

EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ET_o) SEGUNDO THORNTHWAITE MODIFICADO, CALIBRADO NA BACIA DO RIACHO GAMELEIRA – ESTADO DE PERNAMBUCO

Ada Ravana Costa Moura¹, Suzana Maria Gico Lima Montenegro², Bernardo Barbosa da Silva³, Antônio Celso Dantas Antonino⁴, Leidjane Maria Maciel de Oliveira⁵, José Roberto Gonçalves de Azevedo⁶

¹ *Engenheira Civil, Mestre em Engenharia Civil, Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, adaravana@gmail.com*

² *Professora Associada do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco-UFPE, suzanam@ufpe.br*

³ *Professor Visitante dos Departamentos Geografia e Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, bbdasilva.ufpe@gmail.com*

⁴ *Professor Associado do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, acda@ufpe.br*

⁵ *Engenheira Civil, Pós-Doutoranda em Engenharia Civil, Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, leidjaneoliveira@hotmail.com*

⁶ *Professor Associado do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, jrga@ufpe.br*

Artigo recebido em 02/02/2012 e aceito em 08/02/2012

RESUMO

Para estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) os métodos baseados na temperatura do ar vêm sendo bastante utilizados, considerando que muitas áreas não são cobertas por estações meteorológicas com monitoramento de variáveis que permitam aplicabilidade de métodos mais complexos. Um dos métodos mais empregados baseado na temperatura do ar é o de Thornthwaite. Entretanto, este método pode não estimar satisfatoriamente a ET_o por não considerar o efeito aerodinâmico. A introdução da temperatura efetiva, corrigida em função da amplitude térmica diária e do coeficiente “k”, pode representar este efeito e esta alteração caracteriza o método de Thornthwaite Modificado. Este trabalho teve por objetivo identificar e testar diferentes coeficientes mensais de “k” para o cálculo da temperatura efetiva e, conseqüentemente, da evapotranspiração de referência. O local de estudo foi a bacia experimental do riacho Gameleira, no estado de Pernambuco, compreendendo o período de janeiro de 2004 a março de 2009. Foram consideradas as escalas de tempo de 1, 5, 10, 15 e 30 dias. O método de Thornthwaite Modificado foi comparado com o método proposto por Allen et al. (1998), recomendado pela FAO. Os resultados encontrados mostraram que com a utilização de diferentes coeficientes “k” o desempenho do método de Thornthwaite Modificado melhorou significativamente nas escalas de tempo de 5 a 30 dias, com coeficientes de determinação variando de 0,706 a 0,892.

Palavras-Chave: ET_o-método de estimativa; bacia experimental; Penman-Monteith FAO56

DETERMINATION OF REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION (ET_o) ACCORDING TO THORNTHWAITE MODIFIED, CALIBRATED AT GAMELEIA WATERSHED – STATE OF PERNAMBUCO

ABSTRACT

To estimate the reference evapotranspiration (ET_o) methods based on air temperature have been widely used, since many areas are not covered by weather stations to monitor variables that allow applicability to more complex methods. One of the most commonly used methods based on the air temperature is the Thornthwaite. However, this method can not satisfactorily estimate ET_o by not considering the aerodynamic effect. The introduction of effective temperature, corrected for daily temperature range and coefficient "k" can represent this effect and this change characterizes the Modified Thornthwaite method. This study aimed to identify and

test different coefficients of monthly "k" for the calculation of the effective temperature and hence the reference evapotranspiration. The study site was the experimental basin of the creek Gameleira, in Pernambuco state, comprising the period from January 2004 to March 2009. We considered the time scales of 1, 5, 10, 15 and 30 days. The method of Thornthwaite Modified was compared with the method proposed by Allen et al. (1998), recommended by FAO. The results showed that with the use of different coefficients "k" Performance Modified Thornthwaite method improved significantly over time scales of 5 to 30 days, with correlation coefficients ranging from 0.706 to 0.892

Key words: ETo-estimation method; experimental basin; Penman-Monteith FAO

5

INTRODUÇÃO

A evapotranspiração é considerada um elemento climático de demanda hídrica que possibilita alternativas de planejamento e manejo da irrigação. A sua análise quantitativa é função de três importantes situações: adequação do método avaliativo às condições climáticas da região, simplicidade de uso e limitação de elementos meteorológicos ou climáticos que alimentam estes métodos. (Carvalho et al., 2011). Neste contexto, com diversas metodologias, pesquisadores buscam validar métodos, sejam diretos ou indiretos.

Embora o Brasil possua centenas de estações meteorológicas, muitas áreas de produção agrícola ainda não são contempladas com essas estações e nesse sentido os métodos que empregam apenas dados de temperatura do ar na determinação da ETo são de grande importância.

Métodos baseados em temperatura do ar podem ser adequados para determinada região e estimar com certa precisão a evapotranspiração de referência. Também surgem como alternativa para determinação da evapotranspiração em situações de

escassez de dados, tendo em vista que a aplicação de métodos mais complexos como o proposto por Allen et al. (1998), que utilizam a equação de Penman-Monteith, recomendado pela FAO (Food and Agricultural Organization) como método padrão para estimativa da evapotranspiração de referência (ETo), é inviabilizada muitas vezes por não se dispor de todas variáveis meteorológicas necessárias.

Varejão-Silva (2005) fez algumas críticas a métodos baseados em temperatura do ar, especificamente relacionadas à equação de Thornthwaite, alertando que este método fornece apenas uma aproximação da ordem de grandeza que se deseja conhecer, pois não considera inúmeros fatores intervenientes ao processo da evapotranspiração.

Tucci (2004) destaca que a equação de Thornthwaite deve ser utilizada com cautela, particularmente em climas de verões úmidos e invernos secos. Segundo Camargo & Camargo (2000) e Cunha et al. (2003), este método funciona adequadamente em regiões de clima úmido,

independentemente da altitude e latitude. Já para condições áridas, o método subestima com frequência a evapotranspiração de referência (ET_o).

O desempenho da equação de Thornthwaite pode ser melhorado com a utilização da temperatura efetiva, que varia em função da amplitude térmica diária e da temperatura média, sendo determinada pelas temperaturas máxima e mínima diária e um coeficiente calibrado para as condições da área estudada. Essa correção, proposta por Camargo et al. (1999), surgiu da tentativa de representar o termo aerodinâmico e ajustar a equação original de Thornthwaite, dando origem ao método denominado de Thornthwaite Modificado.

Em recentes estudos com evapotranspiração de referência utilizando a equação de Thornthwaite Modificado utilizaram-se diferentes índices para o cálculo da temperatura efetiva, onde se destacam: Camargo et al. (1999), em estudo realizado em 74 localidades brasileiras sob diferentes condições climáticas; Pereira & Pruitt (2004), em estudo realizado nas cidades de Piracicaba, São Paulo e Davis, Califórnia; Fernandes (2006), em estudo realizado na região de Campos dos Goytacazes e Ilha do Fundão, ambas no Rio de Janeiro; e Back (2008), em estudo realizado na região de Urussanga, Santa

Catarina. Nesses trabalhos foram utilizados coeficientes iguais para todos os meses do ano, iguais a 0,69 ou 0,72.

Partindo do princípio que os resultados obtidos pela aplicação da equação de Thornthwaite variam de acordo com o clima da região estudada, é de se esperar que seu desempenho durante os meses do ano também apresente variações em decorrência das características climáticas peculiar à cada estação, ou seja, espera-se que o desempenho dessa equação varie entre o inverno e o verão, por exemplo. Dessa forma, no ajuste da equação de Thornthwaite devem ser considerados coeficientes mensais específicos para o cálculo da temperatura efetiva.

De maneira geral, o comportamento dos métodos utilizados para determinação da evapotranspiração de referência (ET_o) depende do período de dados considerado nas análises, das variáveis utilizadas no cálculo e das condições climáticas da área estudada. Como esses métodos geralmente são concebidos sob condições específicas, os resultados podem não ser satisfatórios e podem não ter validade para condições distintas (Barros et al., 2009). Assim, é importante realizar calibração local para diminuir os erros de estimativa e melhorar o desempenho dos métodos.

Alguns trabalhos vêm sendo desenvolvidos nessa linha, com a utilização de diferentes metodologias. Dentre eles têm-se os trabalhos realizados por Oliveira et al. (2007), na mesma área de estudo deste trabalho, com modelos de regressão linear e não-linear; Oliveira et al. (2008) ainda na mesma bacia desta pesquisa utilizando lisímetro e métodos indiretos; e o realizado por Bautista et al. (2009), na região de Yucatán, México, com a calibração das equações de Hargreaves e Thornthwaite.

Diante do apresentado, o objetivo deste trabalho foi identificar e testar diferentes coeficientes para o cálculo da temperatura efetiva visando a determinação da evapotranspiração de referência (ET_o) com a equação de Thornthwaite Modificado, tomando-se como estimativa padrão o método proposto por Allen et al. (1998), recomendado pela FAO.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

A área da pesquisa foi bacia do riacho Gameleira, localizada no município de Vitória de Santo Antão, parte nordeste da Mesorregião Geográfica do Agreste do Estado de Pernambuco, nas coordenadas 35°17'E, 8°04'N e 35°20'E, 8°06'N. Essa microbacia está inserida na bacia do rio

Tapacurá, uma sub-bacia do rio Capibaribe (Figura 1).

A microbacia do riacho Gameleira possui uma área de drenagem de 17 km² e está situada numa área de transição entre a zona da mata e o semiárido. Essa microbacia foi adotada como experimental e equipada por dispositivos de monitoramento hidrometeorológicos, resultante de pesquisas realizadas pela Rede de Hidrologia do Semiárido (REHISA).

O clima dominante da área é o As', clima quente e úmido do tipo pseudo tropical na classificação de Köppen (Braga, 2001). O período chuvoso na bacia acontece entre março e julho, quando ocorrem 68% da precipitação anual. A precipitação anual média é de 1.047 mm, a temperatura mensal média oscila entre 23,7 e 27,0 °C, enquanto a umidade relativa do ar, durante os meses de março a julho, é superior a 70% (Araújo Filho et al., 2007).

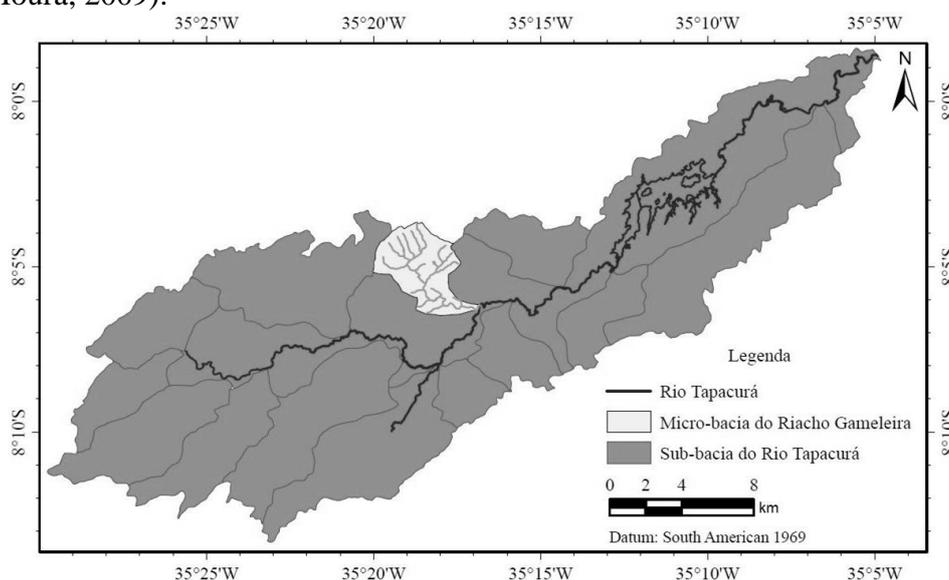
Determinação da Evapotranspiração de Referência (ET_o)

Os métodos utilizados para determinação da evapotranspiração de referência (ET_o) foram o proposto por Allen et al. (1998), denominado de Penman-Monteith FAO-56, Thornthwaite e Thornthwaite Modificado.

Os dados utilizados foram obtidos com uma plataforma de coleta de dados, instalada na bacia do riacho Gameleira, que monitora as seguintes variáveis: radiação solar, temperatura e umidade relativa do ar, e velocidade do vento. O período de dados

utilizado nas estimativas foi de janeiro de 2004 a março de 2009, agrupados em escalas diária, quinidial, decendial, quinquendial e mensal.

Figura 1 - Localização da microbacia do riacho Gameleira em relação à sub-bacia do rio Tapacurá (Fonte: Moura, 2009).



Método Penman-Monteith FAO-56

A equação de Penman-Monteith FAO-56, com diversas parametrizações é dada por (Allen et al., 1998):

$$ET_{O(PM-56)} = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \cdot 1$$

em que $ET_{O(PM-56)}$ é a evapotranspiração de referência estimada pelo método de Penman-Monteith FAO-56 ($mm\ d^{-1}$); R_n é o saldo de radiação ($MJ\ m^2\ d^{-1}$); G é o fluxo de calor na superfície do solo ($MJ\ m^2\ d^{-1}$); T

é a temperatura média do ar ($^{\circ}C$); u_2 é a velocidade do vento a 2 m de altura ($m\ s^{-1}$); e_s é a pressão de parcial vapor à saturação (kPa); e_a é a pressão parcial de vapor (kPa); Δ é a tangente da curva de saturação (kPa $^{\circ}C^{-1}$); e γ é a constante psicométrica (0,0666 kPa $^{\circ}C^{-1}$).

Para o cálculo das variáveis anteriormente citadas foi usada toda a metodologia apresentada no Boletim N° 56 da FAO e quando pertinente, o uso das

recomendações para situações de escassez de dados.

Método de Thornthwaite (1948)

A equação proposta por Thornthwaite é uma relação exponencial entre a temperatura média mensal e a evapotranspiração (Chow, 1964). Essa relação é dada pelas seguintes equações (Thornthwaite, 1948; Pereira & Pruitt, 2004):

$$ET_{O(Th)} = 16 \left(10 \frac{T_i}{I} \right)^a, \quad (2)$$

$$0 \text{ } ^\circ\text{C} \leq T_i \leq 26 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$ET_{O(Th)} = -415,85 + 32,24T_i - 0,43T_i^2, \quad (3)$$

$$T_i > 26 \text{ } ^\circ\text{C}$$

em que $ET_{O(Th)}$ é a evapotranspiração (mm m-1), T é a temperatura média mensal ($^\circ\text{C}$) e I é o índice térmico imposto pelo regime climático local. O expoente “a” é calculado em função de “I”, ambos computados pelas equações:

$$I = \sum_{n=1}^{12} (0,2T_i)^{1,514} \quad T \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4)$$

$$a = c_1 I^3 - c_2 I^2 + c_3 I + c_4 \quad (5)$$

em que i representa o mês do ano ($i=1$, janeiro; ...; $i=12$, dezembro; c_1 é igual a $6,75 \cdot 10^{-7}$; c_2 é igual a $7,71 \cdot 10^{-5}$; c_3 é igual a $1,7912 \cdot 10^{-2}$; e c_4 é igual a $0,49239$.

Pode-se observar que para temperaturas maiores que 26°C , o cálculo da

evapotranspiração independe do índice térmico (Equação 3).

As Equações 2 e 3 fornecem a evapotranspiração para a condição padrão de meses com 30 dias e dias com 12 horas de brilho solar. Para obter a evapotranspiração em escala de tempo diária, multiplica-se o valor obtido através da Equação 2 ou Equação 3 pelo seguinte fator de correção calculado pela Equação 6 (Pereira et al., 1997):

$$C = \frac{N}{12} \times \frac{1}{30} \quad (6)$$

em que N é o fotoperíodo (h) de um determinado dia.

O fotoperíodo é calculado em função da latitude do local e da declinação solar, por meio da equação (Varejão-Silva, 2005):

$$N = \frac{2}{15} \omega_s \quad (7)$$

em que N é o fotoperíodo (h) e ω_s é o ângulo horário no pôr do Sol, expresso pelas seguintes equações:

$$\omega_s = \arccos[-\tan(\varphi)\tan(\delta)] \quad (8)$$

$$\delta = 0,4093 \text{sen} \left(\frac{2\pi}{365} J - 1,39 \right) \quad (9)$$

$$J = 30,42M - 15,23 \quad (10)$$

em que φ é a latitude (radianos), δ é a declinação solar (radianos), J é o dia Juliano (adimensional) e M o índice do mês em questão (janeiro=1, fevereiro=2, ..., dezembro=12).

Método de Thornthwaite Modificado (1999)

Camargo et al. (1999) ajustaram a equação original de Thornthwaite com o uso da temperatura efetiva (T_{ef}), computada empiricamente em função da temperatura média e da amplitude térmica média diária, dada por (Camargo et al., 1999; Pereira & Pruitt, 2004):

$$T_{ef} = k(T+A) \quad (11)$$

em que T é a temperatura média mensal ($^{\circ}C$), A é a amplitude térmica média diária.

A temperatura média e a amplitude são dadas por Camargo et al. (1999) conforme apresentado nas equações:

$$T = \left(\frac{T_{max} + T_{min}}{2} \right) \quad (12)$$

$$A = (T_{max} - T_{min}) \quad (13)$$

em que T_{max} e T_{min} são a média mensal das temperatura máxima e mínima, respectivamente.

Substituindo as Equações 12 e 13 na Equação 11, obtém-se a equação simplificada:

$$T_{ef} = 0,5k(3T_{max} - T_{min}) \quad (14)$$

Substituindo a temperatura média mensal pela temperatura efetiva nas Equações 2 ou 3, obtém-se a equação final de Thornthwaite Modificado, dada por:

$$ETo_{(Th-M)} = 16 \left(10 \frac{T_{ef,i}}{I} \right)^a, \quad (15)$$

$$0^{\circ}C \leq T_{ef,i} \leq 26^{\circ}C$$

$$ETo_{(Th-M)} = -415,85 + 32,24T_{ef,i} - 0,43T_{ef,i}^2, \quad (16)$$

$$T_{ef,i} > 26^{\circ}C$$

O valor de “k” foi inicialmente proposto por Camargo et al. (1999), determinado com a correção da temperatura utilizada na equação de Thornthwaite. Os autores fizeram correlações deste método com o proposto por Allen et al. (1998), método de Penman-Monteith, utilizando dados mensais obtidos de 74 localidades com clima árido e superúmido no mundo inteiro. O melhor ajuste foi aquele obtido para $k=0,72$. Posteriormente, Pereira & Pruitt (2004) testaram o valor de $k=0,69$ e encontraram melhores estimativas da ETo para duas regiões, sendo uma de clima árido e outra de clima tropical úmido.

Como se observa, os valores de “k” anteriormente mencionados foram utilizados para o cálculo da temperatura efetiva durante todos os meses do ano, ou seja, um único valor independentemente do mês estudado. Considerando que no cálculo da temperatura efetiva o coeficiente “k” representa o percentual que se deve considerar da soma da temperatura média (T) com a amplitude (A), Equação 14, e que

estes são variáveis durante os meses do ano, espera-se que com a utilização de diferentes coeficientes mensais os resultados encontrados sejam ainda melhores.

Seleção dos coeficientes “k” para cada mês

Neste trabalho foi utilizada uma metodologia distinta da normalmente encontrada na literatura, testando-se diferentes coeficientes para cada mês do ano.

Inicialmente foram testados diversos coeficientes “k” para todos os meses do ano, tomando-se como ponto de partida o coeficiente com melhor desempenho dentre os encontrados na literatura ($k=0,72$). A partir deste valor inicial, foram feitas variações aleatórias de “k”. Para cada variação obteve-se um novo valor da temperatura efetiva (Equação 14) e consequentemente da $ET_{O(Th-M)}$ (Equações 15 ou 16).

Os dados de $ET_{O(Th-M)}$ foram comparados com os dados de $ET_{O(PM-56)}$ através do índice de concordância (d), Equação 17, e do coeficiente de determinação (R^2), que definiram o critério de escolha do melhor coeficiente “k”. Essa análise estatística compreendeu o período de janeiro de 2004 a março de 2009, totalizando 63 meses.

Como a variação do coeficiente “k” foi aleatória, fez-se necessário definir um critério de convergência para escolha desse coeficiente. Assim, as variações foram pré-definidas nos valores de $\pm 0,100$; $\pm 0,010$ e $\pm 0,001$. Estabeleceu-se, portanto, uma rotina de cálculo da seguinte forma: para cada mês analisado fez-se a variação de $+ 0,100$ no valor de “k”. Se os valores do coeficiente de determinação (R^2) e do índice de concordância (d) encontrados fossem maiores ou iguais aos iniciais, uma nova variação de $+ 0,100$ era feita. Caso contrário, testava-se a variação de $- 0,100$ e, da mesma forma, se os coeficientes “d” e “ R^2 ” fossem maiores, efetuava-se uma nova variação de $- 0,100$. Se em nenhuma das variações testadas os índices estatísticos melhorassem, fazia-se uma nova variação de $\pm 0,010$ e posteriormente de $\pm 0,001$.

Análise estatística

Os métodos de Thornthwaite e Thornthwaite Modificado foram avaliados em relação ao método padrão proposto por Allen et al. (1998), equação de Penman-Monteith, através do coeficiente de determinação (R^2); do índice de concordância (d) proposto por Willmott et al. (1985), Equação 17; e do índice de desempenho (c) proposto por Camargo & Sentelhas (1997), Equação 18.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^N [(|P_i - O_i|) + (|O_i - O|)^2]}, \quad 0 \leq d \leq 1 \quad (17)$$

em que O_i são os valores estimados pelo método padrão; P_i são os valores estimados pelos métodos propostos; O a média dos valores estimados pelo método padrão; e N é o número de eventos.

O desempenho de cada método foi avaliado pelo índice de desempenho (c) proposto por Camargo & Sentelhas (1997), que reúne o coeficiente de correlação (r) e o de concordância (d), conforme Equação 18, e seu critério de interpretação pode ser verificado na Tabela 1.

$$c = r \times d \quad (18)$$

Tabela 1– Critério de interpretação do desempenho dos métodos de estimativa da ETo pelo índice “ c ” de Camargo & Sentelhas (1997)

Valor de “ c ”	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito Bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
≤ 0,40	Péssimo

Na quantificação dos erros proporcionados pelas estimativas, foram utilizados os seguintes parâmetros estatísticos (Gavilán et al., 2008; Back, 2008):

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^N O_i - \sum_{i=1}^N P_i}{\sum_{i=1}^N O_i} \quad (19)$$

$$EPE = \sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^N (O_i - P_i)^2}{n-1} \right)} \quad (20)$$

em que CRM, o coeficiente de massa residual e EPE, o erro padrão da estimativa.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Determinação dos coeficientes mensais de “ k ”

Conforme metodologia adotada, para cada mês do ano foram utilizados diferentes coeficientes “ k ” para testar o desempenho do método de Thornthwaite Modificado em relação ao método padrão. Ao final do processo iterativo obtiveram-se os coeficientes “ k ” listados na Tabela 2, que resultaram em $R^2=0,892$ e $d=0,967$.

Durante as tentativas para determinação dos valores de “k”, observou-se a grande sensibilidade dos resultados com relação à quantidade de casas decimais utilizadas em sua variação. Foram testados valores com precisão de duas casas decimais e posteriormente foi verificada a necessidade de se trabalhar com três casas decimais. Os cálculos realizados inicialmente foram

feitos de maneira simples e diante da sensibilidade observada houve a necessidade de automatizar os cálculos através de uma rotina computacional.

Com o refinamento dos dados pode-se variar mais vezes os valores de “k”, de maneira precisa e com critério de convergência bem definido

Tabela 2 – Coeficientes mensais “k” selecionados

Coeficientes mensais "k"	
Janeiro	0,765
Fevereiro	0,743
Março	0,751
Abril	0,738
Maiο	0,747
Junho	0,770
Julho	0,786
Agosto	0,806
Setembro	0,814
Outubro	0,813
Novembro	0,775
Dezembro	0,765

Determinação da evapotranspiração com o método de Thornthwaite Modificado

Na Figura 2 são mostrados os resultados da aplicação dos métodos Thornthwaite,

Thornthwaite Modificado e Penman-Monteith FAO-56. Para o método de Thornthwaite Modificado, foram testados os coeficientes “k” variáveis, conforme

metodologia proposta, e coeficientes iguais a 0,69 e 0,72

A análise da Figura 2 permite verificar que, com a utilização dos coeficientes “k” igual a 0,69 e 0,72 o método de Thornthwaite Modificado subestimou a evapotranspiração em todos os meses do ano, quando comparado com o método padrão de Penman-Monteith FAO-56. A utilização desses coeficientes para a área estudada acentuou o comportamento do método original de Thornthwaite, no sentido de subestimar a evapotranspiração ainda mais.

Com a metodologia proposta neste trabalho, adotando-se diferentes coeficientes “k” para cada mês do ano, os resultados obtidos com o método de Thornthwaite Modificado foram melhores. Observa-se ainda na Figura 2 que o comportamento deste método mudou sensivelmente em relação aos citados anteriormente, acompanhando melhor o método proposto por Allen et al. (1998).

Para melhor avaliar os resultados encontrados, fez-se a análise estatística dos métodos utilizados com os diferentes coeficientes propostos (Tabela 3).

Como se observa na Tabela 3, o método de Thornthwaite apresentou resultado satisfatório apenas na escala mensal, com desempenho classificado como “Bom”.

Com a utilização do método modificado (k=0,69) os resultados foram pouco satisfatórios em todas as escalas de tempo analisadas. Como foi citado anteriormente na análise da Figura 2, este método foi o que mais subestimou a evapotranspiração em relação ao método de Penman-Monteith FAO-56. A análise estatística comprova este comportamento, tanto do ponto de vista do desempenho quanto dos erros encontrados que, como se observa, foram maiores quando comparados com todos os outros métodos.

O método de Thornthwaite Modificado (k=0,72) apresentou desempenho satisfatório nas escalas de 10, 15 e 30 dias, com coeficientes de determinação (R^2) variando de 0,692 a 0,779. Diferentemente dos resultados encontrados com a utilização de k=0,69, os obtidos com k=0,72 foram melhores em relação ao método original de Thornthwaite e apresentou bom ajuste em relação ao método de Penman-Monteith FAO-56.

Figura 2 - Médias mensais da ETo obtida através dos métodos de Thornthwaite, Thornthwaite Modificado (com coeficientes fixos e variáveis) e Penman-Monteith.

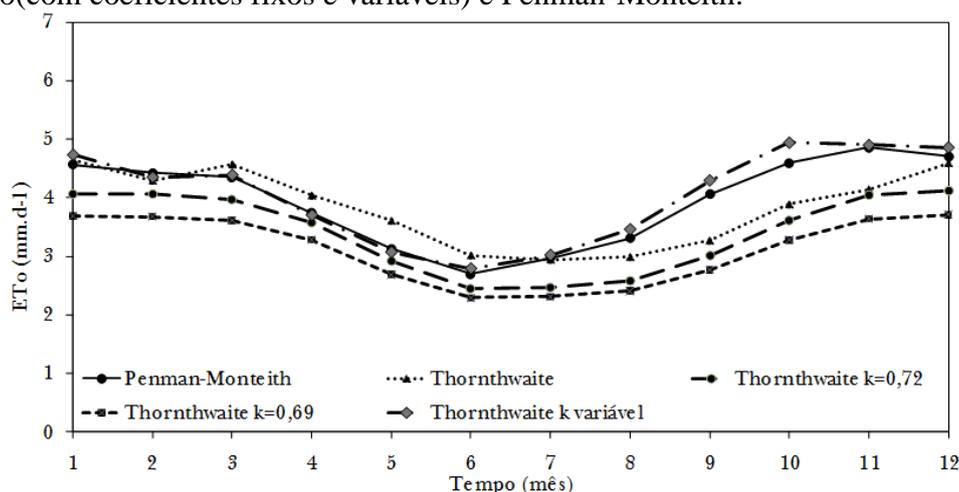


Tabela 3 – Análise estatística da correlação entre os métodos de Thornthwaite e Thornthwaite Modificado, em relação à Penman-Monteith FAO-56, nas escalas de tempo diária, pentada, decendial, quinzenal e mensal.

Método	Escala (dias)	Índices				Desempenho	Erros (mm d ⁻¹)		Nº de dados
		r	R ²	d	c		EPE	CRM	
Thornthwaite (1948)	1	0,588	0,345	0,724	0,430	Mau	0,808	0,021	1704
	5	0,703	0,494	0,817	0,570	Sofrível	0,607	0,025	355
	10	0,745	0,555	0,847	0,630	Mediano	0,541	0,024	180
	15	0,759	0,576	0,857	0,650	Mediano	0,521	0,023	122
	30	0,791	0,626	0,878	0,690	Bom	0,475	0,022	63
Thornthwaite modificado k=0,69	1	0,640	0,410	0,637	0,410	Mau	1,123	0,206	1704
	5	0,764	0,584	0,680	0,520	Sofrível	0,996	0,208	355
	10	0,808	0,652	0,694	0,560	Sofrível	0,955	0,207	180
	15	0,822	0,675	0,698	0,570	Sofrível	0,942	0,207	122
	30	0,858	0,736	0,708	0,610	Mediano	0,915	0,207	63
Thornthwaite modificado k=0,72	1	0,661	0,437	0,715	0,470	Mau	0,910	0,131	1704
	5	0,788	0,621	0,784	0,620	Mediano	0,743	0,133	355
	10	0,832	0,692	0,806	0,670	Bom	0,689	0,132	180
	15	0,846	0,716	0,814	0,690	Bom	0,674	0,132	122
	30	0,883	0,779	0,830	0,730	Bom	0,637	0,132	63
Thornthwaite modificado k variável	1	0,708	0,501	0,829	0,590	Sofrível	0,711	-0,021	1704
	5	0,840	0,706	0,913	0,770	Muito Bom	0,471	-0,019	355
	10	0,888	0,788	0,939	0,830	Muito Bom	0,387	-0,020	180
	15	0,903	0,815	0,947	0,850	Muito Bom	0,361	-0,021	122
	30	0,944	0,892	0,967	0,910	Ótimo	0,281	-0,023	63

r-coeficiente de correlação; R² - índice de determinação; d - coeficiente de concordância; c - índice de desempenho; EPE - erro padrão da estimativa e CRM - coeficiente de massa residual

Com a utilização de diferentes coeficientes mensais os resultados encontrados foram ainda melhores que os obtidos com $k=0,72$. Como se observa na Tabela 3, o desempenho foi satisfatório nas escalas de 5, 10, 15 e 30 dias.

Vale destacar que embora sejam nítidas as melhorias advindas da metodologia utilizada, o resultado encontrado na escala de tempo diária não foi satisfatório. Este resultado já era esperado, tendo em vista que este método foi concebido para escala de tempo de 30 dias. Ainda assim, se comparado com os outros coeficientes testados e com o método original, seu resultado foi melhor, passando de “Mau” para “Sofrível”. A mesma observação é válida para as escalas com desempenhos satisfatórios, onde se observa desempenhos classificados como “Muito bom” e “Ótimo”, ou seja, houve aumento de nível na classificação proposta por Camargo & Sentelhas (1997).

Os coeficientes “k” mensais encontrados podem ser utilizados na região estudada, entretanto, deve-se ponderar que estes podem ser melhorados com a utilização de uma série de dados mais ampla, o que possibilitará não somente a calibração dos coeficientes mensais, mas também a sua validação. Essas considerações também são aplicáveis a outras áreas de estudo.

CONCLUSÕES

A metodologia proposta neste trabalho, baseada na determinação de diferentes coeficientes mensais de “k”, se mostrou adequada para determinar da evapotranspiração de referência pelo método de Thornthwaite modificado nas escalas de tempo de 5 a 30 dias.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, campus de Vitória de Santo Antão-PE (IFPE Vitória), pela colaboração técnica para elaboração deste trabalho; à FINEP; ao CNPq; a CAPES, a FACEPE e ao CT-HIDRO/CNPq pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M. Crop evapotranspiration: guidelines of computing crop water requirements. Roma: FAO, 1998. 300p (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ARAÚJO FILHO, P.F., CABRAL, J.J.S.P., AZEVEDO, J.R.G. Considerações sobre a variabilidade espacial da precipitação na bacia do riacho Gameleira em Pernambuco. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17., 2007, São Paulo-SP. Anais, Porto Alegre: ABRH, 2007. CD-ROM.
- BACK, A.J. Desempenho de métodos empíricos baseados na temperatura do ar para a estimativa da evapotranspiração de

- referência em Urussanga, SC. Irriga, v.13, n.4, p.449-466, 2008.
- BARROS, V.R.; SOUZA, A.P.; FONSECA, D.C. & SILVA, L.B.D. Avaliação da evapotranspiração de referência na Região Seropédica, Rio de Janeiro, utilizando lisímetros de pesagem e modelos matemáticos. Revista Brasileira de Ciências Agrárias, v.4, n.2, p.198-203, 2009.
- BAUTISTA, F.; BAUTISTA, D. & CARRANZA, C.D. Calibration of the equations of Hargreaves and Thornthwaite to estimate the potential evapotranspiration in semi-arid and subhumid tropical climates for regional applications. *Atmósfera*, México. V.22, n.4, p.331-348, 2009.
- BRAGA, R. A. P. Gestão ambiental da bacia do rio Tapacurá – Plano de Ação. Realização Universidade Federal de Pernambuco / CTG / DECIVIL / GRH. Recife – Pernambuco, 2001. 101 p.
- CAMARGO, A.P. & SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.
- 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.
- CAMARGO, A.P. & CAMARGO, M.B.P. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. *Bragantina*, Campinas, v. 59, n. 2, p. 125-137, 2000.
- CARVALHO, L. G. de, RIOS, G. F. A., MIRANDA, W. L., NETO, P. C. Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, Goiania, v. 41, n.3, p.456-465, 2011.
- CHOW, V.T. *Handbook of Applied Hydrology*. Nova York: McGraw-Hill, 1964. ISBN 07-010774-2.
- CUNHA, T.C., RABELO, J.L.R., WENDLAND, E. Monitoramento de lisímetro volumétrico para validação de estimativas de evapotranspiração. In *Anais do XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Curitiba-PR, 2003.
- FERNANDES, L.C. Avaliação de diversas equações empíricas de evapotranspiração. Estudo de caso: Campos dos Goytacazes e Ilha do Fundão-RJ. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.
- GAVILÁN, P.; ESTEVEZ, J. & BERENGENA, J. Comparison of standardized reference evapotranspiration equations in Southern Spain. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 134, n. 1, 2008.
- OLIVEIRA, L. M. M., MONTENEGRO, S. M. G. L., AZEVEDO, J. R. G., SANTOS, F. X. Evapotranspiração de referência na bacia experimental do riacho Gameleira, PE, utilizando-se lisímetro e métodos indiretos. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v.3, n.1, p.58-67, 2008.
- OLIVEIRA, L.M.M.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; SILVA, J.A.A.; FURTUNATO, O.M.; NASCIMENTO, R.M.; MONTENEGRO, A.A.A. & AZEVEDO, J.R.G. Modelos de regressão linear e não linear usando variáveis meteorológicas locais na estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o), comparados com métodos indiretos, na bacia experimental do riacho Gameleira. In: *Simpósio Brasileiro de Recursos*

Hídricos, 2007, São Paulo. Anais, CD Rom.

PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. Evapo(transpi)ração. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.

PEREIRA, A.R., PRUITT, W.O. Adaptation of the Thornthwaite scheme for estimating daily reference evapotranspiration. Agricultural Water Management, Amsterdam, Netherlands, v. 66, n. 2, p. 251-257, 2004.

PEREIRA, D.R.; YANAGI, S.N.M.; MELLO, A.M.S. & SILVA, L.A. Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região da Serra da Mantiqueira, MG. Ciência Rural, Santa Maria. V.39, n.9, p.2488-2493, 2009.

THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. Geographical Review 38, 55–94, 1948.

TUCCI, C.E.M. (Org.). Hidrologia: ciência e aplicação. 3 ed. Porto Alegre: Ed. da UFRGS/ABRH, 2004. 943p.

VAREJÃO-SILVA, M.A. Meteorologia e Climatologia. Recife: 2005. Versão Digital.

WILLMOTT, C.J.; ACKLESON, S.G.; DAVIS, J.J.; FEDDEMA, K. M. & KLINK, D. R. “Statistics for the evaluation and comparison of models”. Journal of Geophysical Research, Ottawa, v. 90, n. 5, p. 8995-9005, 1985.