sup> Eng<sup>o</sup> Agrônomo, Professor Associado, Departamento de Ciências Exatas, ESALQ/USP, Piracicaba - SP, Fone: (0XX19) 3429.4283 - R. 224, navnova@carpa.ciagri.usp.br, Bolsista PQ - CNPq 1-A.

<sup>2</sup> Eng<sup>o</sup> Agrônomo, Professor Associado, Departamento de Ciência do Solo e Engenharia Agrícola, UEPG, Ponta Grossa - PR, abelmont@uepg.br, Bolsista PDE - CNPQ.

Recebido pelo Conselho Editorial em: 28-9-2004

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 14-8-2006

## INTRODUÇÃO

Até recentemente, a recomendação da irrigação tem sido determinada pelo conceito da evapotranspiração potencial ou de referência (ET<sub>o</sub>), definida como sendo o uso de água por uma cobertura vegetal com altura uniforme, estando em fase de crescimento ativo, cobrindo totalmente a superfície do solo e sob condição de suprimento hídrico não-restritivo ao desenvolvimento da cultura-padrão (grama ou alfafa). As exigências diárias de água de outras culturas são, então, estimadas por meio do ajuste de ET<sub>o</sub> dado pelo fator multiplicador inerente a cada espécie vegetal, o qual representa as diferenças entre a cultura de interesse e a cultura-padrão. Tais diferenças incluem a cobertura incompleta do terreno, bem como o estágio fenológico de desenvolvimento, no caso de culturas agrônômicas (DOORENBOS & PRUITT, 1977; CSSRI, 2000 e ALLEN et al., 1994).

McANENEY & ITIER (1996) apontam os limites operacionais da fórmula de Priestley-Taylor, comparando-a com a equação de Penman-Monteith, destacando que a primeira, empiricamente, propõe coeficiente de proporcionalidade entre a taxa de perda d'água de uma superfície vegetada para a atmosfera e a energia líquida disponível. Apesar dessa aparente simplicidade, os autores asseveram que a equação de Priestley-Taylor apresenta suporte experimental substancial, especialmente em regiões úmidas, fato que pode revelar o modo com que as culturas interagem com as condições ambientais quando o solo não apresenta restrição hídrica durante o seu período de crescimento e desenvolvimento.

A estimativa da demanda climática ideal de água da cultura é importante aspecto a ser considerado no planejamento agrícola e tem constituído uma área de pesquisa que tem atraído a atenção de muitos cientistas envolvidos com estudos relacionados ao manejo da irrigação e à agrometeorologia no mundo inteiro. Um parâmetro fundamental, que precisa ser determinado para possibilitar o conhecimento da exigência hídrica de culturas, é a evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>). É desejável que se tenha um método que estime a ET<sub>o</sub> com boa precisão e a partir de dados meteorológicos fáceis de serem obtidos, pois a demanda potencial é utilizada para calcular o consumo de água das plantas, de modo a garantir a sustentabilidade da agricultura irrigada em dada região. O planejamento da irrigação e a tomada de decisão em escala regional são feitos com base nos cálculos de estimativa da evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>), a qual depende, entre outros fatores, de elementos meteorológicos locais que governam a demanda evaporativa da atmosfera.

De modo geral, quase todos os métodos de estimativa de ET<sub>o</sub> referem-se a valores de evapotranspiração potencial de um período diário. Nessa situação, são incluídas as perdas noturnas de evaporação da água do solo que serão expressivas apenas em alguns dias após a chuva ou irrigação. Geralmente, os métodos que fazem uso de valores médios diários de temperatura, umidade relativa do ar e vento não retratam bem a realidade física do processo de perda d'água e podem mascarar o real comportamento diurno dessas variáveis climáticas. Assim sendo, no presente estudo, desenvolveu-se um método de cálculo da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) em base diurna durante o período de luz, visando a quantificar apenas os valores diurnos da evapotranspiração, os quais são bem mais representativos do processo de transferência de vapor d'água para a atmosfera em um dado agroecossistema, comparados às taxas de transferência observadas em períodos de 24 horas.

## MATERIAL E MÉTODOS

A teoria clássica relativa à partição do balanço de energia radiante nos diferentes processos naturais pressupõe que a quantidade de radiação líquida (R<sub>n</sub>) recebida por um dossel, sob condições normais de suprimento de água, deverá ser transformada parte em mudança de fase da matéria ou evaporação ( $\lambda E$ ), parte em calor sensível para o ar atmosférico (H) e parte em armazenamento de energia (A) e, de acordo com o princípio da conservação da energia (PEREIRA et al., 1997), tem-se que:

$$R_n - G = \lambda E + H + A \quad (1)$$

Ao fim de um ciclo diurno, pode-se assumir que A é desprezível, bem como considerar que  $\lambda E$  e H retornam da superfície para a atmosfera na forma de transpiração e calor sensível (aquecimento do ar úmido). Foi, então, denominada de razão de Bowen (BOWEN, 1926) a relação entre  $\lambda E$  e H, sendo definida por:

$$\beta = \frac{H}{\lambda E} = \frac{\gamma}{S} \quad (2)$$

em que,

S - tangente à curva de pressão de saturação de vapor d'água em função da temperatura média do ar, kPa °C<sup>-1</sup>, e

$\gamma$  - coeficiente psicrométrico, 0,063 kPa °C<sup>-1</sup>.

O coeficiente psicrométrico pode ser determinado por meio da seguinte expressão:

$$\gamma = \frac{C_p P}{0,622 \lambda} \quad (3)$$

em que,

$C_p$  - calor específico do ar à pressão constante 1,013 kJ kg<sup>-1</sup>;

P - pressão atmosférica local, kPa, e

$\lambda$  - calor latente de vaporização da água, 2,45 MJ kg<sup>-1</sup>.

Substituindo-se (2) em (1), tem-se que:

$$R_n - G = \lambda E \left( 1 + \frac{\gamma}{S} \right) = \lambda E \left( \frac{S + \gamma}{S} \right) \quad (4)$$

Definindo-se  $\frac{S + \gamma}{S}$  como  $\frac{1}{W}$ , e substituindo-se em (4), obtém-se:

$$E = W \frac{R_n - G}{\lambda} \quad (5)$$

No presente procedimento de cálculo, propõe-se o método denominado de Priestley-Taylor ajustado (EToPTa), cuja diferença com relação à eq.(5) se refere à substituição do valor de W, usualmente determinada a temperatura média do ar, pelo valor W\*, determinado em função da média entre as temperaturas do psicrômetro, tal como propõe MONTEITH (1965), sendo, portanto, tal ajuste extremamente dependente da temperatura e da umidade relativa do ar (VILLA NOVA et al., 2002).

A equação que define o cálculo da evapotranspiração de referência ou potencial obtida pelo método do balanço de energia proposto, será expressa por:

$$EToPTa = \alpha * W * \frac{R_n - G}{\lambda} \quad (6)$$

em que,

EToPTa - evapotranspiração potencial estimada pelo método de Priestley-Taylor ajustado durante o período de luz, kg m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup> = mm dia<sup>-1</sup>;

$R_n$  - saldo de radiação da superfície evaporante, MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>;

G - densidade de fluxo de calor sensível no solo, MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>;

$W^* = S^*/S^* + \gamma$  - fator de ponderação dependente da temperatura, da umidade relativa do ar e do coeficiente psicrométrico;

$\alpha^*$  - parâmetro de ajuste do método proposto, similar ao parâmetro de PRIESTLEY-TAYLOR (1972).

O termo W\* é definido pela relação:

$$W^* = \frac{S^*}{S^* + \gamma} \quad (7)$$

em que,

$S^*$  - tangente à curva de pressão de saturação de vapor no ponto médio entre as temperaturas do psicrômetro (valor médio das temperaturas do bulbo seco e úmido,  $T_{su}$ ).

Os valores tabelados de  $T_{su}$  e de  $S^*$  calculados por VILLA NOVA et al. (2002) foram utilizados no cálculo de  $W^*$ , em função da altitude local, da temperatura e umidade relativa do ar.

A equação final representativa do método em estudo (PEREIRA et al., 2004) decorrente da substituição das variáveis  $\alpha^*$ , a qual assumiu valor médio da ordem 1,037, e  $\lambda$  na eq.(5) é dada por:

$$ET_{oPTa} = \frac{1,037 W^* (R_n - G)}{\lambda}$$

ou ainda, sendo  $\lambda = 2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$ ,

$$ET_{oPTa} = 0,423 W^* (R_n - G) \quad (8)$$

Para a determinação do valor médio de  $\alpha^*$ , foram utilizados os dados de evapotranspiração potencial coletados por PEREIRA (1998), no município de Piracicaba - SP (latitude  $22^{\circ}42'S$ , longitude  $47^{\circ}38'W$  e altitude 596 m), na Estação Experimental da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade de São Paulo, durante o período de 1<sup>o</sup> de agosto a 24 de setembro de 1996, totalizando 45 dias de observação. A evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) foi obtida em lisímetro de pesagem com células de carga (Omega Eng., modelo LCCA-2K, capacidade de 910 kg e precisão de 0,037% da sua capacidade), com 0,65 m de profundidade, 1,20 m de comprimento e 0,85 m de largura, cultivado com grama batatais (*Paspalum notatum* F.) e descrito por SILVA et al. (1999). A área que circundava o lisímetro foi manejada de forma a manter o gramado em crescimento ativo, com altura entre 0,08 e 0,15 m e com disponibilidade de água no solo que garantiu a ocorrência da evapotranspiração na razão potencial, conforme recomendam DOORENBOS & PRUITT (1977) e ALLEN et al. (1994).

Para a validação do método de Priestley-Taylor ajustado, proposto para estimar a demanda potencial, foram utilizados dados de temperatura e umidade relativa média diária do ar, saldo de radiação, fluxo de calor sensível no solo, obtidos em estação meteorológica automática, bem como medidas lisimétricas coletadas por PEREIRA (1998) durante o período compreendido entre setembro e dezembro de 1996 (46 dias de observação), e MAGGIOTTO (1996) entre os meses de dezembro de 1995 e maio de 1996 (31 dias de observação). A avaliação do desempenho do modelo de estimativa proposto foi feita perante estudo de regressão linear simples entre os valores de  $ET_o$  calculados pela metodologia proposta e aqueles medidos em lisímetros de pesagem com células de carga, bem como estimados pelo método de Penman-Monteith, para o conjunto de dados em estudo.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### A determinação de $W^*$

Nas Tabelas 1 e 2, são apresentados os valores de  $W^*$  em função dos valores médios diários observados de temperatura ( $T$  °C) e umidade relativa média do ar (UR%) para as altitudes de 0 a 1.000 m e de 1.000 a 2.000 m, respectivamente. Tal parâmetro corrigido a partir da média entre as temperaturas do psicrômetro, de acordo com a proposição de MONTEITH (1965), é função dos valores de  $S^*$  calculados por VILLA NOVA et al. (2002) e da dependência do valor de  $\gamma$  e pressão atmosférica local, conforme demonstrado na eq.(3).

TABELA 1. Valores de  $W^*$  em função dos valores médios diários observados de temperatura ( $T$  °C) e umidade relativa do ar (UR%).

Altitudes de 0 a 1.000 m									
Umidade Relativa (%)									
T (°C)	45	50	55	60	65	70	75	80	85
10	0,532	0,535	0,539	0,542	0,545	0,548	0,551	0,554	0,557
11	0,546	0,549	0,552	0,556	0,559	0,562	0,565	0,568	0,571
12	0,560	0,563	0,566	0,569	0,573	0,576	0,579	0,582	0,585
13	0,573	0,576	0,580	0,583	0,586	0,589	0,593	0,596	0,599
14	0,586	0,589	0,593	0,596	0,599	0,603	0,606	0,609	0,613
15	0,599	0,602	0,606	0,609	0,612	0,616	0,619	0,622	0,626
16	0,612	0,615	0,618	0,622	0,625	0,629	0,632	0,635	0,639
17	0,624	0,628	0,631	0,634	0,638	0,641	0,645	0,648	0,651
18	0,636	0,640	0,643	0,647	0,650	0,653	0,657	0,660	0,663
19	0,648	0,652	0,655	0,659	0,662	0,665	0,669	0,672	0,675
20	0,660	0,663	0,667	0,670	0,674	0,677	0,680	0,684	0,687
21	0,671	0,675	0,678	0,682	0,685	0,688	0,692	0,695	0,698
22	0,682	0,686	0,689	0,693	0,696	0,699	0,703	0,706	0,709
23	0,693	0,697	0,700	0,704	0,707	0,710	0,714	0,717	0,720
24	0,704	0,707	0,711	0,714	0,717	0,721	0,724	0,727	0,730
25	0,714	0,717	0,721	0,724	0,728	0,731	0,734	0,737	0,740
26	0,724	0,727	0,731	0,734	0,737	0,741	0,744	0,747	0,750
27	0,734	0,737	0,740	0,744	0,747	0,750	0,753	0,756	0,760
28	0,743	0,746	0,750	0,753	0,756	0,759	0,762	0,766	0,769
29	0,752	0,756	0,759	0,762	0,765	0,768	0,771	0,774	0,777
30	0,761	0,764	0,768	0,771	0,774	0,777	0,780	0,783	0,786

TABELA 2. Valores de  $W^*$  em função dos valores médios diários observados de temperatura ( $T$  °C) e umidade relativa do ar (UR%).

Altitudes de 1.000 a 2.000 m									
Umidade Relativa (%)									
T (°C)	45	50	55	60	65	70	75	80	85
10	0,569	0,572	0,575	0,578	0,582	0,585	0,588	0,591	0,594
11	0,582	0,585	0,589	0,592	0,595	0,599	0,602	0,605	0,608
12	0,595	0,599	0,602	0,605	0,609	0,612	0,615	0,619	0,622
13	0,608	0,612	0,615	0,619	0,622	0,625	0,629	0,632	0,635
14	0,621	0,625	0,628	0,631	0,635	0,638	0,641	0,645	0,648
15	0,634	0,637	0,641	0,644	0,647	0,651	0,654	0,657	0,661
16	0,646	0,649	0,653	0,656	0,660	0,663	0,666	0,670	0,673
17	0,658	0,661	0,665	0,668	0,672	0,675	0,678	0,682	0,685
18	0,670	0,673	0,677	0,680	0,683	0,687	0,690	0,693	0,697
19	0,681	0,685	0,688	0,691	0,695	0,698	0,701	0,705	0,708
20	0,692	0,696	0,699	0,702	0,706	0,709	0,712	0,716	0,719
21	0,703	0,706	0,710	0,713	0,717	0,720	0,723	0,726	0,729
22	0,714	0,717	0,720	0,724	0,727	0,730	0,733	0,737	0,740
23	0,724	0,727	0,731	0,734	0,737	0,740	0,743	0,747	0,750
24	0,734	0,737	0,740	0,744	0,747	0,750	0,753	0,756	0,759
25	0,743	0,747	0,750	0,753	0,756	0,759	0,763	0,766	0,769
26	0,753	0,756	0,759	0,762	0,766	0,769	0,772	0,775	0,778
27	0,762	0,765	0,768	0,771	0,774	0,777	0,780	0,783	0,786
28	0,771	0,774	0,777	0,780	0,783	0,786	0,789	0,792	0,795
29	0,779	0,782	0,785	0,788	0,791	0,794	0,797	0,800	0,803
30	0,787	0,790	0,793	0,796	0,799	0,802	0,805	0,808	0,810

**Estimativa do parâmetro  $\alpha^*$** 

Para a estimativa de  $\alpha^*$ , utilizaram-se 45 dias de medidas lisimétricas de ETo e de leituras dos elementos meteorológicos correspondentes, coletados por PEREIRA (1998), no período compreendido entre 1º de agosto e 24 de setembro de 1996. O valor médio de  $\alpha^*$  para o período em análise foi igual a 1.037, conforme Tabela 3.

TABELA 3. Valores do parâmetro alfa de Priestley-Taylor modificado pelo método proposto ( $\alpha^*$ ), obtidos por meio da eq.(5) a partir de dados coletados por PEREIRA (1998).

Data	Rn (MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	G (MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	Rn - G (MJ m <sup>-2</sup> d <sup>-1</sup> )	W*	ETo (mm d <sup>-1</sup> )	$\alpha^*$
agosto/1º	9,91	0,68	9,23	0,678	2,10	0,822
2	10,80	0,73	10,07	0,652	2,10	0,784
3	10,15	0,71	9,44	0,659	2,05	0,807
4	10,92	0,91	10,01	0,675	2,89	1,048
5	10,95	0,74	10,21	0,680	2,99	1,055
6	9,99	0,73	9,26	0,676	2,48	0,971
7	9,54	0,81	8,73	0,693	2,42	0,980
8	9,49	0,81	8,68	0,704	2,68	1,075
9	8,25	0,59	7,66	0,721	2,48	1,100
11	7,60	0,63	6,97	0,674	2,21	1,153
12	9,21	0,76	8,45	0,685	2,26	0,957
13	10,73	0,87	9,86	0,710	2,32	0,812
15	9,91	0,58	9,33	0,680	2,65	1,023
16	12,49	0,43	12,06	0,634	2,85	0,913
17	11,99	0,79	11,20	0,667	3,04	0,997
18	12,00	0,80	11,20	0,672	3,05	0,993
19	12,32	0,78	11,54	0,683	3,10	0,964
21	12,31	0,82	11,49	0,704	3,37	1,021
22	11,42	0,88	10,54	0,714	3,14	1,022
23	11,89	0,86	11,03	0,714	3,45	1,073
24	12,61	0,82	11,79	0,707	3,39	0,996
25	12,69	0,87	11,82	0,711	3,55	1,035
26	12,35	0,89	11,46	0,730	3,74	1,095
27	11,23	0,87	10,36	0,740	3,97	1,269
28	10,06	0,84	9,22	0,722	3,00	1,104
29	10,01	0,62	9,39	0,712	2,61	0,956
30	11,19	0,81	10,38	0,734	3,72	1,196
31	12,47	0,57	11,90	0,739	4,30	1,198
setembro/2	12,50	0,70	11,80	0,704	3,38	0,997
4	8,67	0,53	8,14	0,693	2,72	1,181
7	14,11	0,88	13,23	0,696	3,74	0,995
12	10,38	0,55	9,83	0,677	2,85	1,049
13	13,48	1,06	12,42	0,707	3,18	0,887
14	14,32	0,97	13,35	0,717	4,45	1,139
15	14,49	0,89	13,60	0,714	4,18	1,055
17	10,86	0,38	10,48	0,699	3,52	1,177
18	14,08	0,46	13,62	0,674	3,86	1,030
19	15,03	0,82	14,21	0,698	4,41	1,089
20	14,28	0,92	13,36	0,711	4,14	1,068
22	14,39	0,79	13,60	0,740	5,02	1,222
23	13,54	0,83	12,71	0,748	4,52	1,165
24	12,04	0,65	11,39	0,734	3,72	1,090

## Validação do método proposto

A primeira validação do método do balanço de energia ajustado foi realizada mediante o confronto dos valores medidos de evapotranspiração potencial (ET<sub>o</sub>) em lisímetros de pesagem com células de carga com aqueles estimados pelo método proposto, considerando-se uma série, independentemente de dados monitorados por PEREIRA (1998), no município de Piracicaba-SP, durante o período compreendido entre 26 de setembro e 9 de dezembro de 1996, totalizando 46 dias de observação. Uma segunda validação foi feita com o objetivo de confirmar a viabilidade do método, perante estudo de regressão linear simples entre os valores medidos e estimados de ET<sub>o</sub>, levando-se em conta os dados lisimétricos e radiométricos coletados por MAGGIOTTO (1996), na mesma localidade, entre os dias 23 de dezembro de 1995 e 16 de maio de 1996, perfazendo um total de 31 observações completamente independentes.

A estreita correlação entre as medidas lisimétricas realizadas por PEREIRA (1998) e MAGGIOTTO (1996) e as estimativas de ET<sub>o</sub> obtidas pelos métodos de Priestley-Taylor ajustado e de Penman-Monteith é evidenciada pelos elevados valores de coeficiente de determinação apresentados nas Figuras 1 a 6, tendo sido sempre superiores a 0,90.

Nas Figuras de 1 a 3 procedeu-se ao confronto entre ET<sub>o</sub> estimada pelo método proposto e pelo consagrado método de Penman-Monteith, bem como entre os valores estimados por ambos os métodos e aqueles medidos em lisímetros de pesagem, a partir de dados experimentais obtidos por PEREIRA (1998). Pode-se observar que o método de estimativa proposto neste estudo é bastante preciso, tendo em vista o valor de R<sup>2</sup> de 0,903, bem como a dispersão dos dados advindos da comparação entre as estimativas e as medidas ao redor da reta de 45° (Figura 2), a qual confere ao modelo proposto elevada exatidão, apresentando resultados muito similares às estimativas obtidas pela equação de Penman-Monteith (Figura 3). Ao se comparar o desempenho do método em estudo com a do método de Penman-Monteith (Figura 1), constata-se que há concordância bastante consistente entre ambos os métodos, o que se confirma estatisticamente pelo valor de R<sup>2</sup> de 0,961 e pela dispersão extremamente pequena dos pares ordenados ao redor da linha 1:1, fato que evidencia a viabilidade de recomendação do método de Priestley-Taylor ajustado quando não se dispõe de maior número de elementos meteorológicos disponíveis para avaliar a demanda potencial em determinada localidade. Dados os coeficientes angulares da reta de regressão observados nas Figuras 1 a 3, pode-se inferir que o método de Priestley-Taylor ajustado correspondeu a 96,75% de ET<sub>o</sub> calculada pelo método clássico de Penman-Monteith, e que ambos os métodos apresentaram subestimativas inferiores a 3%, conferindo ao método proposto desempenho bastante satisfatório, tendo em vista seu elevado grau de precisão e exatidão na localidade em estudo.

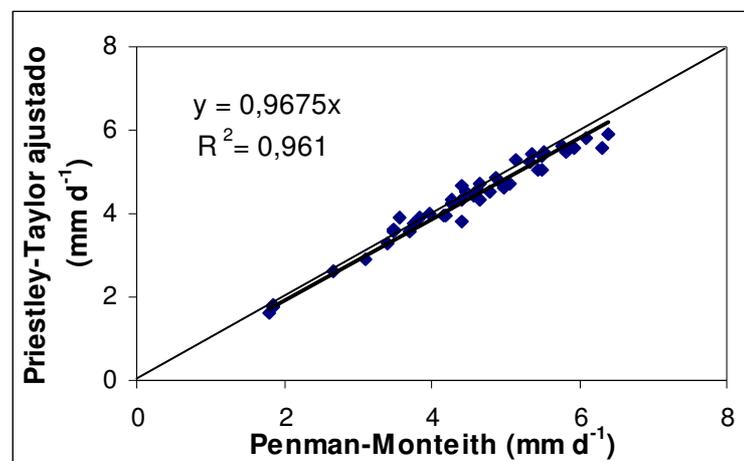


FIGURA 1. Comparação entre a evapotranspiração de referência calculada pelo método de Penman-Monteith e a demanda potencial estimada pelo método de Priestley-Taylor ajustado, para períodos de luz. Dados experimentais de PEREIRA (1998).

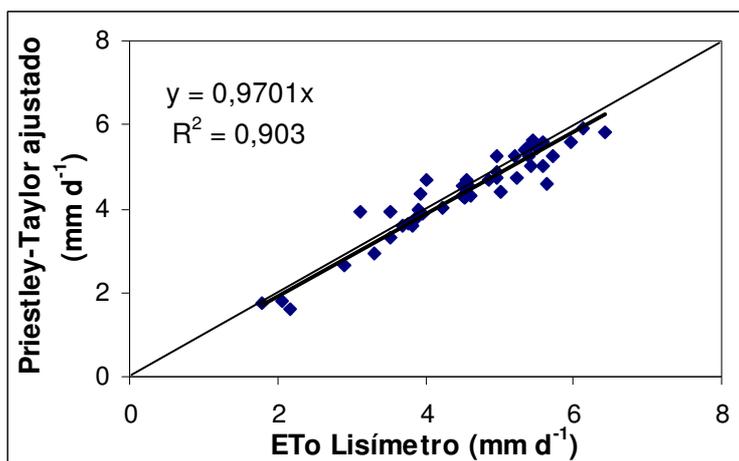


FIGURA 2. Comparação entre a evapotranspiração de referência medida pelo lisímetro de pesagem e a demanda potencial estimada pelo método de Priestley-Taylor ajustado, para períodos de luz. Dados experimentais de PEREIRA (1998).

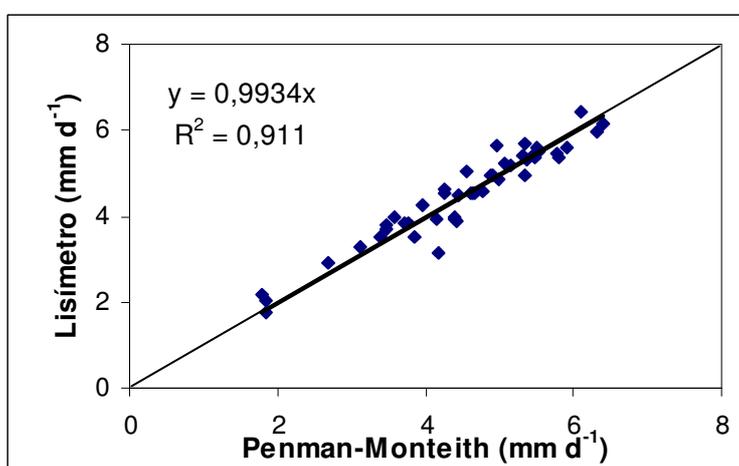


FIGURA 3. Comparação entre a evapotranspiração de referência medida pelo lisímetro de pesagem e a demanda potencial estimada pelo método de Penman-Monteith, para períodos de luz. Dados experimentais de PEREIRA (1998).

Nas Figuras 4 a 6, a validação do método em estudo é reforçada a partir da análise dos dados experimentais obtidos por MAGGIOTTO (1996). Na Figura 4, demonstra-se a pronunciada concordância entre os métodos de estimativa de ETo considerados, dada pelo elevado valor de coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,989$ ) e pelo notório grau de coincidência entre a linha de tendência e a reta de  $45^\circ$ , quando a reta de regressão é forçada a passar pela origem ( $b = 0,973$ ), destacando-se, mais uma vez, a viabilidade do método que se propõe em estudos desenvolvidos para avaliar a demanda de água de culturas. Nas Figuras 5 e 6, observa-se excelente desempenho de ambos os métodos de estimativa da demanda potencial mediante comparação com medidas lisimétricas, dada pelos valores de  $R^2$  superiores a 0,949, sendo que o método de Priestley-Taylor ajustado tendeu ligeiramente a superestimar a evapotranspiração em cerca de 5%, ao passo que o método de Penman-Monteith apresentou tênue tendência para subestimar a demanda atmosférica na razão potencial, em torno de 7%.

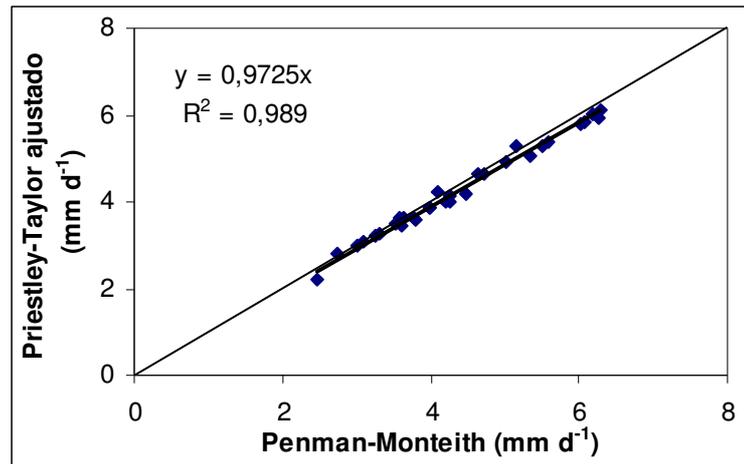


FIGURA 4. Comparação entre a evapotranspiração de referência calculada pelo método de Penman-Monteith e a demanda potencial estimada pelo método de Priestley-Taylor ajustado, para períodos de luz. Dados experimentais de MAGGIOTTO (1996).

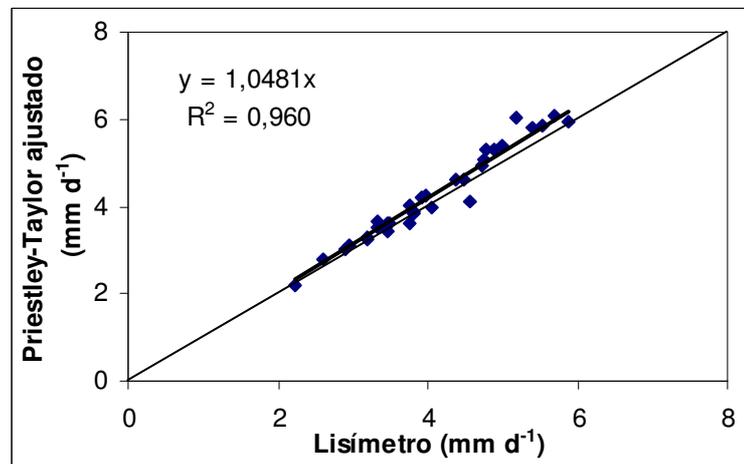


FIGURA 5. Comparação entre a evapotranspiração de referência medida pelo lisímetro de pesagem e a demanda potencial estimada pelo método de Priestley-Taylor ajustado, para períodos de luz. Dados experimentais de MAGGIOTTO (1996).

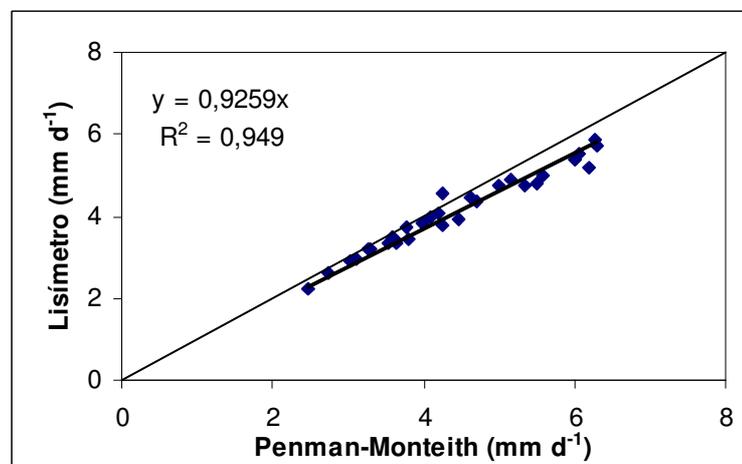


FIGURA 6. Comparação entre a evapotranspiração de referência calculada pelo método de Penman-Monteith e a demanda potencial medida pelo lisímetro de pesagem, para períodos de luz. Dados experimentais de MAGGIOTTO (1996).

## CONCLUSÕES

Sob as condições climáticas da região de coleta dos dados experimentais, o critério de ajuste da evapotranspiração de referência estimada pelo método do balanço de energia proposto (EToPTa) realizou estimativas praticamente iguais àquelas obtidas pelo método clássico de Penman-Monteith, com a vantagem de simplificar o cálculo de ETo e de prescindir do conhecimento da velocidade de vento, utilizando de maneira simples o balanço de energia radiante, a temperatura e a umidade relativa média diária do ar.

Para as condições climáticas da região em estudo, o método, quando testado como avaliador de medidas de evapotranspiração potencial obtidas por lisímetros ponderais de precisão, revelou excelente desempenho, atestado pelas análises estatísticas, demonstrando ser viável para avaliações da evapotranspiração de referência padrão.

Espera-se, pelo desenvolvimento teórico do método, baseado na equação do balanço de energia padrão, que o mesmo possa ser utilizado com boa precisão em outras regiões climáticas.

## AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela concessão das bolsas de produtividade em pesquisa e de pós-doutorado no exterior, favorecendo a realização do presente trabalho.

## REFERÊNCIAS

- ALLEN, R.G.; SMITH, M.; PEREIRA, L.S.; PERRIER, A. An update for the calculation of reference evapotranspiration *International Commission on Irrigation and Drainage Bulletin*, New Delhi, v.43, n.1, p.35-92, 1994.
- BOWEN, I.S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. *Physics Review Service*, New York, v.27, n.2, p.779-87, 1926.
- CSSRI. *Evapotranspiration estimation and crop-coefficients*. Kamal: Technical Report of Central Soil Salinity Research Institute, Karnal, India, 2000. 33 p.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. *Crop water requirements*. Rome: FAO, 1977. 179 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 24).
- MAGGIOTTO, S.R. *Estimativa da evapotranspiração de referência pelo uso da termometria ao infravermelho*. 1996. 71 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1996.
- McANENEY, K.J.; ITIER, B. Operational limits to the Priestley-Taylor formula. *Irrigation Science*, Berlin, v.17, n.1, p.37-43, 1996.
- MONTEITH, J.L. Evaporation and environment: Rothamsted Experimental Station. *Harpden*, Herts, v.19, n.3, p.205-34, 1965.
- PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. *Evapo(transpiração)*. Piracicaba: FEALQ/USP, 1997. 183 p.
- PEREIRA, F.A.C. *Desempenho do modelo de Penman-Monteith e de dois evapotranspirômetros na estimativa da evapotranspiração de referência (ETo) em relação a um lisímetro de pesagem*. 1998. 87 f. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.
- PEREIRA, A.B.; VILLA NOVA, N.A.; SHOCK, C.C. Estimation of reference evapotranspiration by a modified Bowen method. In: ANNUAL INTERNATIONAL IRRIGATION SHOW - THE IRRIGATION ASSOCIATION, 25., 2004, Tampa Bay, Florida. *Proceedings...* Omnipress, 2004. p.325-39.

PRIESTLEY, C.H.B.; TAYLOR, R.J. On the assessment of surface heat flux and evaporation, using large scale parameters. *Monthly Weather Review*, Madison, v.100, n.2, p.81-92, 1972.

SILVA, A.A.G. *Avaliação da eficiência de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Parnaíba - PI*. 1999. 80 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

VILLA NOVA, N.A.; PEREIRA, A.B.; PEREIRA, A.R. Ajustes de S e W da equação de Penman em função da média entre as temperaturas do psicrômetro. *Irriga*, Botucatu, v.7, n.3, p.241-51, 2002.