

**MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA NA ÁREA DE INFLUÊNCIA DOS CANAIS DA TRANSPOSIÇÃO DO RIO SÃO FRANCISCO**Andre Keiti Ide¹ & Cícero Lopes da Silva²1 – Agrônomo, Mestre em Agronomia pela UnB. Email: andrekeiti@hotmail.com2 – Engenheiro Agrícola, Doutor, Professor Associado da Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária/UnB. Email: cicero@unb.br**Palavras-chaves:**agrometeorologia
Penman-Monteith-FAO
semiárido brasileiro**RESUMO**

Dentre as equações de estimativa da evapotranspiração de referência, a de Penman-Monteith-FAO é considerada a mais precisa. Porém, necessita de grande número de variáveis meteorológicas, tornando essa estimativa onerosa pelo elevado custo das estações agrometeorológicas. Por outro lado, existem outros métodos que demandam menos dados, representando uma maneira menos onerosa de se estimar a evapotranspiração de referência, condição essa que deve ser observada quando os usuários de sistemas de irrigação são pequenos produtores. O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho dos métodos de Hargreaves-Samani, Thornthwaite-48, Thornthwaite modificado, Camargo-71, Blaney-Criddle, Jensen-Haise, Radiação FAO 24, Aerodinâmico e Energético, na estimativa da evapotranspiração de referência na área de influência da Transposição das águas do rio São Francisco. Foram utilizados dados meteorológicos do período de 1995 a 2014. O método de Hargreaves-Samani obteve desempenho classificado como “ótimo”, sendo este desempenho consistente ao longo da área estudada. Por necessitar somente de dados de temperatura do ar, sugere-se esse método como alternativa de uso aos pequenos produtores na estimativa da evapotranspiração de referência na região estudada.

Keywords:agrometeorology
Brazilian semiarid
Penman-Monteith-FAO**METHODS FOR ESTIMATING REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION INFLUENCE OF THE SÃO FRANCISCO RIVER TRANSPOSITION****ABSTRACT**

Among the methods available for measuring reference evapotranspiration, the Penman-Monteith-FAO is considered the most accurate. However, it is an expensive method to be used because many meteorological variables are required and agrometeorological stations are costly. On the other hand, there are other methods available that require less data and, consequently, offer a cheaper technique to obtain reference evapotranspiration data, an important condition for small farmers who use irrigation systems. The objective of this study was to evaluate the performance of the following methods: Hargreaves-Samani, Thornthwaite-48, modified Thornthwaite, Camargo-71, Blaney-Criddle, Jensen-Haise, Radiation FAO 24, Aerodynamic and Energy balance, in order to estimate reference evapotranspiration in the area of influence of the São Francisco River Transposition. The meteorological data covered the period from 1995 to 2014. The performance of the Hargreaves-Samani method was rated as “great” and was consistent throughout the studied area. Because this method requires only air temperature data, it can be recommended as an alternative for small farmers to estimate reference evapotranspiration in the studied area.

INTRODUÇÃO

Dentre as iniciativas governamentais para suprir o acentuado déficit hídrico da região Nordeste do Brasil, encontram-se em fase de construção dois sistemas de canais que conduzirão água do rio São Francisco até algumas bacias hidrográficas dos Estados de Pernambuco, Ceará, Paraíba e Rio Grande do Norte. A água aduzida por estes sistemas passará por comunidades rurais tradicionais que praticam agricultura familiar e que poderão utilizar a água em pequenos projetos de irrigação.

No manejo e planejamento da irrigação, a equação de Penman-Monteith parametrizada pela FAO é considerada o método padrão para estimar a evapotranspiração de referência (ET_o) e para validar outras equações (Pereira et al., 2015). No entanto, o custo para estimar a ET_o por meio da equação de Penman-Monteith-FAO é elevado devido ao número de elementos meteorológicos inerentes ao método (Allen et al., 1998), exigindo estações meteorológicas com maior número de sensores específicos e onerosos, inviabilizando a utilização desse modelo para planejamento e manejo da irrigação por pequenos irrigantes. Em situação de indisponibilidade de todos os elementos meteorológicos para a estimativa da ET_o por meio da equação de Penman-Monteith-FAO, Allen et al. (1998) recomendam o uso do método de Hargreaves-Samani, ou ainda a estimativa dos elementos faltantes para aplicação no método conhecido como Penman-Monteith com dados faltantes. No entanto, o desempenho destes métodos alternativos é influenciado pelas condições climáticas, podendo haver, em uma determinada região, outros métodos que exigem poucos elementos meteorológicos e que apresentam bom desempenho.

Desta forma, é de grande importância realizar pesquisas para validação de métodos de estimativa da ET_o que sejam mais simples e demandem menor número de elementos meteorológicos, implicando dessa forma, em uma maneira menos onerosa de se obter a ET_o. Considerando

a facilidade, simplicidade, consistências de informações e menor custo para estimar a ET_o nas áreas próximas aos eixos de transposição do Rio São Francisco, objetivou-se, neste trabalho, avaliar o desempenho dos seguintes métodos: Blaney-Criddle, Thornthwaite-48, Thornthwaite modificado, Camargo-71, Hargreaves-Samani, Radiação FAO-24, Jensen-Haise, Aerodinâmico e Energético, para a estimativa da evapotranspiração de referência em escala mensal, para uso futuro em trinta e quatro (34) comunidades rurais na região Nordeste, tendo como base de comparação o método padrão Penman-Monteith-FAO.

MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo está localizada no Semiárido Brasileiro, delimitada pelas latitudes 6° 55' 0" e 9° 0' 0" S e longitudes 37° 0' 0" e 39° 35' 0" W, abrangendo parte dos Estados de Alagoas, Bahia, Ceará, Paraíba, Pernambuco e Rio Grande do Norte.

Nessa área existem comunidades rurais localizadas nas proximidades de dois sistemas de canais da Transposição do Rio São Francisco (Figura 1). Nas comunidades estão previstas a implantação de sistemas de irrigação localizada, os quais totalizam uma área irrigada de 1.688 ha, distribuídos em vilas produtivas rurais, projetos de assentamento rural para reforma agrária e territórios de etnias indígenas.

Os elementos meteorológicos necessários ao cálculo da evapotranspiração de referência foram obtidos de 41 estações meteorológicas convencionais do banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa do Instituto Nacional de Meteorologia – BDMEP/INMET (Tabela 1). Foram obtidas as médias mensais: das temperaturas máximas e mínimas do ar, bem como das médias compensadas, da velocidade do vento, da umidade relativa do ar e insolação, entre o período de janeiro de 1995 a dezembro de 2014.

As séries históricas foram analisadas quanto a sua consistência e as poucas falhas existentes foram preenchidas utilizando o método da

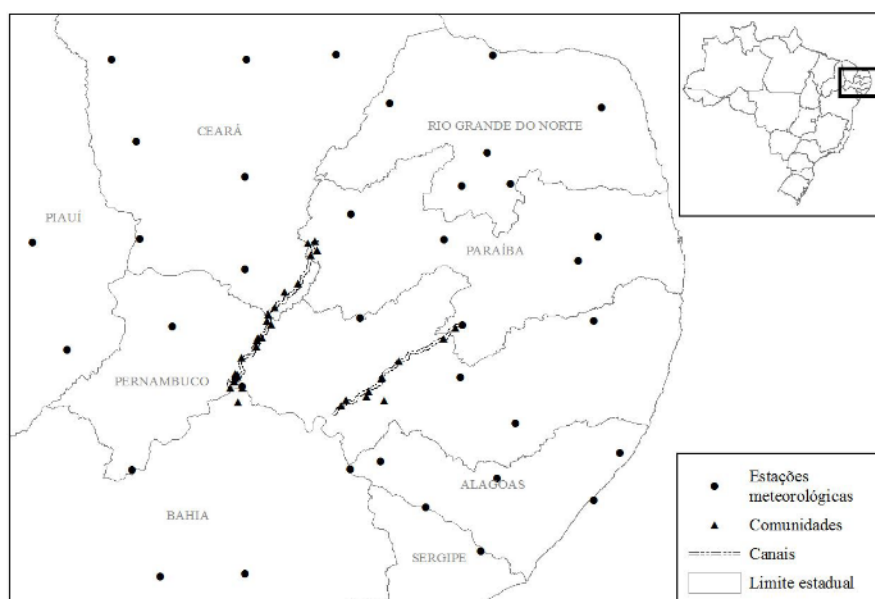


Figura 1. Localização da área de estudo, das comunidades rurais, das estações meteorológicas e dos canais do eixo Norte e do eixo Leste da transposição do Rio São Francisco.

Tabela 1. Estações meteorológicas convencionais do INMET localizadas na área de estudo e no seu entorno, utilizadas para espacialização das médias mensais históricas (1995-2014) de temperatura do ar máxima, mínima e média compensada, velocidade do vento, umidade relativa do ar e insolação

Nome	Código	Lat	Long	Nome	Código	Lat	Long
Água Branca	82989	9°17'	37°54'	Monteiro	82792	7°53'	37°4'
Apodí	82590	5°37'	37°49'	Morada Nova	82588	5°7'	38°22'
Aracaju	83096	10°57'	37°3'	Morro do Chapéu	83184	11°13'	41°13'
Arcoverde	82890	8°25'	37°5'	Ouricuri	82753	7°54'	40°3'
Areia	82696	6°58'	35°41'	Palmeira dos Índios	82992	9°27'	36°42'
Barbalha	82784	7°19'	39°18'	Pão de Açúcar	82990	9°45'	37°26'
Cabrobó	82886	8°31'	39°20'	Patos	82791	7°1'	37°16'
Campina Grande	82795	7°13'	35°53'	Paulistana	82882	8°8'	41°8'
Campos Sales	82777	7°0'	40°23'	Paulo Afonso	82986	9°22'	38°13'
Ceará Mirim	82596	5°39'	35°39'	Petrolina	82983	9°22'	40°28'
Cipó	83192	11°5'	38°31'	Picos	82780	7°2'	41°29'
Crateús	82583	5°10'	40°40'	Porto de Pedras	82996	9°11'	35°26'
Cruzeta	82693	6°26'	36°35'	Propriá	83097	10°12'	36°52'
Florânia	82691	6°7'	36°49'	Quixeramobim	82586	5°10'	39°17'
Garanhuns	82893	8°53'	36°31'	São Gonçalo	82689	6°45'	38°13'
Iguatu	82686	6°22'	39°18'	Senhor do Bonfim	83088	10°28'	40°11'
Itabaianinha	83195	11°7'	37°49'	Seridó Caicó	82690	6°28'	37°5'
Jacobina	83186	11°11'	40°28'	Surubim	82797	7°50'	35°43'
Macau	82594	5°7'	36°46'	Tauá	82683	6°0'	40°25'
Maceió	82994	9°40'	35°42'	Triunfo	82789	7°49'	38°7'
Monte Santo	83090	10°26'	39°18'				

Lat=Latitude sul no sistema de coordenadas geográficas SIRGAS 2000. Long= Longitude oeste no sistema de coordenadas geográficas SIRGAS 2000

ponderação regional (Arai et al., 2012). As médias mensais históricas de seis variáveis meteorológicas foram espacializadas por meio do método geoestatístico da krigagem pontual ordinária (Wagner et al., 2012) com auxílio do *software* Arcinfo 10.1 (ESRI). A partir da espacialização foi possível obter a média mensal de cada variável, em cada comunidade estudada. As interpolações foram avaliadas por meio do procedimento de validação cruzada. Para análise dos resultados, foram calculados o erro médio absoluto (EMA), em percentagem, e a raiz do erro quadrático médio (REQM), conforme equações 1 e 2, respectivamente (Cunha et al., 2013).

$$EEMA (\%) = \left(\sum_{i=1}^n \frac{|E_i - M_i|}{M_i} \times 100 \right) \times \frac{1}{n} \quad (1)$$

$$EEMA (\%) = \left(\sum_{i=1}^n \frac{|E_i - M_i|}{M_i} \times 100 \right) \times \frac{1}{n} \quad (2)$$

em que,

E_i = valores estimados;

M_i = valores medidos; e

n = número de estações meteorológicas utilizadas.

A evapotranspiração de referência em cada comunidade foi calculada por 10 métodos, com diferentes exigências de dados meteorológicos, sendo eles: (i) métodos empíricos baseados na temperatura do ar: Hargreaves-Samani, equação 3 (Maeda, 2011); Thornthwaite-48, equação 4 (Melo & Fernandes, 2012); Thornthwaite modificado, equação 5 (Sentelhas et al., 2010); Camargo-71, equação 6 (Borges Júnior et al., 2012); Blaney-Criddle, equação 7 (Tabari et al., 2013); (ii) métodos empíricos baseados na radiação solar: Jensen-Haise, equação 8 (Xystrakis & Matzarakis, 2011); Radiação FAO 24, equação 9 (Azhar & Perera, 2011); (iii) métodos com embasamento físico: Aerodinâmico, equação 10 (Chow et al., 1994); Energético, equação 11 (Chow et al., 1994); Penman-Monteith-FAO, equação 12 (Pereira et al., 2015).

$$ET_o = 0,0023 \times Ra \times (T_{\max} - T_{\min})^{0,5} \times (T + 17,8) \quad (3)$$

$$ET_o = \frac{ET_p}{30} \times \frac{N}{12} \quad (4)$$

$$T_{ef} = 0,5 \times k \times (3 \times T_{\max} - T_{\min}) \quad (5)$$

$$ET_o = Ra \times T_m \times K \times D \quad (6)$$

$$ET_o = a + b \times [p \times (0,46 \times T_m + 8)] \quad (7)$$

$$ET_o = R_s \times (0,025 \times T_m + 0,078) \quad (8)$$

$$ET_o = c \times (W \times R_s) \quad (9)$$

$$ET_o = \frac{259,2 \times \rho_a \times u_2 \times (e_s - e_a)}{P_{ar}} \quad (10)$$

$$ET_o = \frac{R_n - G}{\lambda} \quad (11)$$

$$ET_o = \frac{0,480 \times \Delta \times (R_n - G) + \gamma \times \frac{900}{T + 273} \times u_2 \times (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \times (1 + 0,34 \times u_2)} \quad (12)$$

em que,

R_a = radiação solar extraterrestre recebida em uma superfície horizontal, em mm d^{-1} ;

T_{\max} = temperatura máxima diária, em $^{\circ}\text{C}$;

T_{\min} = temperatura mínima diária, em $^{\circ}\text{C}$;

T = temperatura média diária, em $^{\circ}\text{C}$;

ET_p = evapotranspiração padronizada para um mês de 30 dias, em que cada dia possui 12 horas de fotoperíodo;

N = fotoperíodo médio do mês, em horas;

T_{ef} = temperatura efetiva, em $^{\circ}\text{C}$;

T_m = temperatura média do mês, em $^{\circ}\text{C}$;

K = fator de ajuste dependente da temperatura média anual;

D = número de dias do período.

a e b = coeficientes de ajuste dependentes de estimativas de umidade relativa mínima, insolação e velocidade do vento, adimensionais;

p = percentagem de horas diurnas anuais durante o período considerado;

R_s = radiação solar de ondas curtas recebida pela superfície terrestre em um plano horizontal, em mm d^{-1} ;

c = fator de ajuste adimensional dependente das condições médias de umidade relativa do ar e velocidade do vento;

W = índice de ponderação adimensional dependente da temperatura e altitude;

ρ_a = massa específica do ar, em Kg m⁻³;

u_2 = velocidade do vento a 2,0 m de altura, em m s⁻¹;

e_s = pressão de saturação do vapor, em kPa;

e_a = pressão de vapor atual, em kPa;

p_{ar} = pressão atmosférica, em kPa;

Rn = saldo de radiação, em MJ m⁻² d⁻¹;

G = fluxo de calor no solo, em MJ m⁻² d⁻¹;

γ = constante psicrométrica, em kPa °C⁻¹;e

Δ = inclinação da curva de pressão de vapor, em kPa °C⁻¹.

O desempenho dos métodos foi avaliado por meio de análise de regressão e coeficientes de correlação (r) entre a ETo calculada pelo método de Penman-Monteith-FAO e os outros métodos, índice de concordância de Willmott (d) de acordo com a equação 13 e índice de confiança (c) de acordo com a equação 14 (Melo & Fernandes, 2012). O índice de Willmott varia de 0 a 1 e estabelece uma concordância entre valores observados e estimados. O índice de confiança (c) também varia de 0 a 1, de modo que para uma condição ideal r=d=c=1.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E'_i| + |M'_i|)^2} \quad (13)$$

em que,

E_i = valores estimados;

M_i = eventos medidos;

\bar{M} = média dos eventos medidos;

E'_i = diferença entre os valores estimados e a média dos eventos medidos; e

M'_i = diferença entre os valores medidos e a média dos eventos medidos.

$$c = rXd \quad (14)$$

em que,

c = índice de confiança;

r = coeficiente de correlação; e

d = índice de Willmott calculado pela equação 13.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As médias anuais das variáveis utilizadas no cálculo da ETo, em cada comunidade, obtidas por meio da espacialização dos dados oriundos das 41 estações meteorológicas, são apresentadas na Tabela 2. Os índices estatísticos de avaliação das interpolações são apresentados na Tabela 3.

Pelo método padrão de Penman-Monteith-FAO os valores de ETo variaram entre 83 a 204 mm mês⁻¹. Sazonalmente, os maiores valores de ETo foram constatados para o período de setembro a dezembro, o qual corresponde ao período que apresenta os maiores valores de insolação e menores valores de umidade relativa do ar, associados à ocorrência de temperaturas elevadas. Os menores valores de ETo foram constatados para o período de abril a julho, o qual apresenta os menores valores de insolação e maiores valores de umidade relativa do ar.

Considerando as 408 (12 meses x 34 comunidades) observações, compostas pelas médias mensais da ETo calculadas nas 34 comunidades rurais, realizou-se a análise de regressão linear, tendo a ETo calculada pelo método padrão Penman-Monteith-FAO como variável independente e a ETo calculada pelos demais métodos como variável dependente (Figura 2).

Pode-se constatar que os métodos baseados na temperatura do ar: Thornthwaite-48, Thornthwaite modificado e Camargo-71 apresentaram tendência consistente de subestimar os valores da ETo na região, já que as retas representativas das equações de regressão ficaram inteiramente abaixo das retas 1:1. Os métodos baseados na radiação solar: Jensen-Haise e Radiação FAO 24 e o método Aerodinâmico, apresentaram tendência consistente de sobrestimar a ETo, nestes casos, as retas representativas das equações de regressão ficaram acima das retas 1:1. A Tabela 4 apresenta os valores dos coeficientes angular (a) e linear (b) das equações de regressão, assim como os índices estatísticos utilizados na avaliação de desempenhos dos métodos estudados. A análise de variância e teste F aplicados à análise de regressão indicaram significância a 1% de probabilidade para todas as equações ajustadas.

Tabela 2. Médias anuais das variáveis utilizadas no cálculo da ETo, em cada comunidade, obtidas por meio da espacialização dos dados oriundos das estações meteorológicas convencionais do INMET localizadas na área de estudo e no seu entorno

Comunidade	T (°C)	Tmax (°C)	Tmin (°C)	U (m s ⁻¹)	UR (%)	N (h mês ⁻¹)
Captação	26,6	32,1	22,0	3,2	60,8	235,0
B. dos Grandes	26,0	31,8	21,4	3,2	62,0	235,3
Negreiros	25,6	31,5	21,0	3,2	62,8	236,8
Uri	25,5	31,4	20,9	3,1	62,9	237,3
Q. Grande	25,5	31,4	20,8	3,1	63,0	237,7
Malícia	25,2	31,3	20,5	3,1	63,6	240,6
Pilões	25,1	31,2	20,4	3,1	63,7	240,6
Retiro	25,2	31,3	20,4	3,1	63,8	241,5
Ipê	25,1	31,2	20,3	3,1	64,0	242,7
Vassouras	25,0	31,2	20,1	3,1	64,3	246,2
Descanso	24,9	31,1	20,0	3,1	64,4	248,8
Jurema	25,4	31,7	20,3	3,1	64,4	253,6
Irapuá	25,5	31,9	20,3	3,1	64,4	254,6
Quixeramobim	25,7	32,1	20,6	3,0	64,5	255,4
Bartolomeu	25,8	32,2	20,6	3,0	64,4	256,1
Lafaete	24,2	30,6	18,8	3,4	69,5	235,6
Salão	23,7	30,1	18,6	3,4	69,9	234,8
Serra Branca	23,0	29,1	18,4	3,4	69,6	230,5
Pirambeba	23,0	29,1	18,4	3,4	69,6	230,3
Serra Negra	23,3	29,3	18,8	3,4	69,4	228,9
Lagedo	23,8	29,8	19,4	3,3	68,3	229,1
C. Angicos	24,0	29,9	19,6	3,3	68,2	229,2
Monte Alegre	25,4	31,3	20,7	3,1	63,2	238,2
Riacho dos Bois	26,4	32,0	21,8	3,2	61,3	235,0
Barro Vermelho	26,4	32,0	21,9	3,2	61,2	235,0
Tucutú Jibóia	26,5	32,0	21,9	3,2	61,1	235,0
Porteiras	22,9	29,1	18,1	3,4	69,6	233,1
Eloita Pereira	26,4	32,0	21,8	3,2	61,3	235,0
Truká	26,5	32,0	22,0	3,3	61,2	235,0
Tumbalalá	26,5	32,0	22,0	3,3	61,2	235,2
Kambiwá	23,3	29,3	18,7	3,4	70,9	227,1
Pipipã	23,4	29,4	18,9	3,4	69,5	228,5
Santa Fé	26,4	32,0	21,8	3,2	61,3	235,0
Poço do Angico	26,4	32,0	21,8	3,2	61,3	235,1

T = Temperatura do ar média compensada. Tmax = Temperatura do ar máxima. Tmin = Temperatura do ar mínima. U = Velocidade do vento. UR = Umidade relativa do ar. N = insolação.

Tabela 3. Índices estatísticos de avaliação das interpolações realizadas com os dados oriundos de 41 estações meteorológicas localizadas na área de estudo e no seu entorno

Índice estatístico	Meses											
	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
Temperatura do ar média compensada												
EMA (%)	4,2	4,3	4,2	4,5	4,9	5,5	5,8	5,9	5,6	5,1	4,6	4,3
REQM (°C)	1,53	1,52	1,50	1,53	1,54	1,59	1,63	1,70	1,72	1,67	1,60	1,56
r	0,46	0,40	0,37	0,39	0,56	0,68	0,75	0,77	0,75	0,71	0,65	0,59
Temperatura do ar máxima												
EMA (%)	4,2	4,2	4,0	4,1	4,6	5,2	5,4	5,3	4,8	4,5	4,4	4,3
REQM (°C)	1,76	1,79	1,74	1,72	1,76	1,85	1,92	1,96	1,95	1,88	1,83	1,81
r	0,41	0,31	0,27	0,33	0,59	0,73	0,79	0,81	0,79	0,74	0,68	0,59
Temperatura do ar mínima												
EMA (%)	4,8	4,7	4,5	4,4	4,6	5,1	5,5	5,6	5,9	5,6	5,3	5,1
REQM (°C)	1,38	1,35	1,30	1,26	1,23	1,24	1,28	1,31	1,44	1,49	1,47	1,42
r	0,55	0,52	0,52	0,57	0,64	0,69	0,71	0,75	0,71	0,65	0,61	0,59
Velocidade do vento												
EMA (%)	19,9	19,7	20,3	20,6	23,6	24,7	22,3	21,2	21,2	20,3	19,8	20,8
REQM (m s ⁻¹)	0,71	0,69	0,68	0,67	0,79	0,95	0,94	0,98	1,02	0,93	0,84	0,81
r	0,41	0,39	0,34	0,27	0,11	0,15	0,28	0,33	0,10	0,10	0,37	0,39
Umidade Relativa do ar												
EMA (%)	6,6	6,0	6,5	6,1	5,9	6,1	6,5	7,5	7,3	7,9	8,1	7,8
REQM (%)	5,27	5,08	5,59	5,57	5,48	5,67	5,78	6,28	5,74	5,84	5,79	5,70
r	0,61	0,56	0,47	0,43	0,65	0,82	0,88	0,89	0,90	0,87	0,82	0,74
Insolação												
EMA (%)	6,5	6,3	6,6	9,2	9,0	11,0	11,2	10,4	10,7	7,4	5,9	6,3
REQM (h)	18,3	16,2	18,6	23,0	21,6	23,0	27,7	28,4	32,3	25,8	19,7	20,5
r	0,52	0,58	0,54	0,27	0,66	0,81	0,79	0,81	0,65	0,61	0,73	0,55

T = Temperatura do ar média compensada. Tmax = Temperatura do ar máxima. Tmin = Temperatura do ar mínima. U = Velocidade do vento. UR = Umidade relativa do ar. N = insolação.

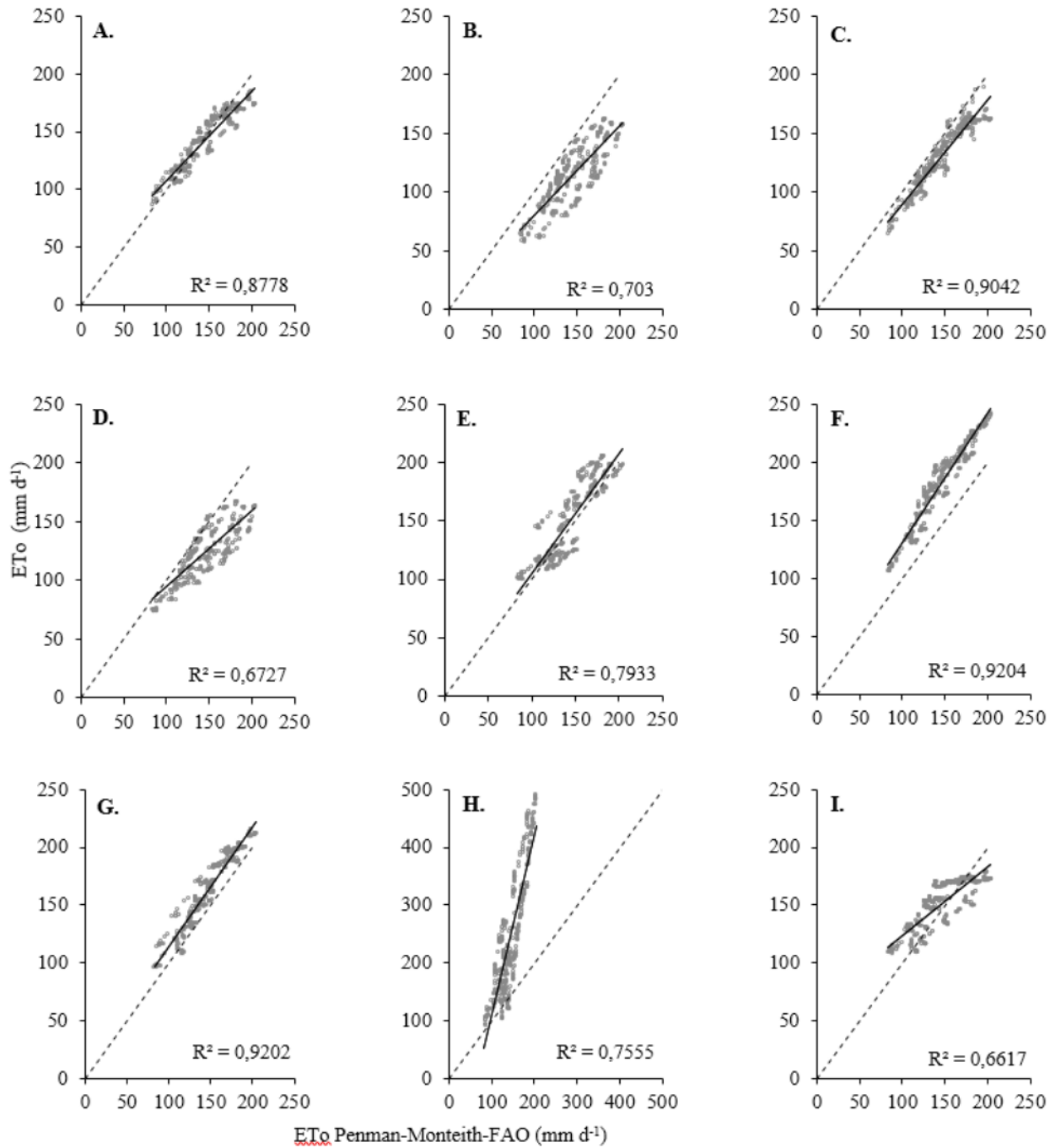


Figura 2. Comparação da evapotranspiração de referência média mensal (1995-2014) em mm mês⁻¹ entre o método Penman-Monteith-FAO e os métodos avaliados, evidenciando a reta gerada por meio de regressão linear e a linha tracejada 1:1. Métodos avaliados: Hargreaves-Samani (A); Thornthwaite-48 (B); Thornthwaite modificado por Camargo (C); Camargo-71(D); Blaney-Criddle (E); Jensen-Haise (F); Radiação FAO-24 (G); Aerodinâmico (H) e Energético (I).

Tabela 4. Índices estatísticos e classificação do desempenho para os métodos de estimativa da evapotranspiração de referência avaliados

Método	a	b	p-valor	r	d	c	Desempenho
Hargreaves-Samani	0,77	30,51	0,000**	0,94	0,95	0,89	Ótimo
Radiação FAO 24	1,04	11,42	0,000**	0,96	0,91	0,87	Ótimo
Thornthwaite modificado	0,88	1,92	0,000**	0,95	0,90	0,86	Ótimo
Blaney-Criddele	1,02	3,31	0,000**	0,89	0,93	0,83	Muito Bom
Jensen-Haise	1,11	19,89	0,000**	0,96	0,74	0,71	Bom
Energético	0,59	64,79	0,000**	0,81	0,87	0,71	Bom
Camargo	0,64	30,68	0,000**	0,82	0,76	0,63	Mediano
Thornthwaite-48	0,76	4,63	0,000**	0,84	0,72	0,60	Sofrível
Aerodinâmico	3,17	-209,02	0,000**	0,87	0,39	0,34	Péssimo

**significativo a 1% de probabilidade pelo teste F.

A tendência de subestimativa da ETo mensal pelos métodos de Thornthwaite-48 e Camargo-71, assim como a tendência de sobrestimativa dos métodos de Jensen-Haise e Radiação FAO 24 concordam com os resultados encontrados por Melo & Fernandes (2012) para a cidade de Uberaba/MG. A subestimativa da ETo calculada pelo método de Camargo também concorda com Fernandes et al. (2012) para a cidade de Campo de Goytacazes/RJ. Segundo Camargo & Camargo (2000) o método de Thornthwaite-48 subestima a ETo em climas secos por não considerar a energia advectiva recebidas de áreas secas distantes. Observa-se que a tendência de subestimativa da ETo neste trabalho, foi minimizada quando calculada pelo método de Thornthwaite modificado, concordando com Camargo et al. (1999), segundo o qual, a temperatura efetiva utilizada neste método, em comparação com a temperatura média do ar, representa melhor o termo aerodinâmico da evapotranspiração.

Neste trabalho, os resultados encontrados condizem com os apresentados por Moura et al. (2013), os quais relatam tendência de sobrestimativa da ETo mensal estimada pelos métodos de Jensen-Haise e Radiação FAO 24 na bacia do Riacho Gameleira no estado de Pernambuco.

Sobrestimativas da ETo pelo método da Radiação FAO 24 também são relatados por Haijun et al. (2013) em clima semiárido em Beijing na China. Segundo Doorembos & Pruitt (1977) o

método da Radiação FAO 24 tende a sobrestimar a ETo em condições semiáridas. Xystrakis & Matzarakis (2011) também constataram tendência de sobrestimativa do método de Jensen-Haise para clima semiárido na Grécia. Pelos resultados encontrados neste trabalho, bem como, pelo que é relatado pelos autores acima mencionados, seria interessante que se procedesse a um ajuste no método da Radiação FAO 24, no intuito de eliminar essa tendência de sobrestimar a ETo em climas semiáridos.

O método de Hargreaves-Samani apresentou o melhor desempenho, com coeficiente de correlação (r) de 0,94 e índice de confiança (c) de 0,89, sendo classificado como “ótimo”. O bom desempenho do método de Hargreaves-Samani pode ser explicado pelo fato deste método ter sido originalmente desenvolvido para condições semiáridas, similar às da região estudada. Além disso, este método apresenta com frequência, bom desempenho na estimativa da ETo em períodos de tempo mensais, como utilizados neste trabalho, indo de encontro ao que é relatado por Bachour et al. (2013) e Moura et al. (2013). O método de Hargreaves-Samani é amplamente estudado e utilizado em todo o mundo (Maeda et al., 2011), sendo considerado por Allen et al. (1998) como uma exceção, para uma boa estimativa de ETo, dentre os métodos empíricos, devido ao seu bom desempenho em diferentes condições climáticas. Sentelhas et al. (2010) e Rojas & Sheffield (2013) também constataram

bom desempenho deste método para a cidade de Ontário no Canadá e para o estado da Louisiana nos Estados Unidos, respectivamente, indicando que o mesmo pode ser usado em diversas condições climáticas.

O método da Radiação FAO 24 apresentou o segundo maior índice de confiança com desempenho classificado como “ótimo”. O valor do coeficiente de correlação foi de 0,96, sendo superior ao do método de Hargreaves-Samani, indicando menor dispersão dos valores em torno da reta, mas devido à tendência consistente de sobrestimar a ETo, o valor do índice de concordância de Willmott (d) foi menor, 0,91. O bom resultado deste método concorda com Cavalcante Júnior et al. (2011), Borges Júnior et al. (2012) e Tagliaferre et al. (2012), os quais constataram desempenho “ótimo” do método da Radiação FAO 24 para Mossoró/RN, Garanhuns/PE e Bahia, respectivamente.

O método de Thornthwaite modificado, apesar de apresentar tendência consistente de subestimar a ETo, também apresentou desempenho classificado como “ótimo” com coeficiente de correlação (r) de 0,95 e índice de concordância (d) de 0,90. Sentelhas et al. (2010) constataram desempenho superior deste método em relação ao método de Thornthwaite-48 para Ontário no Canadá. Moura et al. (2013), também constataram resultado superior em relação ao método de Thornthwaite-48 na bacia do Riacho Gameleira, em Pernambuco, com desempenho classificado como “muito bom” para períodos mensais.

O método de Jensen-Haise apresentou elevado coeficiente de correlação (r) de 0,96, mas devido à tendência consistente de sobrestimar a ETo, apresentou baixo valor de índice de concordância (d), tendo o seu desempenho classificado como “bom”. Este resultado concorda com Xystrakis & Matzarakis (2011), que também constataram elevados coeficientes de correlação (r) para o método de Jensen-Haise, mas desempenho geral limitado devido à sobrestimava da ETo para condições de clima semiárido na ilha de Creta na Grécia.

Além de apresentar tendência consistente de subestimar a ETo, o método de Thornthwaite-48 também apresentou considerável dispersão dos dados, tendo o seu desempenho classificado como

“sofrível”. O desempenho constatado foi inferior aos relatados por Silva et al. (2011) para Uberlândia/MG, onde foi classificado como “bom”, e por Bezerra et al. (2014), para Mossoró/RN, onde foi classificado como “mediano”. Baixo desempenho do método de Thornthwaite-48 também é relatado por Trajkovic & Kolakovic (2009) em clima úmido na Croácia e Servia e Sentelhas et al. (2010) para Ontário no Canadá. Enquanto desempenhos intermediários foram constatados por Tabari et al. (2013) no Irã e Melo & Fernandes (2012) para Uberaba/MG.

Os métodos com embasamento físico, Energético e Aerodinâmico, apresentaram desempenho classificado como “bom” e “péssimo”, respectivamente, sendo que o método Aerodinâmico apresentou o pior desempenho dentre os avaliados. Este baixo desempenho pode ser explicado pelo fato deste método ter como embasamento o déficit de pressão de vapor, o qual é, devido às condições semiáridas, elevado na região, ocasionando, na maioria das vezes, uma sobrestimava nos valores de ETo. Em condições áridas e semiáridas, a ETo é limitada pela disponibilidade de energia, o que faz com que métodos embasados no déficit de pressão de vapor apresentem tendência de sobrestimar a ETo. Como o método Energético considera que a ETo equivale ao saldo de radiação sobre a superfície, seu desempenho foi superior ao do método Aerodinâmico, reforçando a hipótese de que na região de estudo, de modo geral, a atmosfera possui capacidade de transportar a quantidade de água que pode ser evaporada pela energia disponível.

Ressalta-se que métodos empíricos simples baseados somente na temperatura do ar tiveram desempenho superior a métodos que demandam dados de radiação. No entanto, era esperado que os métodos baseados na radiação tivessem desempenho superior aos baseados na temperatura do ar, a exemplo dos resultados obtidos por Xystrakis & Matzarakis (2011). Os métodos de Hargreaves-Samani e Thornthwaite modificado, que são dependentes apenas da temperatura do ar, apresentaram desempenho classificado como ótimo, o que os evidencia como alternativas muito interessantes para se calcular ETo nos casos de planejamento da irrigação na região da

Transposição do Rio São Francisco. Por outro lado, o método de Hargreaves-Samani permite a estimativa da ETo em bases diárias e dessa forma pode-se, também, afirmar que esse método é uma alternativa de baixo custo para estimativa desse parâmetro quando o objetivo for o manejo da irrigação. Os métodos baseados na radiação, Jensen-Haise e Radiação FAO 24, apresentaram os maiores valores de coeficiente de correlação (r), mas a tendência consistente de sobrestimar a ETo limitou os seus desempenhos. Este fato é um

indicativo da necessidade de calibração regional destes métodos para que seus desempenhos sejam melhorados.

Com o objetivo de avaliar a variabilidade do desempenho dos métodos entre as comunidades estudadas, foram calculados o coeficiente de correlação (r), o índice de Willmott e o índice de confiança para cada comunidade (Figura 3).

Verifica-se que alguns métodos apresentam considerável variabilidade de desempenho entre as comunidades, a exemplo dos métodos

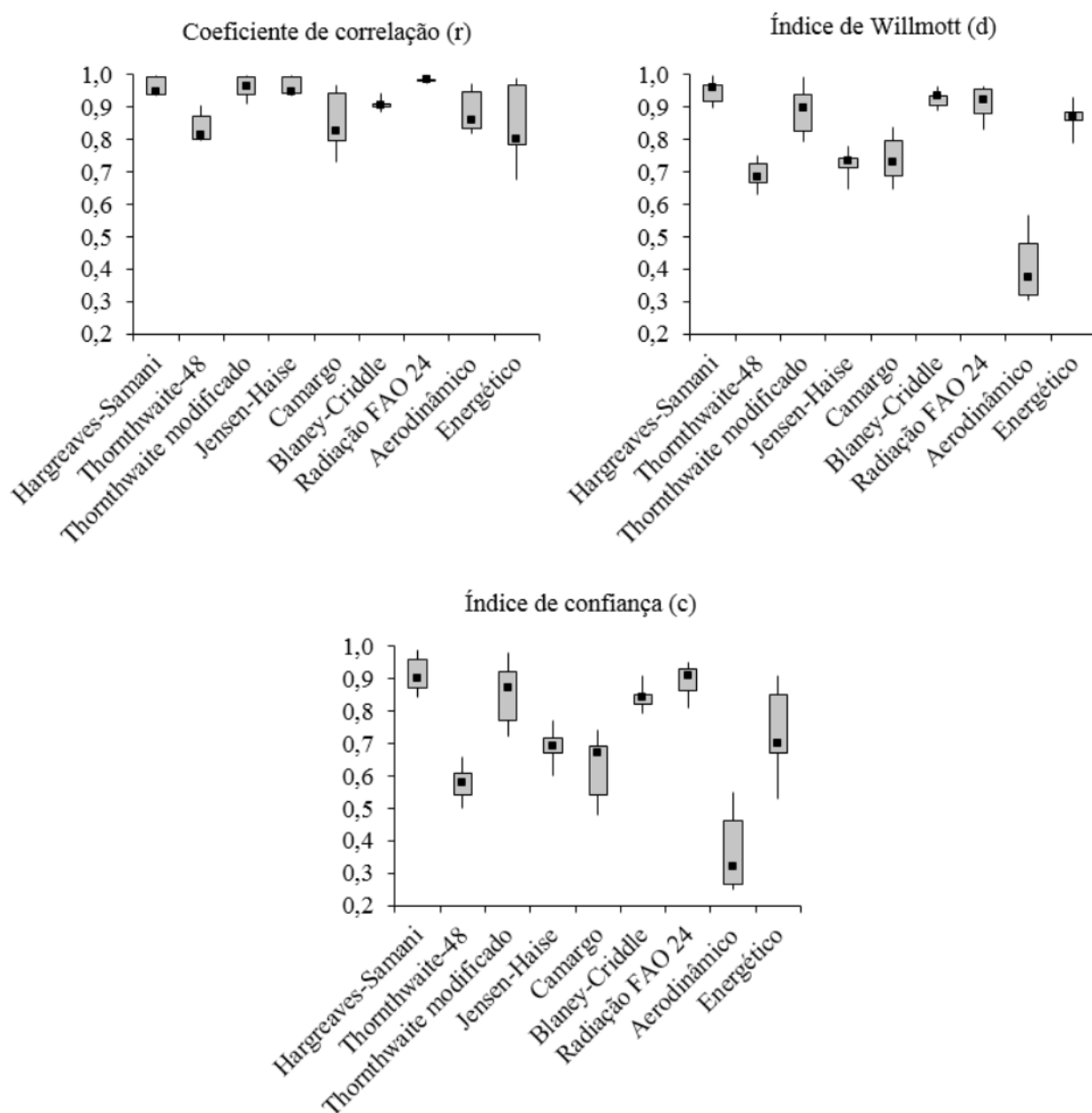


Figura 3. Variabilidade dos índices estatísticos de avaliação de desempenho dos métodos de estimativa da evapotranspiração de referência nas 34 comunidades estudadas.

Aerodinâmico, Energético, Camargo e Thornthwaite modificado. A variabilidade de desempenho é esperada e se deve à diferença climática entre as comunidades estudadas (Zhai et al., 2010; Xystrakis & Matzarakis, 2011). Dentre os métodos que apresentaram desempenho geral classificado como “ótimo”, o de Hargreaves-Samani e Radiação FAO 24 apresentaram baixa variabilidade de desempenho, sendo, portanto, os mais recomendados para a região estudada.

CONCLUSÕES

- Os métodos de Hargreaves-Samani e Radiação FAO 24 apresentam os melhores desempenhos na estimativa de ETo na região estudada, destacando ainda o primeiro, dada a possibilidade de uso no manejo da irrigação.
- Os métodos de Thornthwaite-48 e Camargo-71 apresentaram tendência consistente de subestimar a ETo em comparação com o método padrão de Penman-Monteith-FAO.
- Os métodos da Radiação FAO 24 e Jensen-Haise apresentaram tendência consistente de sobrestimar a ETo, em comparação com o método padrão de Penman-Monteith-FAO.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M. **Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 56).

ARAI, F.K.; PEREIRA, S.B.; GONÇALVES, G.G.G. Characterization of water availability in a hydrographic basin. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.32, n.3, p.591-601, 2012.

AZHAR, A.H.; PERERA, B.J.C. Evaluation of reference evapotranspiration estimation methods under Southeast Australian conditions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Washington, v.137, p.268-279, 2011.

BACHOUR, R.; WALKER, W.R.; TORRES-

RUA, A.F.; MCKEE, M. Assesment of reference evapotranspiration by the Hargreaves method in the Bekaa Valley, Lebanon. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Washington, v.139, p.933-938, 2013.

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

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, PE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.16, n.4, p.380-390, 2012.

CAMARGO, A.P.; CAMARGO, M.B.P. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. **Bragantia**, Campinas, v.59, n.2, p.125-137, 2000.

CAMARGO, A.P.; MARIN, F.R.; SENTELHAS, P.C.; PICINI, A.G. Ajuste da equação de Thornthwaite para estimar a evapotranspiração potencial em climas áridos e superúmidos, com base na amplitude térmica diária. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.7, n.2, p.251-257, 1999.

CAVALCANTE JUNIOR, E.G.; OLIVEIRA, A.D.; ALMEIDA, B.M. de; SOBRINHO, J.E. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para as condições do semiárido Nordeste. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v.32, sup.1, p.1699-1708, 2011.

CHOW, V.T. Agua atmosférica. In: CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R.; MAYS, L.W. **Hidrologia aplicada**. Santafé de Bogotá: Martha Edna Suárez R. 1994, p.54-93.

CUNHA, A.M.; LANI, J.L.; SANTOS, G.R.; FERNANDES FILHO, E.I.; TRINDADE, F.S.; SOUZA, E. Espacialização da precipitação pluvial por meio de krigagem e kokrigagem. **Pesquisa**

- Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.48, n.9, p.1179-1191, 2013.
- DOOREMBOS, J.; PRUIT, W.O. **Guidelines for predicting Crop Water Requirements**. 2.ed. Rome: FAO, 1977. 179p. Irrigation and Drainage Paper, 24.
- FERNANDES, L.C.; PAIVA, C.M.; ROTUNNO FILHO, O.C. Evaluation of six empirical evapotranspiration equations – case study: Campo dos Goytacazes/RJ. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v.27, n.3, p.272-280, 2012.
- HAIJUN, L.; YAN, L.; RUIHAO, Z.; GUANHUA, H. Evaluation and modification of potential evapotranspiration methods in Beijing, China. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, Beijing, v.6, n.4, p.9-18, 2013.
- MAEDA, E.E.; WIBERG, D.A.; PELLIKKA, P.K.E. Estimating reference evapotranspiration using remote sensing and empirical models in a region with limited ground data availability in Kenya. **Applied Geography**, Sevenoaks, v.31, p.251-258, 2011.
- MELO, G.L. de; FERNANDES, A.L.T. Evaluation of empirical methods to estimate reference evapotranspiration in Uberaba, state of Minas Gerais, Brazil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.32, n.5, p.875-888, 2012.
- MOURA, A.R.C.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; ANTONINO, A.C.D.; AZEVEDO, J.R.G.; SILVA, B.B.; OLIVEIRA, L.M.M. Evapotranspiração de referência baseada em métodos empíricos em bacia experimental no estado de Pernambuco – Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São Paulo, v.28, n.2, p.181-191, 2013.
- PEREIRA, L.S.; ALLEN, R.G.; SMITH, M.; RAES, D. Crop evapotranspiration estimation with FAO56: Past and future. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.147, p.4-20, 2015.
- ROJAS, J.P.; SHEFFIELD, R.E. Evaluation of Daily Reference Evapotranspiration Methods as Compared with the ASCE-EWRI Penman-Monteith Equation Using Limited Weather Data in Northeast Louisiana. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Washington, v.139, p.285-292, 2013.
- SENTELHAS, P.C.; GILLESPIE, T.J.; SANTOS, E.A. Evaluation of FAO Penman–Monteith and alternative methods for estimating reference evapotranspiration with missing data in Southern Ontario, Canadá. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.97, n.5, p.635-644, 2010.
- SILVA, V.J.; CARVALHO, H.P.; SILVA, C.R.; CAMARGO, R.; TEODORO, R.E.F. Desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária em Uberlândia, MG. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.27, n.1, p.95-101, 2011.
- TABARI, H.; GRISMER, M.E.; TRAJKOVIC, S. Comparative analysis of 31 reference evapotranspiration methods under humid conditions. **Irrigation Science**, Berlin, v.31, p.107–117, 2013.
- TAGLIAFERRE, C.; SILVA, J.P.; PAULA, A.; GUIMARAES, D.U.G.; BARROSO, N.I.S. Estimativa da evapotranspiração de referência para três localidades do estado da Bahia. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.25, n.2, p.136-143, 2012.
- TRAJKOVIC, S.; KOLAKOVIC, S. Evaluation of reference evapotranspiration equations under humid conditions. **Water Resources Management**, Dordrecht, v.23, p.3057-3067, 2009.
- WAGNER, P.D.; FIENER, P.; WILKEN, F.; KUMAR, S.; SCHNEIDER, K. Comparison and evaluation of spatial interpolation schemes for daily rainfall in data scarce regions. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.465, p.388-400, 2012.
- XYSTRAKIS, F.; MATZARAKIS, A.

Evaluation of 13 Empirical Reference Potential Evapotranspiration Equations on the Island of Crete in Southern Greece. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Washington, v.137, n.4, p.211–222, 2011.

ZHAI, L.; FENG, Q.; LI, Q.; XU, C. Comparison and modification of equations for calculating evapotranspiration (ET) with data from Gansu province, northwest China. **Irrigation and Drainage**, v.59, p.477-490, 2010.