

COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE ESTIMATIVA DE ETO E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE PARA DIFERENTES CLIMAS BRASILEIROS

JOÃO GUILHERME ARAÚJO LIMA¹; PAULA CARNEIRO VIANA¹; JOSÉ ESPÍNOLA SOBRINHO² E JOÃO PAULO CHAVES COUTO³

¹Departamento de Engenharia Civil, UNINASSAU, BR 104, KM 68, N° 1215, Agamenon Magalhães, 55000-000, Caruaru, Pernambuco, Brasil. joaopibe@gmail.com; pcvengenharia@gmail.com;

²Departamento de Ciências Ambientais e Tecnológicas, UFERSA, Rua Francisco Mota, N° 572, Presidente Costa e Silva, 59625-900 Mossoró, Rio Grande do Norte, Brasil. jespinoia@ufersa.edu.br;

³Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Núcleo de Engenharia de Água e Solo, UFRB, Rua Rui Barbosa, N° 710, Centro, 44380-000, Cruz das Almas, Bahia, Brasil. E-mail: jpauloengagro@gmail.com.

1 RESUMO

A estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) tem grande importância para a agricultura e manejo da irrigação. O método Penman-Monteith é considerado padrão para estimativa da ET_o. No entanto, por ser completo, o método padrão apresenta como desvantagem a necessidade de uma gama de variáveis meteorológicas. O objetivo dessa pesquisa foi, em escala diária, avaliar o desempenho dos métodos de Hargreaves-Samani, Makkink, Priestley-Taylor, Turc, Radiação FAO-24 e Blaney-Criddle, para as condições climáticas das seis regiões do Brasil. A verificação do desempenho desses modelos foi por meio da comparação ao método de Penman-Monteith. Para avaliar o desempenho dos métodos foi utilizada a raiz quadrada do quadrado médio do erro (RQME), erro absoluto médio (EAM), erro de estimativa (PE) e coeficiente de determinação (R²). Entre os métodos estudados, o de Turc foi o que apresentou melhores resultados para todos os climas do Brasil, exceto para o clima Tropical litorâneo. O método de Makkink foi o que apresentou melhor resultado para o clima Tropical litorâneo. A análise de sensibilidade revelou que a temperatura do ar e a radiação global são as variáveis mais importantes para o método do método Penman-Monteith, exceto para o município BL, em que a variável umidade relativa do ar foi a mais importante.

Palavras-Chave: irrigação, consumo de água, evapotranspiração.

LIMA, J. G. A.; VIANA, P. C.; SOBRINHO, J. E.; COUTO, J. P. C.
COMPARISON OF ETO ESTIMATION METHODS AND SENSITIVITY ANALYSIS
FOR DIFFERENT BRAZILIAN CLIMATES

2 ABSTRACT

Estimation of reference evapotranspiration (ET_o) is of great importance for agriculture and irrigation management. The Penman-Monteith method is considered standard for estimating ET_o. However, because it is complete, the standard method presents as a disadvantage the need for a range of meteorological variables. The objective of this research was to evaluate the performance of Hargreaves-Samani, Makkink, Priestley-Taylor, Turc, FAO-24 and Blaney-Criddle methods for the climatic conditions of the six Brazilian regions. The verification of the

performance of these models was made by comparison to the Penman-Monteith method. To evaluate the performance of the methods, the square root of mean-square error (MSE), mean absolute error (MAE), error of estimate (EE) and coefficient of determination (R^2) were used. Among the methods studied, that of Turc was the one that presented the best results for all the climates of Brazil, except for the tropical coastal climate. The Makkink method was the one that presented the best result for the coastal tropical climate. Sensitivity analysis revealed that air temperature and global radiation are the most important variables for the Penman-Monteith method, except for BL municipality, where the variable relative humidity was the most important.

Keywords: irrigation, water consumption, evapotranspiration.

3 INTRODUÇÃO

A vida vegetal está, sem dúvida, vinculada com a possibilidade dos seres vivos obterem água, elemento fundamental para todos os fenômenos biológicos. O uso racional da água tem sido considerado uma das maiores preocupações mundiais, daí surge a necessidade do desenvolvimento de metodologias que resultem na otimização desse recurso. Segundo Oliveira et al. (2010), a irrigação é indiscutivelmente a atividade de maior uso desse recurso natural, cabendo, portanto, realizar um manejo racional, baseado na da quantificação correta do conteúdo de água perdido por evapotranspiração da cultura (ETc).

A evapotranspiração da cultura (ETc) nada mais é do que a combinação do processo de transpiração pelas plantas e a evaporação direta do solo, processos estes que ocorrem de forma simultânea. Doorenbos e Pruitt (1984), reconhecem a ETc como a lâmina de irrigação que deve ser aplicada ao solo, como forma de garantir o crescimento e a produtividade em condições ideais, sendo estimada a partir do coeficiente de cultura (Kc) associado a estimativas da evapotranspiração de referência (ETo).

De acordo com Clark et al. (1996), o Kc descreve o desenvolvimento fenológico e fisiológico de uma cultura particular em relação à ETo como também representa o

uso de água em uma cultura específica, que é de relevante importância para a estimativa do seu requerimento hídrico, necessário tanto para o dimensionamento de sistemas de irrigação quanto para a operacionalização de perímetros irrigados. Por outro lado, a ETo relaciona-se ao efeito da demanda atmosférica sobre as exigências hídricas das plantas.

De acordo com Cavalcante Junior et al. (2011), a ETo pode ser obtida a partir de medidas diretas ou estimada por meio de informações climáticas. A medida direta da evapotranspiração é difícil e onerosa, justificando a sua utilização somente em condições experimentais. Dentre os métodos que estimam, o método de Penman-Monteith foi convencionado como o método padrão da ETo devido fundamentar-se em aspectos físicos dos processos de evaporação e transpiração e incorporar, explicitamente, parâmetros fisiológicos e aerodinâmicos da cultura de referência. Foi relatado como sendo capaz de fornecer valores consistentes de ETo em muitas regiões e climas (ALLEN et al., 1998, 2005, 2006).

A principal desvantagem do método Penman-Monteith é que o mesmo requer um maior número de variáveis meteorológicas que nem sempre estão disponíveis em todos os locais (TABARI; HOSSEINZADEH, 2011). Isso é especialmente verdadeiro nos países em desenvolvimento, no qual dados

meteorológicos são limitados e as dificuldades em reunir todos os parâmetros meteorológicos necessários, podem apresentar sérias limitações (GOCIC; TRAJKOVIC, 2010; TABARI; HOSSEINZADEH, 2011).

Na ausência de dados para o uso do método Penman-Monteith, recomenda-se o uso de equações de ETo que necessitam de menos parâmetros (PANDEY et al., 2016). No entanto, antes de utilizar estas equações para uma determinada região, é necessário fazer uma avaliação do grau de exatidão de cada método para as novas condições climáticas.

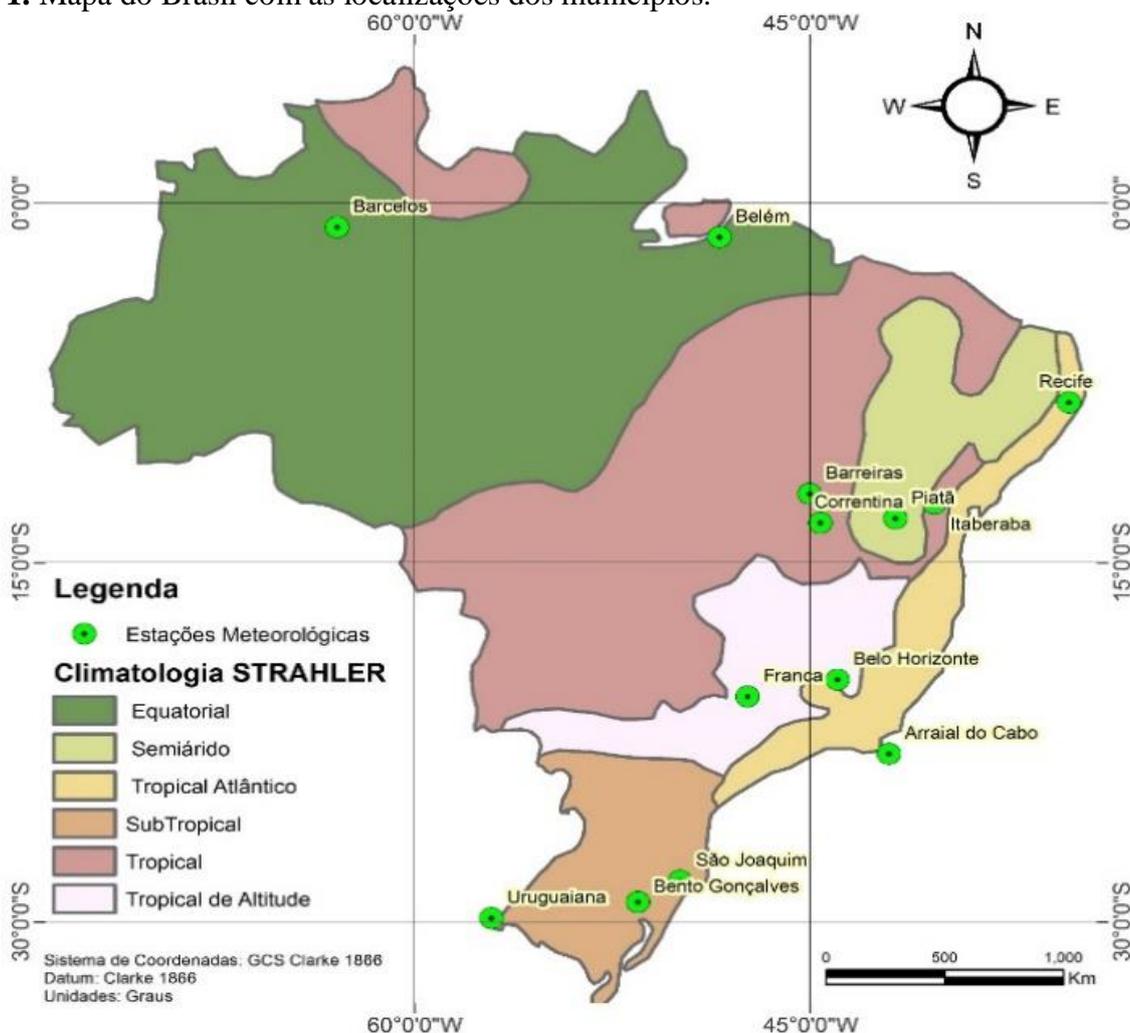
Diante do exposto, objetivou-se avaliar o desempenho de seis métodos de

determinação da ETo diária em comparação com o método de Penman-Monteith, como também, a sensibilidade desse método e a importância relativa das variáveis na estimativa da ETo para localidades em seis condições climáticas diferentes.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Os dados usados neste estudo foram obtidos através do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Na Figura 1 é possível observar a localização dos municípios de acordo com o mapa do Brasil com suas respectivas divisões de clima.

Figura 1. Mapa do Brasil com as localizações dos municípios.



As localidades foram divididas de acordo com a classificação desenvolvida por Strahler e Strahler (1989), que divide o Brasil em seis climas primários: Semiárido, Equatorial, Subtropical, Tropical, Tropical de Altitude e Tropical litorâneo. Os

municípios, com suas respectivas estações meteorológicas selecionadas, constam na Tabela 1, com as devidas coordenadas geográficas e número de anos de dados climáticos.

Tabela 1. Localização, coordenadas geográficas e número de anos de dados.

Clima	Município	Latitude (Sul)	Longitude (Oeste)	Altitude (m)	Ano de dados
Semiárido	Itaberaba (IT)	12°31'26"	40°17'58"	250	2007-2012
	Piatã (PT)	13°09'20"	41°46'26"	1248	2009-2013
Equatorial	Barcelos (BA)	00°59'14"	62°55'27"	30	2009-2013
	Belém (BL)	01°24'49"	48°26'22"	21	2009-2013
Subtropical	B. Gonçalves (BG)	29°09'52"	51°32'93"	623	2008-2013
	São Joaquim (SJ)	28°16'03"	49°56'94"	1400	2009-2013
	Uruguaiana (UA)	29°50'13"	57°04'54"	74	2008-2013
Tropical	Barreiras (BS)	12°07'28"	45°01'37"	474	2007-2013
	Correntina (CO)	13°19'56"	44°37'02"	552	2008-2010
Tropical de altitude	B. Horizonte (BH)	19°53'02"	43°58'09"	854	2008-2013
	Franca (FR)	20°35'94"	47°22'57"	1003	2010-2013
Tropical litorâneo	A. do Cabo (AC)	22°58'31"	42°01'17"	3	2008-2013
	Recife (RE)	08°03'33"	34°57'33"	11	2014-2012

4.1 Comparação de métodos de estimativa de ETo

Antes da comparação entre os métodos os dados de radiação solar foram submetidos a uma análise de qualidade. Diretrizes para validação da radiação solar global foram propostas por Allen et al. (1998). O procedimento consiste em comparar visualmente os dados de radiação solar e a curva estimada de radiação global em dia de céu claro (BORGES et al., 2010).

O programa computacional REF-ET desenvolvido por Allen (2012) foi utilizado para estimativa da ETo por seis diferentes métodos: Makkink (1957), Priestley (1972), Turc (1961), Radiação FAO-24 (DOORENBOS; PRUITT, 1984), Hargreaves e Samani (1985) e Blaney (1950), os quais foram comparados ao método Penman-Monteith parametrizado pela FAO/1998 (ALLEN et al., 1998). As principais características e as variáveis necessárias para cada método neste estudo estão resumidas na Tabela 2.

Tabela 2. Características dos métodos para estimativa da ETo.

Método de estimativa	Variáveis ⁽¹⁾	Cultura de referência	Local desenvolvido
P. Monteith	T ; H ; V ; Rn	Cult. hipotética	Todos os locais
Makkink	T ; R	Gramma	Clima frio da Holanda
P. Taylor	T _{max} ; T _{min} ; R	Cult. de sequeiro	Australia/EUA
Turc	T ; R; Kc; Ks ; P	Gramma	Clima frio da Europa
R. FAO-24	R	Gramma	Adaptação a Makkink
H. Samani	T _{max} ; T _{min} ; T ; Ra	Gramma de estação frio	Semiárido dos EUA
B. Criddle	T ; D ; Kc	Gramma	Semiárido dos EUA

⁽¹⁾T = Temperatura do ar; T_{max} = Temperatura máxima do ar; T_{min} = Temperatura mínima do ar; H= umidade relativa do ar; V= vento; Rn = Saldo de radiação; R= radiação; Kc = Coeficiente de cultivo; Ks= Fator do solo; P = Precipitação; Ra = Radiação extraterrestre; D = Horas diurnas.

Neste estudo, a análise de desempenho entre o método Penman-Monteith e os demais, foi realizada seguindo a metodologia de Tabari e Hosseinzadeh (2011), empregando-se os seguintes parâmetros: raiz quadrada do quadrado médio do erro, RQME (Equação 1); erro absoluto médio, EAM (Equação 2); erro de estimativa, PE (Equação 3) e coeficiente de determinação, R² (Equação 4), definidos como:

$$RQME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i' - O_i)^2}{n}} \quad (1)$$

$$EAM = \frac{\sum_{i=1}^n |P_i - O_i|}{n} \quad (2)$$

$$PE = \left| \frac{\bar{P} - \bar{O}}{\bar{O}} \right| \times 100\% \quad (3)$$

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(O_i - \bar{O}) \right]^2}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (4)$$

Em que: P_i e O_i são os valores previstos e observados, \bar{P} e \bar{O} são as médias de P_i e O_i, e n é o número total de dados.

4.2 Análise de sensibilidade

Para cada município estudado, a análise de sensibilidade dos elementos meteorológicos foi realizada a partir de regressão linear múltipla, correlacionando o método Penman-Monteith como variável dependente com quatro variáveis independentes, temperatura do ar (T); umidade relativa do ar (UR); radiação solar global (Rg) e velocidade do vento (V). O procedimento de análise de sensibilidade se deu em função das possíveis mudanças nas variáveis meteorológicas, considerando-se um intervalo de acréscimo e decréscimo nos valores de cada variável estudada.

Antes da aplicação deste método, a normalização dos dados originais e das variáveis meteorológicas foram realizadas empregando-se a equação (Equação 5) proposta por Ye et al. (2014):

$$X_{is} = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (5)$$

Em que: X_{is} é a variável normalizada, x_i é o valor sequencial do dado, x_{min} e x_{max} são o mínimo e máximo dos valores dos dados sequenciais.

A relação entre a ETo e as variáveis meteorológicas foi então analisada através de regressão múltipla. A fórmula geral da

regressão linear múltipla é a seguinte (Equação 6):

$$Y_s = aX_1 + bX_2 + cX_3 + dX_4 \quad (6)$$

Em que: Y_s é a variável dependente; X_1 , X_2 , X_3 e X_4 são os valores das variáveis meteorológicas e a , b , c e d são os coeficientes de regressão.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com as Tabelas 3 e 4, o método de Turc obteve melhor resultado para o clima semiárido para os dois

municípios (IT e PT) em comparação com o método Penman-Monteith.

O método de Turc, apesar de não ter apresentando o maior R^2 , obteve menor RQME, EAM e PE (Tabelas 3 e 4). Segundo os resultados, o método de Priestley-Taylor pode ser considerado o segundo melhor, superestimando a ETo em 5% e 10% para IT e PT respectivamente. Borges Júnior et al. (2012) estudando métodos de estimativa de evapotranspiração para Garanhuns/PE obtiveram RQME (0,42; 0,36) e EAM (0,34; 0,31) para primavera-verão e outono-inverno respectivamente, valores próximos aos apresentados para os municípios estudados no semiárido.

Tabela 3. Desempenho estatístico dos métodos para estimativa da ETo para as regiões Semiárido, Equatorial e Subtropical.

Método	IE*	Semiárido		Equatorial		Subtropical		
		IT	PT	BA	BL	BG	SJ	UA
Makkink	RQME	0,92	0,55	0,40	0,52	0,55	0,40	0,86
	EAM	0,81	0,47	0,40	0,52	0,44	0,31	0,66
	PE	0,82	0,87	0,87	0,84	0,87	0,98	0,85
	R^2	0,88	0,91	0,99	0,98	0,94	0,92	0,91
Priestley-Taylor	RQME	0,49	0,51	0,86	0,67	0,57	0,83	0,62
	EAM	0,40	0,42	0,83	0,65	0,45	0,68	0,47
	PE	1,05	1,10	1,23	1,19	1,06	1,19	0,99
	R^2	0,90	0,92	0,99	0,98	0,94	0,93	0,92
Turc	RQME	0,46	0,34	0,40	0,24	0,38	0,43	0,57
	EAM	0,36	0,24	0,34	0,20	0,29	0,32	0,43
	PE	0,99	1,01	1,10	1,06	1,08	1,09	1,07
	R^2	0,87	0,92	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93
Radiação FAO-24	RQME	1,13	1,30	0,51	0,40	1,14	1,24	1,36
	EAM	0,94	1,08	0,42	0,32	0,93	1,00	1,12
	PE	1,17	1,23	1,04	1,05	1,14	1,25	1,18
	R^2	0,94	0,95	0,99	0,98	0,95	0,92	0,93
Blaney-Criddle	RQME	0,94	1,11	0,88	1,18	1,30	1,34	0,95
	EAM	0,76	0,93	0,75	1,07	1,04	1,06	0,71
	PE	0,90	0,80	0,96	0,70	0,80	0,73	0,86
	R^2	0,62	0,70	0,51	0,41	0,73	0,51	0,66
Hargreaves-Samani	RQME	0,64	0,63	1,13	1,30	0,73	0,80	0,85
	EAM	0,51	0,50	1,00	1,20	0,54	0,61	0,91
	PE	1,08	1,05	1,37	1,40	1,30	1,32	0,62
	R^2	0,78	0,69	0,73	0,47	0,85	0,72	0,47

*Indicador estatístico

Tabela 4. Desempenho estatístico dos métodos para estimativa da ETo para as regiões Tropical, Tropical de altitude e Tropical litorâneo.

Método	IE*	Tropical		Tropical de altitude		Tropical litorâneo	
		BS	CO	BH	FR	AC	RE
Makkink	RQME	0,91	0,56	0,67	0,66	0,50	0,62
	EAM	0,74	0,46	0,57	0,56	0,38	0,58
	PE	0,84	0,89	0,86	0,90	0,88	0,99
	R ²	0,80	0,91	0,90	0,82	0,92	0,71
Priestley-Taylor	RQME	0,72	0,71	0,48	0,65	0,99	1,23
	EAM	0,59	0,60	0,39	0,54	0,80	1,01
	PE	1,03	1,10	1,04	1,15	1,15	1,34
	R ²	0,61	0,78	0,88	0,84	0,91	0,65
Turc	RQME	0,47	0,50	0,49	0,50	0,61	0,86
	EAM	0,34	0,38	0,39	0,38	0,49	0,63
	PE	1,06	1,08	1,04	1,09	1,10	1,22
	R ²	0,88	0,92	0,87	0,83	0,90	0,69
Radiação FAO-24	RQME	1,35	1,43	1,23	1,09	1,03	1,02
	EAM	1,20	1,26	1,05	0,92	0,86	0,89
	PE	1,24	1,27	1,24	1,20	1,15	1,25
	R ²	0,90	0,90	0,91	0,92	0,93	0,87
Blaney-Cridde	RQME	1,19	1,22	1,24	1,18	0,98	1,05
	EAM	0,96	0,98	0,94	0,93	0,75	0,89
	PE	0,91	0,56	0,67	0,66	0,50	0,62
	R ²	0,74	0,46	0,57	0,56	0,38	0,58
Hargreaves-Samani	RQME	0,84	0,89	0,86	0,90	0,88	0,99
	EAM	0,80	0,91	0,90	0,82	0,92	0,71
	PE	0,72	0,71	0,48	0,65	0,99	1,23
	R ²	0,59	0,60	0,39	0,54	0,80	1,01

*Indicador estatístico

Dentre os seis climas estudados no Brasil, o que apresentou os melhores resultados para o método Hargreaves-Samani foi o semiárido (Tabelas 3 e 4). Esses dados corroboram com os obtidos por Todorovic, Karic e Pereira (2013), que afirmam que o método de Hargreaves-Samani tem melhor desempenho, exceto para climas úmidos no qual o mesmo tende a superestimar o valor de ETo, como foi observado em relação aos outros climas do Brasil. Segundo Raziei e Pereira (2013), o método de Hargreaves-Samani foi desenvolvido para condições áridas e clima subúmido. Bons resultados também foram

encontrados por Bezerra et al. (2014) para o método de Hargreaves-Samani em Mossoró/RN.

Para o clima equatorial, o método de Turc (Tabela 3 e 4) foi o que obteve melhor resultado de ETo em comparação com o método padrão Penman-Monteith, para os dois municípios estudados. Apesar de não ter apresentando o maior R², o método de Turc obteve os menores RQME e EAM e o segundo melhor PE: indicadores que demonstram que o erro médio entre os valores estimados e observados foram menores.

Segundo os resultados (Tabela 3 e 4), o método de Radiação FAO-24 pode ser selecionado como o segundo melhor método, superestimando em 4% e 5% para os municípios Barcelos (BA) e Belém (BL), respectivamente. Segundo Fernandes et al. (2010), o método de Radiação FAO-24 tem como vantagem ser adaptado para diferentes condições de umidade.

Com base nos resultados apresentados nas Tabelas 3 e 4, o método de Hargreaves-Samani obteve o pior resultado, e com os piores resultados de RQME e EAM e o segundo pior R^2 , superestimando em 37% e 40% a ETo por BA e BL, respectivamente. Esse resultado corrobora com Jensen, Burman e Allen (1990), que afirmam que os métodos que se baseiam na temperatura do ar, como é o de Hargreaves-Samani, tendem a superestimar a ETo em climas úmidos. A superestimava do método da Hargreaves-Samani foi encontrada por Costa, Mantovani e Sediyaama (2015) para a região Norte do Brasil, Tabari e Hosseinzadeh (2011) para a região úmida do Iran e na região oeste dos Bálcas por Trajkovic (2007). Além disso, segundo Temesgen et al. (2005), maior velocidade do vento combinado com baixa umidade do ar resulta em valores mais baixos de Hargreaves-Samani em comparação com Penman-Monteith. Por outro lado, a baixa velocidade do vento, aliado à maior umidade relativa do ar resulta em maiores valores de ETo pelo método de Hargreaves-Samani em comparação ao Penman-Monteith. Segundo Tabari e Hosseinzadeh (2011), esse comportamento deve-se, provavelmente, à ausência de dados de velocidade do vento e umidade do ar no método de Hargreaves-Samani.

Para o município UA (Tabela 3), o método que obteve pior resultado foi o de Radiação FAO-24, com valores mais altos de RQME e EAM e o segundo pior valor de PE. Pilau et al. (2012), estudando o desempenho de métodos de estimativa de evapotranspiração para dois municípios no

Rio Grande do Sul, observaram que o método de Radiação FAO-24 houve superestimação em relação aos valores de Penman-Monteith. Esses resultados corroboram com os encontrados para o clima Subtropical no presente trabalho, que superestimam os valores obtidos do método Radiação FAO-24, em relação a Penman Monteith.

Analisando-se os dados para o clima Tropical de altitude (Tabela 4), obtidos nos municípios de BH e FR, observa-se que os melhores resultados foram alcançados com os métodos de Turc e Priestley-Taylor. Segundo Tabari e Hosseinzadeh (2011), o método de Turc foi o mais adequado para estimar ETo em climas úmido-frio e áridos. Bons resultados para o método de Priestley-Taylor foram encontrados por Silva et al. (2011) no município de Uberlândia onde, segundo o autor, o ótimo desempenho era esperado por o mesmo assemelhar-se ao método padrão Penman-Monteith. O método de Blaney-Cridle foi o que obteve piores índices estatísticos, nos municípios de BH e FR. Segundo Doorenbos e Pruitt (1984), este método não é recomendado para regiões em que a temperatura do ar se mantenha estável, ou seja, regiões equatoriais e regiões com altitudes elevadas, devido à temperatura média diária ser baixa mesmo quando os níveis de radiação solar diária são altos. Esses são os casos da altitude e latitude no qual se encontra BH (854 m; 19°53'02" S) e FR (1003m; 20°35'94" S).

Analisando-se o desempenho estatístico dos métodos para estimar a ETo em clima Tropical litorâneo (Tabela 4), observa-se que o método de Makkink foi o que obteve melhores resultados para os dois municípios. Segundo Fernandes et al. (2010), o método de Makkink tem como vantagem a utilização apenas de dados de temperatura do ar e radiação solar, o que o torna recomendado para condições climáticas úmidas.

O método de Hargreaves-Samani teve baixa eficácia em relação ao método padrão de Penman-Monteith nas localidades de AC e RE (Tabela 4). Resultados similares foram encontrados por Tagliaferre et al. (2012) para o município de Ilheus/BA, e por Bragança et al. (2010) em estudos realizados para o período chuvoso no município de Cachoeiro de Itapemirim/ES.

Na Tabela 5, observam-se os resultados da análise de sensibilidade com as devidas percentagens de contribuição das variáveis independentes: temperatura do ar (T); umidade relativa (UR); radiação solar global (Rs) e velocidade do vento (V) em relação à ETo pelo método Penman-Monteith.

Tabela 5. Percentagem de contribuição das variáveis independentes na ETo.

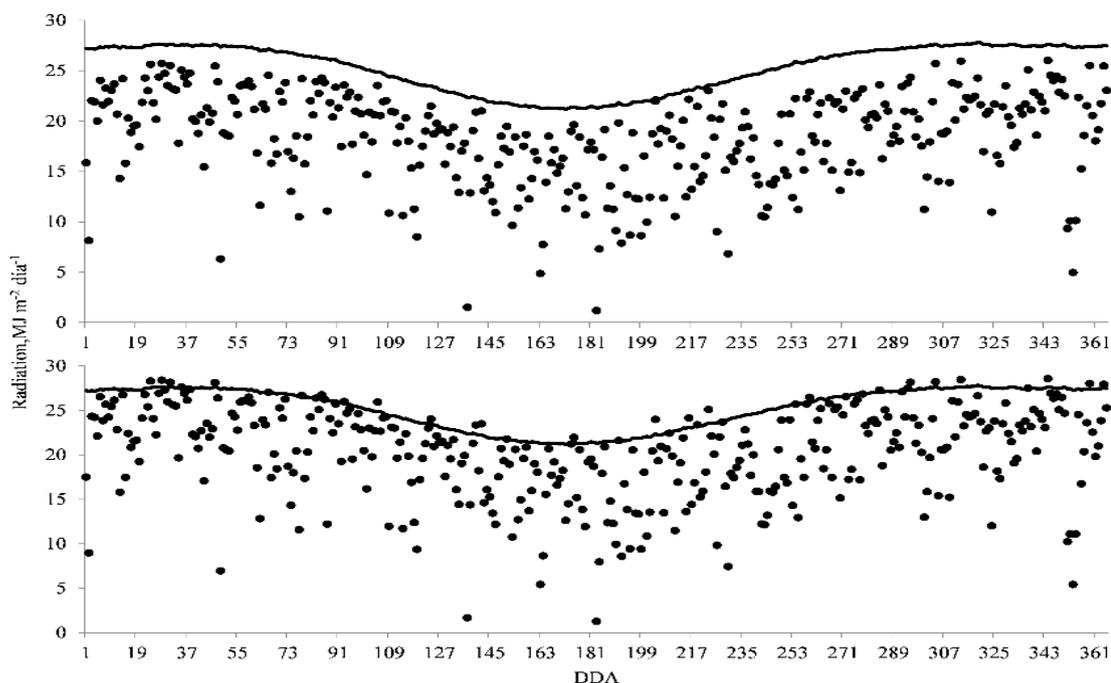
Clima	Município	T(%)	U(%)	Rs(%)	V(%)
Semiárido	IT	23,50	18,21	46,57	11,72
	PT	48,37	15,17	29,37	7,09
Equatorial	BA	44,91	22,05	31,38	1,65
	BL	13,00	51,21	32,02	3,78
Subtropical	BG	34,39	10,72	45,00	9,88
	SJ	29,87	15,24	49,46	5,43
	UA	32,86	24,12	31,92	11,10
Tropical	BS	56,95	2,31	26,57	14,18
	CO	54,78	0,30	35,18	9,74
Tropical de altitude	BH	48,85	8,77	30,16	12,21
	FR	57,05	1,22	32,62	9,10
Tropical Litorâneo	AC	39,87	32,41	25,76	1,96
	RE	10,38	18,12	58,83	12,66

Os valores apresentados na Tabela 5, indicam que T foi a variável climática mais sensível para oito municípios estudados. A segunda variável que obteve maior sensibilidade foi Rs, tendo maior contribuição para cinco municípios estudados. Observa-se que RE foi o

município em que a Rs teve maior contribuição, revelando a importância de uma análise da qualidade dos dados.

Na Figura 2 são apresentados os valores de Rs antes e após o ajuste, a partir do programa QA/QC, para o município IT para o ano de 2012.

Figura 2. Valores medidos de Rs antes e após o ajuste delimitados pela curva da radiação solar esperada em dia claro, para o ano de 2013 para o município RE.

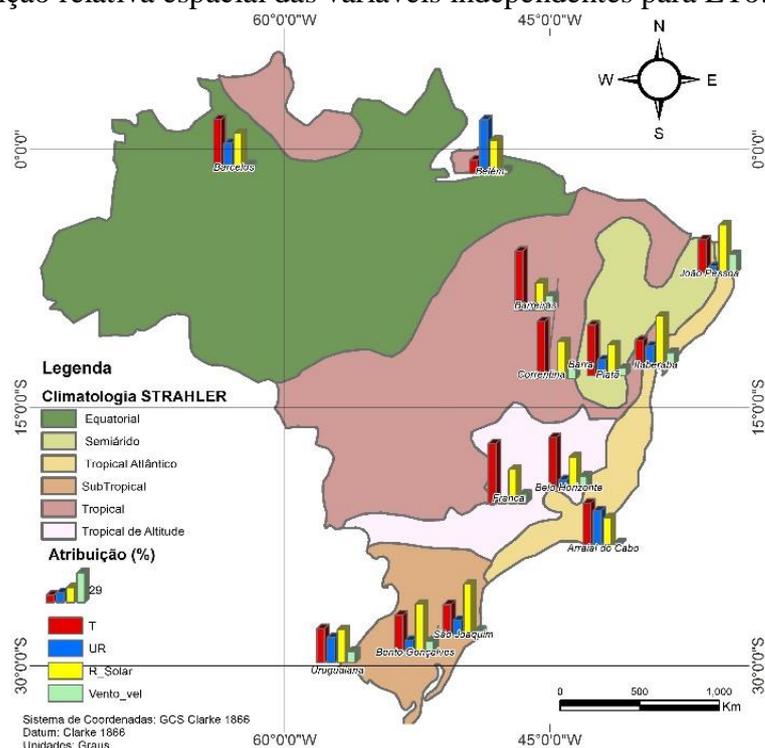


Os ajustes realizados para Rs foram de 1,29 para dia do ano (DDA) 1 a 120; 1,12 para DDA 121 a 180; 1,09 para DDA 181 a 240; 1,15 para DDA 241 a 300 e 1,29 para DDA 301 a 365. Estes ajustes, realizados na prática, funcionam como fator de calibração do piranômetro (BORGES et al., 2010).

A variável U (Tabela 5), teve maior contribuição para o município BL e, para todos os outros municípios, teve baixos valores de contribuição. Observa-se que, dentre as variáveis, a velocidade do vento (V) teve a menor contribuição com a ETO

em todas as regiões. Resultados semelhantes foram encontrados por Alencar et al. (2012), para o município de Uberaba/MG, em que a velocidade do vento foi a variável que apresentou menor sensibilidade.

Analisando visualmente a distribuição espacial das variáveis independentes, a Figura 3 evidencia que municípios próximos a Costa Atlântica tendem a receber maior contribuição pela variável radiação solar, exceto para o município AC.

Figura 3. Contribuição relativa espacial das variáveis independentes para ETo.

Municípios que se encontram no interior do país tendem a receber maior contribuição pela variável temperatura do ar, exceto o município BL, a única que recebeu maior contribuição pela umidade relativa.

6 CONCLUSÕES

Entre os métodos estudados, o de Turc foi o que apresentou melhores

resultados para todos os climas do Brasil, exceto para o clima Tropical litorâneo.

O método de Makkink foi o que apresentou melhor resultado para o clima Tropical litorâneo.

A análise de sensibilidade revelou que a temperatura do ar e a radiação global são as variáveis mais importantes do método Penman-Monteith, exceto para o município BL, em que a variável umidade relativa do ar foi a mais importante.

7 REFERÊNCIAS

ALENCAR, L. P.; SEDIYAMA, G. C.; WANDERLEY, H. S.; ALMEIDA, T. S.; DELGADO, R. C.; VIEIRA, G. H. S. Evolução temporal da evapotranspiração de referência e sua sensibilidade aos principais elementos climáticos na cidade de Uberaba - MG. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 7, n. 1, p. 159-166, 2012.

ALLEN, R. G. **RefET - Reference Evapotranspiration Calculator**. Moscow: University of Idaho, 2012.

ALLEN, R. G.; CLEMMENS, A. J.; BURT, C. M.; SOLOMON, K.; O'HALLORAN, T. Prediction accuracy for project wide evapotranspiration using crop coefficients and reference

evapotranspiration. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 131, n.1, p. 24-36, 2005.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).

ALLEN, R. G.; PRUITT W. O.; WRIGHT, J. L.; HOWELL T. A.; VENTURA, F.; SNYDER, R.; ITENFISU, D.; STEDUTO, P.; BERENGENA J.; BESELGA, J.; SMITH, M.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; PERRIER, A.; ALVES, I.; WALTER, I.; ELLIOTT, R. A recommendation on standardized surface resistance for hourly calculation of reference ETo by the FAO56 Penman–Monteith method. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 81, n. 1-2, p. 1-22, 2006.

BEZERRA, J. M.; MOUA, G. B. A.; SILVA, E. F. F.; LOPES, P. M. O.; SILVA, B. B. Estimativa de evapotranspiração de referência diária para Mossoró. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 27, n. 3, p. 211-220, 2014.

BLANEY, H. F.; CRIDDLE, W. D. **Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data**. Washington: Soil Conservation Service, 1950. (Technical Publication, 96).

BORGES JÚNIOR, J. C. F.; ANJOS, R. J.; SILVA, T. J. A.; LIMA, J. R. S.; ANDRADE, C. L. T. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para a microrregião de Garanhuns. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 4, p. 380-390, 2012.

BORGES, V. P.; OLIVEIRA, A. S.; COELHO FILHO, M. A.; SILVA, T. S. M.; PAMPONET, B. M. Avaliação de modelos de estimativa da radiação solar incidente em Cruz das Almas, Bahia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 1, p. 74-80, 2010.

BRAGANÇA, R.; REIS, E. F.; GARCIA, G. O.; PEZZOPANE, J. E. M. Estudo comparativo da estimativa da Evapotranspiração de Referência no período chuvoso para três localidades estado do Espírito Santo. **Revista Idesia**, Arica, v. 28, n. 2, p. 21-29, 2010.

CAVALCANTE JUNIOR, E. G.; OLIVEIRA, A. D.; ALMEIDA, B. M.; ESPÍNOLA SOBRINHO, J. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para as condições do semiárido Nordeste. **Ciências Agrárias**, Londrina, v. 32, n. 1, p. 1699, 2011.

CHAUHAN, S.; SHRIVASTAVA, R. K. Performance evaluation of reference evapotranspiration estimation using climate based methods and artificial neural networks. **Water Resources Management**, Amsterdam, v. 23, n. 5, p. 825-837, 2009.

CLARK, G. A.; ALBREGTS, E. E.; STANLEY, C. D.; SMAJSTRLA, A. G.; ZAZUETA, F. S. Water requirements and crop coefficients of drip-irrigated strawberry plants. **Transaction of ASAE**, Saint Joseph, v. 39, n. 3, p. 905-912, 1996.

COSTA, M. S.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C. Comportamento dos diferentes métodos de determinação da evapotranspiração de referência nas cinco regiões Brasileiras. **Revista Brasileira de agricultura irrigada**, Fortaleza, v. 9, n. 5, p. 310-319, 2015.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W. O. **Guidelines for predicting crop water requirements**, Roma: FAO, 1984. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 24).

FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A. B.; PAZ, R. L.; AMORIM, A. O. **Evapotranspiração: uma revisão sobre os métodos empíricos**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2010. (Documentos, 263).

GOCIC, M.; TRAJKOVIC, S. Software for estimating reference evapotranspiration using limited weather data. **Computers and Electronics in Agriculture**, Gainesville, v. 71, n. 2, p. 158-162, 2010.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied Engineering in Agriculture**, Raleigh, v. 1, n. 2, p. 96-99, 1985.

JENSEN, M. E.; BURMAN, R. D.; ALLEN, R. G. **Evapotranspiration and irrigation water requirements**. New York: ASCE, 1990.

MAKKINK, G. F. Ekzamento de la formulo de Penman. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, Droeendaalsesteeg, v. 5, n. 1, p. 290-305, 1957.

OLIVEIRA, G. M.; LEITÃO, M. M. V. B. R.; BISPO, R. C.; SANTOS, I. M. S.; ALMEIDA, A. C. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência na região norte da Bahia. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 4, n. 2, p. 104-109, 2010.

PILAU, F. G.; BATTISTI, R.; SOMAVILLA, L.; RIGHI, E. Z. Desempenho de métodos de estimativa de evapotranspiração de referência nas localidades de Frederico Westphalen e Palmeira das Missões, RS, **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 42, n. 2, p. 283-290, 2012.

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the assessment of surface heat flux and evapotranspiration using large scale parameters. **Monthly Weather Review**, Washington, v. 100, n. 1, p. 81-92, 1972.

RAZIEI, T.; PEREIRA, L. S. Estimation of ETo with Hargreaves-Samani and FAO-PM temperature methods for a wide range of climates in Iran. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 121, n. 1, p. 1-18, 2013.

SILVA, V. J.; CARVALHO, H. P.; DA SILVA, C. R.; CAMARGO, R.; TEODORO, R. E. F. Desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 27, n. 1, p. 95-101, 2011.

STRAHLER, A. N.; STRAHLER, A. H. **Geografia física**. Barcelona: Libergraf, 1989.

- TABARI, H.; HOSSEINZADEH, T. P. Local calibration of the Hargreaves and Priestley–Taylor equations for estimating reference evapotranspiration in arid and cold climates of Iran based on the Penman-Monteith model. **Journal of Hydrologic Engineering (ASCE)**, Reston, v. 16, n. 1, p. 1-9, 2011.
- TAGLIAFERRE, C.; SILVA, J. P.; DE PAULA, A.; GUIMARAES, D. U. Estimativa da evapotranspiração de referência para três localidades do estado da Bahia. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 27, n. 3, p. 21-220, 2012.
- TEMESGEN, B.; ECHING, S.; DAVIDOFF, B.; FRAME, K. Comparison of some reference evapotranspiration equations for California. **Journal Irrigation Drainage Engineering ASCE**, Reston, v. 131, n. 1, p. 73-84, 2005.
- TODOROVIC, M.; KARIC, B.; PEREIRA, L, S. Reference evapotranspiration estimate with limited weather data across a range of Mediterranean climates. **Journal of Hydrology**, Storrs, v. 481, n. 25, p. 166-176, 2013.
- TRAJKOVIC, S. Hargreaves versus Penman–Monteith under Humid Condition. **Journal Irrigation Drainage Engineering ASCE**, Reston, v. 133, n. 1, p. 38-42, 2007.
- TURC, L. Evaluation des besoins en eau d’irrigation, l’evapotranspiration potentielle. **Annals of Agronomy**, Paris, v. 12, n. 1, p. 13-49, 1961.
- YE, X.; LI, X.; LIU, J.; XU, C.; ZHANG, Q. Variation of reference evapotranspiration and its contributing climatic factors in the Poyang Lake catchment, China. **Hydrological Processes**, Berlin, v. 28, n. 25, p. 6151-6162, 2014.