



ISSN 0104-1347

# Estimação do saldo de radiação e da evapotranspiração de referência, em função das temperaturas máxima e mínima do ar

## Estimation of net radiation and reference evapotranspiration as a function of maximum and minimum air temperatures

Sidney S. Zanetti<sup>1</sup>, Elias F. Sousa<sup>2</sup>, Salassier Bernardo<sup>2</sup>, Robson P. Posse<sup>3</sup>,  
Júlio César F. de Melo Júnior<sup>4</sup>

**Resumo** - A evapotranspiração é componente importante no balanço hídrico do solo. Por ter a sua determinação direta onerosa, justifica-se o desenvolvimento de métodos indiretos de estimação com precisão aceitável, de baixo custo e que exijam dados de fácil obtenção, como é a temperatura do ar. Neste trabalho são propostas equações para a estimação do saldo de radiação (Rn) e da evapotranspiração de referência (ETo) em função das temperaturas máxima e mínima do ar, com ajuste dos seus parâmetros a partir de uma série histórica (09/96 a 08/02) de registros diários de temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar global, pressão atmosférica e velocidade do vento, coletados em Campos dos Goytacazes, RJ. Para o teste das mesmas foram utilizados dados independentes desse local e de Viçosa, MG, no período de 2002-2003. Além da utilização dos valores diários destas séries, estas também foram agrupadas em valores médios de 3, 7, 15 e 30 dias (médias móveis). Com os ajustes obtidos, os testes indicaram ser possível estimar Rn e ETo a partir de dados de temperatura máxima e mínima do ar em Campos dos Goytacazes, RJ, para as escalas semanal, quinzenal e mensal, e mostraram a potencialidade do uso em outros locais, com os ajustes específicos.

**Palavras-chave:** elementos climáticos, métodos de regressão, modelos estocásticos.

**Abstract** - Evapotranspiration is an important part of the soil water balance. Its direct determination is expensive, thus justifying the development of indirect determination methods with acceptable precision, low cost and data easily available, as air temperature. In this study equations to estimate the net radiation (Rn) and reference evapotranspiration (ETo) as a function of the maximum and minimum air temperatures are proposed and tested. A historical series from 09/96 to 08/02 of daily records of air temperature, relative humidity, incoming solar radiation, atmospheric pressure, and wind speed, from Campos dos Goytacazes, RJ, Brazil, was used to determine the equations parameters. For testing these equations a series of independent data from 2002-2003, obtained in Campos dos Goytacazes, RJ, and Viçosa, MG were used. Besides the use of daily data, moving averages of 3, 7, 15, and 30 were also used. With the local adjustments, the tests showed it is possible to estimate Rn and ETo from maximum and minimum air temperature data in Campos dos Goytacazes, RJ, from weekly, bi-weekly and monthly data. Results also showed the potential for using these methods on different locations with specific local adjustments.

**Key words:** climatic elements, regression methods, stochastic models.

<sup>1</sup> Engº Agrônomo, Doutorando, Bolsista do CNPq - Brasil, Laboratório de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual do Norte Fluminense, LEAG/CCTA/UENF, Campos dos Goytacazes - RJ, (22) 2726-1543, e-mail: sidney@uenf.br.

<sup>2</sup> Professor, Doutor, Laboratório de Engenharia Agrícola, LEAG/CCTA/UENF, Campos dos Goytacazes - RJ.

<sup>3</sup> Engº Agrônomo, Doutorando, LEAG/CCTA/UENF, Campos dos Goytacazes - RJ.

<sup>4</sup> Engº Agrícola, Doutor, Universidade Federal do Vale do São Francisco, UNIVASF, Petrolina - PE.



## Introdução

A evapotranspiração é um dos componentes do balanço hídrico no solo, cuja determinação é fundamental para diversos campos de aplicação, como para a hidrologia, a agrometeorologia, a irrigação e a drenagem, entre outros. Porém, a sua determinação direta é difícil e onerosa, requerendo equipamentos e pessoal especializados. A utilização de métodos indiretos de estimativa da evapotranspiração é preferida no campo por ser relativamente de baixo custo e de maior simplicidade.

A escolha de um método para a estimativa da evapotranspiração depende de uma série de fatores. Um deles é a disponibilidade de dados meteorológicos exigidos em cada método, sendo que ALLEN et al. (1998) recomendam a utilização do método de Penman-Monteith (FAO-56) como padrão para estimar a evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>). Todavia, os dados meteorológicos necessários para aplicação desse método nem sempre estão disponíveis, particularmente a velocidade do vento e o déficit de pressão do vapor d'água no ar. Com isso, é comum encontrar equações empíricas para estimar a ET<sub>o</sub> em função de elementos climáticos que podem ser obtidos de forma mais prática, como a temperatura do ar e a radiação solar extraterrestre (HARGREAVES & SAMANI, 1985; SAMANI, 2000).

O saldo de radiação (R<sub>n</sub>), uma das variáveis requeridas pelo método de Penman-Monteith (FAO-56), pode ser medido por equipamentos de alto custo, sendo mais utilizados para fins de pesquisa. Pode, ainda, ser estimado por equações que consideram os fluxos de radiação solar incidente refletida pela superfície, de radiação de ondas longas emitida pela superfície e sua contra-emissão pela atmosfera (PEREIRA et al., 1998), sendo os dois últimos freqüentemente estimados por fórmulas empíricas, em função da temperatura do ar e da pressão parcial de vapor (PEREIRA et al., 1997).

Diante do interesse por métodos de estimativa que utilizem dados mais facilmente acessíveis, realizou-se este trabalho com o objetivo de propor equações para a estimativa do saldo de radiação e da evapotranspiração de referência em função das temperaturas máxima e mínima do ar e da radiação solar extraterrestre.

## Material e Métodos

Utilizou-se uma série de dados do período de setembro de 1996 a agosto de 2003, obtida na Estação Evapotranspirométrica da UENF/PESAGRO, localizada na Área Experimental em Campos dos Goytacazes, RJ (latitude 21°45' S, longitude 41°18' W e altitude 11 m). Os dados diários de temperatura e umidade relativa do ar, radiação solar, pressão atmosférica e velocidade do vento a 2 m de altura, foram coletados por meio de estação meteorológica automática Adolf Thies GmbH & Co. KG. A série foi dividida em duas partes, sendo a primeira, de setembro de 1996 a agosto de 2002, utilizada para determinação dos coeficientes das equações de estimativa de R<sub>n</sub> e ET<sub>o</sub>, e a segunda, de setembro de 2002 a agosto de 2003, utilizada no teste das mesmas. Adicionalmente, visando avaliar a transportabilidade das equações ajustadas para outra localidade, foram utilizados dados meteorológicos do período de setembro de 2002 a agosto de 2003, obtidos em Viçosa, MG (latitude 20°45' S, longitude 42°51' W e altitude 690 m).

Os dados meteorológicos diários foram agrupados em valores médios de 3, 7, 15 e 30 dias, com uso de médias móveis, para aumentar o número de pontos de comparação.

No ajustamento das equações para as localidades, os dados diários e as médias móveis foram agrupados visando à obtenção de modelos generalizados que pudessem ser aplicados tanto para estimar valores diários quanto valores médios de vários dias. No teste das equações, os conjuntos de dados diários e médios de vários dias foram analisados separadamente, ou seja, foi avaliado o desempenho das equações ao estimar dados diários e médios de R<sub>n</sub> e ET<sub>o</sub>.

O saldo de radiação (R<sub>n</sub>, MJ.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>) foi estimado a partir da Equação 1 proposta por ALLEN et al. (1998), em função das temperaturas máxima e mínima do ar (T<sub>max</sub> e T<sub>min</sub>, °C) e da irradiância solar extraterrestre (R<sub>a</sub>, MJ.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>):

$$R_n = a + b[(T_{max} - T_{min})^c R_a] \quad (1)$$

em que a, b e c são os parâmetros da equação, obtidos para o local utilizando-se o método iterativo de Gauss-Newton. Os parâmetros da

equao foram testados por intermédio do intervalo de confiana assinttico, em nível de 1% de probabilidade.

O conjunto de dados referente à evapotranspirao de referncia ( $E_{To}$ , mm.d<sup>-1</sup>), estimada pelo método de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998), foi utilizado para propor uma equao de regresso linear simples, tendo como variáveis independentes o fator de ponderao ( $W$ ) e o saldo de radiao em lâmina d'água equivalente ( $R_n$ , mm.d<sup>-1</sup>), como apresentado na Equao 2:

$$E_{To} = a + b (W R_n) \quad (2)$$

em que  $a$  e  $b$  so os parâmetros de ajuste da equao. O fator de ponderao ( $W$ ) foi calculado utilizando-se uma adaptao das equaoes apresentadas por VISWANADHAN et al. (1991), sendo a temperatura do bulbo molhado ( $T_u$ ) substituída pela temperatura média do ar ( $T$ , °C) nas Equaoes 3 e 4, visando simplificar suas variáveis.

$$W = 0,407 + 0,0145 T \quad \text{para } 0^\circ\text{C} \leq T \leq 16^\circ\text{C} \quad (3)$$

$$W = 0,483 + 0,0101 T \quad \text{para } 16,1^\circ\text{C} \leq T \leq 32^\circ\text{C} \quad (4)$$

A temperatura média do ar foi considerada como sendo a média aritmética das temperaturas máxima e mínima. Os valores de  $R_n$  foram obtidos, para cada período, a partir da Equao 1 ajustada. A relao entre as variáveis estudadas na Equao 2 foi avaliada pela aplicao do teste F/ANOVA em nível de 1% de probabilidade.

Aps a obteno dos parâmetros das Equaoes 1 e 2, e utilizando o conjunto de dados de teste dos dois locais, os valores de  $R_n$  e  $E_{To}$  foram estimados e comparados com os valores de  $R_n$ , calculados de acordo com ALLEN et al. (1998), e de  $E_{To}$ , calculada pelos métodos de Penman-Monteith (FAO-56) e de Hargreaves (HARGREAVES & SAMANI, 1985).

Os resultados foram analisados por meio da análise de regresso ( $Y = b_0 + b_1 X$ ), sendo o ajustamento avaliado por meio dos parâmetros ( $b_0$  e  $b_1$ ) das equaoes, pelo coeficiente de determinao ( $r^2$ ) e pelo erro padro de estimativa (EPE). Os parâmetros  $b_0$  e  $b_1$ , que devem tender a 0 e 1 respectivamente, foram submetidos ao teste "t" em nível de 1% de probabilidade.

O grau de ajustamento entre valores observados e estimados foi obtido pelo cálculo do ndice de concordância  $d$  (WILLMOTT, 1981), que apresenta valor adimensional entre 0 (ajuste nulo) e 1 (ajuste completo).

## Resultados e Discusso

Com o agrupamento dos valores diários e médios de  $R_n$ ,  $T_{max}$ ,  $T_{min}$  e  $R_a$  (9541 observaoes) e com a aplicao do método de Gauss-Newton, determinou-se os parâmetros da Equao 1 para se estimar  $R_n$  (Equao 5):

$$R_n = 0,146 [(T_{max} - T_{min})^{0,482} R_a] - 4,453 \quad (r^2 = 0,8224) \quad (5)$$

Todos os parâmetros da Equao 5 foram significativos a 1% de probabilidade pelo intervalo de confiana assinttico (Tabela 1).

Os parâmetros  $\beta_0$  e  $\beta_1$  das equaoes obtidas para os períodos médios de 15 e 30 dias, em Campos dos Goytacazes, no diferiram estatisticamente de 0 e 1, respectivamente, indicando o bom desempenho da estimao para esses períodos. O bom ajuste pode ser confirmado ainda pelos altos valores de  $d$  e pelos baixos valores do EPE, sendo que todos os indicadores melhoram com o aumento do número de dias em que os valores diários foram agrupados em mdias, devido à menor variao dos mesmos.

Para os períodos médios de 1, 3 e 7 dias, em Campos dos Goytacazes, os parâmetros  $\beta_0$  e  $\beta_1$  apresentaram-se estatisticamente diferentes de 0 e 1, respectivamente. Contudo, os valores de  $r^2$ ,  $d$  e EPE obtidos para esses períodos foram satisfatrios.

Para Viosa os parâmetros  $\beta_0$  e  $\beta_1$  foram estatisticamente diferentes de 0 e 1,

**Tabela 1.** Indicadores estatísticos do ajuste entre os valores de Rn calculados (ALLEN et al., 1998) e estimados (Equação 5), para os períodos médios de 1, 3, 7, 15 e 30 dias, de setembro de 2002 a agosto de 2003, em Campos dos Goytacazes, RJ e Viçosa, MG.

Local	Período (dias)	$\beta_0^a$	$\beta_1^b$	$r^2$	n	d	EPE
Campos dos Goytacazes	1	1,589**	0,819**	0,7217	357	0,918	2,14
	3	0,871**	0,891**	0,8388	355	0,954	1,47
	7	0,580**	0,924 <sup>ns</sup>	0,9042	351	0,973	1,08
	15	0,387 <sup>ns</sup>	0,945 <sup>ns</sup>	0,9500	343	0,986	0,76
	30	0,085 <sup>ns</sup>	0,974 <sup>ns</sup>	0,9802	326	0,994	0,50
Viçosa	1	3,014**	0,828**	0,7255	365	0,888	2,24
	3	2,615**	0,875**	0,8222	365	0,904	1,88
	7	2,658**	0,876**	0,8806	365	0,906	1,71
	15	2,612**	0,884**	0,9250	365	0,902	1,61
	30	2,394**	0,908**	0,9517	365	0,897	1,56

<sup>a/</sup> \*\* e ns: significativo e não-significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste t, respectivamente (Ho:  $b_0 = 0$ );

<sup>b/</sup> \*\* e ns: significativo e não-significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste t, respectivamente (Ho:  $b_1 = 1$ );

$b_0$  e  $b_1$ : parâmetros da equação de regressão linear, adimensionais;

$r^2$ : coeficiente de determinação, adimensional;

n: número de observações, adimensional;

d: índice de concordância, adimensional;

EPE: erro padrão de estimativa, (MJ.m<sup>-2</sup>.d<sup>-1</sup>).

respectivamente. Porém, os valores de  $r^2$ , d e EPE pouco diferiram daqueles obtidos para Campos dos Goytacazes, demonstrando que a Equação 5 também possui potencial para estimar o saldo de radiação em outras localidades.

O valor de  $r^2$  para Campos dos Goytacazes (0,7217) na estimativa de Rn diário está dentro da faixa de valores entre 0,6353 e 0,9688 obtida por PEREIRA et al. (1998) ao ajustarem equações de regressão lineares para estimar Rn diário em função da temperatura média, da pressão parcial de vapor do ar, da razão de insolação e da irradiância solar global. Embora nos dois trabalhos a estimativa de Rn possa ser considerada satisfatória, a Equação 5 apresenta a vantagem de necessitar apenas de registros diários das temperaturas máxima e mínima do ar.

A partir das 9541 observações, provenientes do agrupamento dos valores diários e das médias móveis de ETo, W e Rn, obteve-se os parâmetros da

Equação 2, com a finalidade de estimar a evapotranspiração de referência (ETo). A Equação 6 apresenta os parâmetros obtidos com significância a 1% pelo teste F/ANOVA:

$$ETo = 0,508 + 1,076 (W Rn) \quad (6)$$

$$(r^2 = 0,8218)$$

Pela magnitude do coeficiente de determinação, pode-se observar que a variação total de ETo foi estimada de forma satisfatória. Da mesma forma que a Equação 5, a Equação 6 necessita apenas de registros diários das temperaturas máxima e mínima do ar.

Na Tabela 2 são apresentados os indicadores estatísticos do ajuste dos valores de ETo estimados pela Equação 6 e pelo método de Hargreaves, em

**Tabela 2.** Indicadores estatísticos da ETo estimada pela Equao 6 e pelo método de Hargreaves, em relao à ETo estimada por Penman-Monteith, para os períodos médios de 1, 3, 7, 15 e 30 dias, de setembro de 2002 a agosto de 2003, em Campos dos Goytacazes, RJ e Viosa, MG.

Local	Método	Período (dias)	$\beta_0^a$	$\beta_1^b$	$r^2$	n	d	EPE
Campos dos Goytacazes	Equao 6	1	0,522**	0,836**	0,8285	357	0,949	0,6
		3	0,281**	0,899**	0,8900	355	0,968	0,4
		7	0,122 ns	0,943 ns	0,9239	351	0,978	0,3
		15	-0,030 ns	0,984 ns	0,9525	343	0,986	0,3
		30	-0,236 ns	1,037 ns	0,9762	326	0,992	0,2
	Hargreaves	1	0,861**	0,850**	0,8277	357	0,944	0,6
		3	0,604**	0,916**	0,8883	355	0,960	0,5
		7	0,445**	0,959 ns	0,9218	351	0,966	0,4
		15	0,292**	1,001 ns	0,9510	343	0,971	0,4
		30	0,102 ns	1,051 ns	0,9751	326	0,974	0,4
Viosa	Equao 6	1	1,218**	0,797**	0,8212	365	0,906	0,7
		3	1,088**	0,838**	0,8917	365	0,914	0,6
		7	1,058**	0,852**	0,9244	365	0,908	0,6
		15	0,977**	0,878**	0,9470	365	0,897	0,6
		30	0,792**	0,932 ns	0,9706	365	0,889	0,6
	Hargreaves	1	1,433**	0,796**	0,8266	365	0,871	0,9
		3	1,278**	0,843**	0,8919	365	0,871	0,8
		7	1,219**	0,863**	0,9208	365	0,856	0,8
		15	1,108**	0,897**	0,9429	365	0,839	0,8
		30	0,901**	0,957 ns	0,9699	365	0,825	0,8

a/ \*\* e ns: significativo e no-significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste t, respectivamente ( $H_0: \beta_0 = 0$ ).

b/ \*\* e ns: significativo e no-significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste t, respectivamente ( $H_0: \beta_1 = 1$ ).

$\beta_0$  e  $\beta_1$ : parâmetros da equao de regresso linear, adimensionais;

$r^2$ : coeficiente de determinao, adimensional;

n: número de observaoes, adimensional;

d: ndice de concordância, adimensional;

EPE: erro padro de estimativa, (mm.d<sup>-1</sup>).

relao à ETo estimada pelo método de Penman-Monteith, para os períodos diários e médios de 3, 7, 15 e 30 dias, de setembro de 2002 a agosto de 2003.

Os resultados obtidos a partir da Equao 6, para os períodos médios de 7, 15 e 30 dias, em Campos dos Goytacazes, levaram à parâmetros  $\beta_0$  e  $\beta_1$  no diferentes estatisticamente de 0 e 1, respectivamente, e indicam o bom desempenho da

estimaco para estes períodos. O bom ajuste pode ser confirmado ainda, pelos baixos valores do EPE e pelos altos valores do ndice de concordância (d) obtidos. Nos períodos diário e médio de trs dias, em Campos dos Goytacazes, os parâmetros  $\beta_0$  e  $\beta_1$  apresentaram-se estatisticamente diferentes de 0 e 1, respectivamente. Contudo, os valores de  $r^2$ , d e EPE foram satisfatrios, sendo que esses indicadores

melhoraram com o aumento do número de dias em que foram agrupados os valores médios.

Para Viçosa, da mesma forma que os resultados obtidos na estimação de  $R_n$ , os parâmetros  $b_0$  e  $b_1$  apresentaram-se estatisticamente diferentes de 0 e 1, respectivamente. Porém, os valores de  $r^2$ ,  $d$  e EPE apresentaram pouca diferença em relação àqueles obtidos para Campos dos Goytacazes, demonstrando também que a Equação 6, com os devidos ajustes, tem potencial para estimar a evapotranspiração de referência em outras localidades.

O método de Hargreaves, quando comparado com os ajustes obtidos a partir da Equação 6, apresentou indicadores estatísticos de desempenho inferiores nas duas localidades, para a grande maioria dos critérios adotados na avaliação (Tabela 2).

### Conclusões

De acordo com os dados utilizados e com as condições consideradas, o presente estudo permite concluir que o saldo de radiação, para períodos médios de 15 e 30 dias, e a evapotranspiração de referência, para períodos médios de 7, 15 e 30 dias, em Campos dos Goytacazes, podem ser estimados pelas Equações 5 e 6, respectivamente, as quais levam em consideração apenas as temperaturas máxima e mínima do ar e a radiação solar extraterrestre.

### Referências Bibliográficas

- ALLEN, R. et al. **Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper 56).
- HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. **Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature**. Chicago, American Society of Agricultural Engineers, Chicago, 1985. (Paper 85-2517).
- PEREIRA, A. B.; SENTELHAS, P. C.; VILLA NOVA, N. A. Estimativa do balanço de energia radiante em função de elementos climáticos. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.6, n.2, p. 201-206, 1998.
- PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 183 p. 1997.
- SAMANI, Z. Estimating solar radiation and evapotranspiration using minimum climatological data. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v.126, n.4, p. 265-267, 2000.
- VISWANADHAM, Y.; SILVA FILHO, V. P., ANDRÉ, R. G. B. The Priestley-Taylor parameter  $\alpha$  for the Amazon forest. **Forest Ecology and Management**, Madison, v. 38, p. 211-225, 1991.
- WILLMOTT, C. J. On the validation of model. **Physical Geography**, Los Angeles, v.2, n.2, p.184-194, 1981.