

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MÉTODOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA O MUNICÍPIO DE ITACOATIARA, AM, PÓS PREENCHIMENTO DE FALHAS EM SÉRIES METEOROLÓGICAS*

ARISTÓTELES DE JESUS TEIXEIRA FILHO¹; LUCAS MELO VELLAME² E AUREO SILVA DE OLIVEIRA³

** Parte 2: Trabalho retirado do Relatório de Pesquisa de Pós-Doutorado “Preenchimento de falhas em observações meteorológicas importantes na estabilidade da modelagem de evapotranspiração potencial de referência para Município de Itacoatiara, AM”, 2025/2026.*

¹Professor Titular do Curso de Agronomia, Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, Campus Itacoatiara; Brasil, aristoteles@ufam.edu.br; ORCID: 0000-0002-0123-7515.

²Professor Titular do Curso de Agronomia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas, Núcleo de Engenharia de Água e Solo, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Campus de Cruz das Almas; Brasil, lucasvellame@ufrb.edu.br; ORCID: 0000-0001-7649-5773.

³Professor Titular do Curso de Agronomia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas, Núcleo de Engenharia de Água e Solo, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Campus de Cruz das Almas, Brasil, aureo@ufrb.edu.br; ORCID: 0000-0001-7661-551X.

1 RESUMO

A distribuição espacial e temporal da disponibilidade hídrica de uma região é de extrema importância ao possibilitar o estabelecimento de diretrizes para a implantação de políticas de planejamento que venham a contribuir para o uso racional dos recursos hídricos disponíveis, minimizando as perdas. Vários autores salientam o papel da evapotranspiração de referência como variável componente do balanço hídrico, estimada com base em princípios físicos e, principalmente, em equações empíricas, visando suprir a ausência de dados por meio de medidas diretas em diferentes locais e condições meteorológicas distintas. Com base nas publicações sobre metodologias de preenchimento de falhas em dados meteorológicos, este estudo teve como objetivo avaliar a estimativa da evapotranspiração de referência pelos métodos de Blaney-Criddle, Camargo, Hargreaves-Samani, Jensen-Haise, Thornthwaite, Makkink, FAO 24 da Radiação e Blaney-Criddle-Frevert, comparados ao método padrão de Penman-Monteith FAO 56. Estas falhas foram observadas em dados oriundos de uma estação meteorológica automática com normal provisória de 15 anos, obtidos do Banco de Dados Meteorológico para Ensino e Pesquisa do Instituto Nacional de Meteorologia em Itacoatiara, AM. Os resultados obtidos mostraram desempenho ótimo dos modelos de Makkink, Jensen-Haise, Blaney-Criddle-Frevert, FAO 24 da Radiação e Hargreaves-Samani, podendo ser adotados no planejamento de áreas agrícolas e no dimensionamento de sistemas de irrigação, o que otimiza o consumo de água, potencializa o aumento da produtividade das culturas e contribui para a segurança alimentar global.

Palavras-chave: Modelagem, uso racional de água, produção agrícola, agrometeorologia.

TEIXEIRA FILHO, A. de J.; VELLAME, L. M.; OLIVEIRA, A. S. de
PERFORMANCE EVALUATION OF METHODS FOR ESTIMATING POTENTIAL
EVAPOTRANSPIRATION FOR THE MUNICIPALITY OF ITACOATIARA, AM
AFTER FILLING GAPS IN METEOROLOGICAL DATA

2 ABSTRACT

The spatial and temporal distribution of water availability in a region is extremely important because it enables the establishment of guidelines for the implementation of planning policies that contribute to the rational use of available water resources and minimize undesirable losses. Several authors have highlighted the role of potential evapotranspiration as a component variable of the water balance, which is estimated on the basis of physical principles and mainly empirical equations to compensate for the absence of direct evapotranspiration measurements at different locations and under different meteorological conditions. On the basis of the published methodologies for filling gaps in meteorological data, the performance of indirect methods for estimating potential evapotranspiration was evaluated using the following methods: the Blaney-Criddle, Camargo, Hargreaves-Samani, Jensen-Haise, Thornthwaite, Makkink, and FAO 24 methods and the Blaney-Criddle-Frevert method compared with the standard FAO 56 Penman-Monteith method. These gaps were identified in data obtained from the automatic meteorological station, with a provisional normal of 15 years, from the Meteorological Database for Teaching and Research of the National Institute of Meteorology in Itacoatiara, AM. The results obtained revealed the optimal performance of the Makkink, Jensen-Haise, Blaney-Criddle-Frevert, FAO 24 Radiation and Hargreaves-Samani models, which can be applied in the design of agricultural planning and irrigation systems, contributing to improved water use efficiency and increased crop productivity.

Keywords: Modeling, rational use of water, agricultural production, agrometeorology.

3 INTRODUÇÃO

O gerenciamento das águas visa harmonizar a oferta natural com as necessidades de atendimento aos usos consuntivos e não consuntivos, sem que haja o risco de conflitos causados pela redução da quantidade, de doenças pela deterioração da qualidade ou de danos à manutenção das espécies pela alteração da dinâmica hídrica (Christofidis, 2013). O estudo sobre a distribuição espacial e temporal da disponibilidade hídrica de uma região é de extrema importância, pois possibilita o estabelecimento de diretrizes para a implantação de políticas de planejamento que venham a contribuir para um uso

racional dos recursos hídricos disponíveis (Silva *et al.*, 2015).

Em 1948, Thornthwaite introduziu o termo evapotranspiração potencial (ETp) para designar a quantidade de água evaporada e transpirada do solo quando esse se encontra com armazenamento máximo de água e com vegetação cobrindo totalmente o solo, sendo a área suficientemente grande para minimizar os efeitos provocados pela advecção local. No caso de existir deficiência hídrica no solo, a condição potencial não mais será atingida, sendo seus valores restringidos, passando a uma nova condição, chamada de evapotranspiração real (ETr), com valor inferior ao potencial. A evapotranspiração real vem a ser aquela em que a condição de umidade do solo

começa a diminuir, provocando uma redução na taxa de transferência de água para a atmosfera, a qual passa a não depender somente das condições atmosféricas reinantes, mas também das características físico-hídricas do solo e da planta.

O processo de evaporação e de evapotranspiração de superfícies naturais pode ser simulado, com embasamento físico, por modelos que descrevem o efeito de resistência à difusão molecular e turbulenta sobre a distribuição de energia proveniente do Sol ou da atmosfera. Tanto o planejamento de áreas agrícolas de sequeiro ou irrigadas quanto a previsão de cheias ou a construção e operação de reservatórios requerem dados confiáveis de evaporação e/ou evapotranspiração. Entretanto, essas informações, quando obtidas por medidas diretas de diferentes locais e condições meteorológicas distintas, não existem em quantidade suficiente. Assim, estimativas baseadas em princípios físicos e, principalmente, em equações empíricas são utilizadas como alternativas para suprir esta ocorrência (Tucci; Beltrame, 2013).

A transferência de água de uma área cultivada, onde a umidade do solo não é um fator limitante, ocorre segundo sua intensidade potencial e qualquer variação será devida somente a diferenças nas condições meteorológicas, incluindo os efeitos de advecção. De acordo com Berlato e Molion (1981), o controle exercido pela vegetação ocorreria por meio da sua estrutura, afetando o albedo, a rugosidade e o sistema radicular. Na medida em que diminui a umidade do solo, ocorrem restrições à transferência de água para a atmosfera, que passa a depender não somente das condições meteorológicas, mas também do sistema radicular das plantas, bem como de outras características, como o estado fitossanitário das mesmas. Esta condição permite distinguir entre evapotranspiração potencial e real. Informações confiáveis sobre

evapotranspiração real são escassas e de difícil obtenção, pois demandam um longo tempo de observação e apresentam elevado custo. Já a evapotranspiração potencial pode ser obtida a partir de modelos baseados em leis físicas e relações empíricas de forma rápida e suficientemente precisa (Tucci; Beltrame, 2013).

Apesar da importância da evapotranspiração de referência como variável componente do balanço hídrico, a maioria das pesquisas que avaliam o desempenho de métodos para preenchimento de falhas está concentrada em dados de chuva (Brubacher; Oliveira; Guasselli, 2020; Srivastava *et al.*, 2020), e pouco em dados de temperatura do ar, umidade relativa do ar, pressão atmosférica, insolação, velocidade do vento e radiação solar. Um dos desafios significativos que se apresentam ao lidar com informações coletadas em estações meteorológicas é a quantidade de falhas (períodos sem medição) encontradas nos bancos de dados. As falhas pluviométricas e hidrológicas podem ocorrer devido a problemas técnicos/operacionais, como ausência do observador, falhas instrumentais, quebra na linha de comunicação ou localização geográfica, por exemplo, que podem levar a interpretações incorretas se não forem corrigidas (Correa *et al.*, 2021).

Na região Norte, em particular no Estado do Amazonas, apesar do relevante número de estações meteorológicas, há falhas nas observações em razão de paneis operacionais ou defeitos. Além disso, as cidades são distantes geograficamente e de difícil acesso, o que dificulta a assistência técnica para ajustes e correções. Em muitos casos, buscar alternativas para gerar dados meteorológicos faltantes, de forma que se possa minimizar os erros nas modelagens de variáveis fundamentais, seria uma alternativa viável.

Este estudo teve como objetivo avaliar e comparar o desempenho de diferentes métodos indiretos de estimativa

da evapotranspiração de referência (ET_o) – Blaney-Criddle, Camargo, Hargreaves-Samani, Jensen-Haise, Thornthwaite, Makkink, FAO 24 da Radiação e Blaney-Criddle-Frevert – em relação ao método padrão de Penman-Monteith FAO 56, após o preenchimento de falhas em séries históricas de dados meteorológicos em Itacoatiara, AM.

4 MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida a partir de dados oriundos da estação meteorológica automática (A121), com série histórica de 2009 a 2023, obtidas do Banco de Dados Meteorológico para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2025) para a localidade de Itacoatiara, AM, situada na latitude 3,1333° Sul e longitude 58,4828° Oeste, a 41,54 metros de altitude. De acordo com Köppen e Geiger, a classificação do clima de Itacoatiara, AM, é do tipo tropical úmido, “Af”. A temperatura média anual é de 26,8 °C e a precipitação anual neste local é de aproximadamente 2750 mm (ClimateData, 2025).

As variáveis meteorológicas consideradas nesta investigação foram: temperaturas do ar (máxima e mínima); umidade relativa do ar (máxima e mínima); pressão atmosférica; insolação; fotoperíodo; velocidade do vento; e radiação solar (global e extraterrestre), necessárias às estimativas da ET_o diária pelo método padrão, FAO-56 Penman-Monteith, e pelos métodos avaliados: Blaney-Criddle, Camargo,

Hargreaves-Samani, Jensen-Haise, Thornthwaite, Makkink, FAO 24 da Radiação e Blaney-Criddle-Frevert. Os valores para essas variáveis foram tabulados utilizando-se planilhas do Microsoft Excel.

As falhas de dados meteorológicos das variáveis temperaturas do ar (mínima e máxima, °C), umidade relativa do ar (mínima, máxima e média, %), pressão atmosférica média (kPa) e velocidade média do vento (m s⁻¹), identificadas na série, foram preenchidas pelo método dentro da estação, como os métodos de interpolações lineares e médias móveis (Allen; Degaetano, 2001), a partir de informações horárias e diárias que foram convertidas em médias mensais. Devido à inexistência de dados completos das estações vizinhas (Tabela 1), distanciadas em até 150 km da Estação Meteorológica de Itacoatiara, procedeu-se ao preenchimento de falhas pelo método da interpolação de dados dentro da estação, além da utilização do software Easy-Fit. Para completar os dados no Easy-Fit, utilizou-se o teste de Kolmogorov-Smirnov por se tratar de dados não paramétricos, além do programa WeatherMan/DSSAT v 4.8.5.0 (Decision Support System for Agrotechnology Transfer) para a geração de dados climáticos pelo modelo WGEN (Richardson; Wright, 1984; Hoogenboom *et al.*, 2024). É importante escolher a metodologia que mais se adequa e contempla as necessidades da pesquisa, em conformidade com a realidade geográfica e climatológica em que se inserem as estações meteorológicas estudadas (Fante; Sant'anna Neto, 2016).

Tabela 1. Localização das Estações vizinhas a Itacoatiara

Nome	UF	Latitude	Longitude	Distância	Altitude	Código
		°		km	m	
Itacoatiara	AM	-3,13694444	-58,44277777	-	41,54	A121
Maues	AM	-3,39888888	-57,67388888	94,34	25,49	A122
Parintins	AM	-2,63916666	-56,75611111	198,26	18,72	A123
Urucará	AM	-2,53472221	-57,75805555	105,86	18,49	A124
Rio Urubu	AM	-2,6336111	-59,60055555	139,32	112,84	A125

Fonte: Autores (2025).

A estimativa da ET_o diária pelo método da FAO-56 (Penman-Monteith) é sintetizada na Equação 1 (Allen; Pereira; Raes, 1998).

$$ET_o = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \left(\frac{900}{T_{mc} + 273} \right) U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U_2)} \quad (1)$$

Em que: ET_o é a evapotranspiração de referência (mm d^{-1}); Δ é a declividade da curva de pressão de vapor de saturação ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); R_n é a radiação líquida diária ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); G é o fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); γ é a constante psicrométrica ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); T_{mc} é a temperatura média compensada do ar ($^\circ\text{C}$); U_2 é a velocidade do vento medida à altura de 2 m (m s^{-1}); e_s é a pressão de saturação de vapor (kPa); e e_a é a pressão de vapor atual do ar (kPa).

A pressão exercida pelo teor saturante de vapor d'água (e_s), média diária, foi descrita pela Equação (2) de Tetens (1930), fazendo a temperatura do ar (T_{ar}) igual a temperatura do termômetro de bulbo seco (T_s), guardando semelhança com a temperatura do termômetro de bulbo úmido (T_u) para a determinação de " e_{su} ". A pressão atual de vapor (e_a) foi obtida pela Equação psicrométrica 3.

$$e_s = 0,6108 * EXP\left(\frac{17,27 * T_{ar}}{237,3 + T_{ar}}\right) \quad (2)$$

$$e_a = e_{su} - A P (T_s - T_u) \quad (3)$$

Em que: $A = 0,00080 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para psicrômetros não ventilados; $A = 0,00067 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para psicrômetros com ventilação

forçada e P é a pressão atmosférica local (kPa).

A declividade da curva de pressão de vapor foi calculada pela Equação 4.

$$\Delta = \frac{4098 \left[0,6108 * e^{\left(\frac{17,27 * T_m}{237,3 + T_m} \right)} \right]}{(T_m + 237,3)^2} \quad (4)$$

Em que: T_m é a temperatura média do ar ($^\circ\text{C}$).

A constante psicrométrica foi estimada a partir das Equações (5) e (6) ou quando não for possível, adotou-se o valor tabelado:

$$\gamma = \frac{C_p * P}{\epsilon * \lambda} = 0,665 * 10^{-3} * P \quad (5)$$

$$P = 101,3 \left(\frac{293 - 0,0065 * Z}{293} \right)^{5,26} \quad (6)$$

Em que: C_p é o calor específico à pressão constante, $1,013 \times 10^{-3} \text{ MJ kg}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$; P é a pressão atmosférica (kPa); ϵ é o coeficiente de peso molecular da quantidade de vapor de água em relação ao ar seco (-1, 0,622); λ é o calor latente de vaporização, $2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$; e Z é a altitude do local (m).

Sabe-se que o fluxo de calor no solo (G) para o período de um dia ou dez dias sob uma superfície de referência gramada é relativamente pequeno, podendo ser ignorado ($G \approx 0$). Para o período mensal G foi pela Equação 7.

$$G_{mês,i} = 0,14 (T_{mês,i} - T_{mês,i-1}) \quad (7)$$

Em que: $T_{mês, i}$ é a temperatura média mensal do ar para o mês i (°C); e $T_{mês, i-1}$ é a temperatura média mensal do mês anterior a i (°C).

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (8)$$

$$R_{ns} = (1 - 0,23) * Q_g \quad (9)$$

$$R_{nl} = \sigma \left(\frac{T_{x,k^4} + T_{n,k^4}}{2} \right) (0,34 - 0,14\sqrt{e_a}) \left(1,35 \frac{Q_g}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (10)$$

$$R_{so} = (0,75 + 2 \times 10^{-5} * Z) Q_o \quad (11)$$

$$Q_o = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r (\omega_s \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s) \quad (12)$$

$$Q_g = Q_o \left[a + b \left(\frac{n}{N} \right) \right] \quad (13)$$

$$d_r = 1 + 0,033 \cos \left(\frac{2\pi}{365} J \right) \quad (14)$$

$$\delta = 0,409 \sin \left(\frac{2\pi}{365} J - 1,35 \right) \quad (15)$$

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \varphi * \tan \delta) \quad (16)$$

Em que: Q_g é a radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) (Angström-Prescott, Equação 13); adotando-se os coeficientes $a = 0,25$ e $b = 0,50$ (Bernardo; Soares; Mantovani, 2006); Q_o é a radiação no topo da atmosfera ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$); G_{sc} é a constante solar, $0,0820 \text{ MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$; σ é a constante de Stefan-Boltzmann, $4,903 \times 10^{-9} \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$; e R_{so} é a radiação solar em um dia sem nuvens ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$). Para converter $1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ em equivalente de lâmina d'água evaporada multiplicar pelo fator 0,408, e expressar o resultado em mm d^{-1} ; Z é a altitude do local (m); d_r é a distância relativa Terra-Sol; J é o dia juliano; δ é a declinação solar (radianos); Φ é a latitude local (radianos); ω_s é o ângulo de radiação no horário do pôr do sol (radianos); $T_{x,k}$ é a temperatura máxima observada durante o período de 24 horas (°K); e $T_{n,k}$ é a temperatura mínima observada durante o período de 24 horas (°K).

O saldo de radiação (R_n) é a diferença entre o saldo de radiação de onda curta (R_{ns}) e o saldo de radiação de onda longa (R_{nl}), estimados pelas Equações (8) a (16).

A estimativa da ET_o diária pelo método de Blaney e Criddle (1950), conhecido como Blaney-Criddle FAO 24, é sintetizada na Equação 17 (Pereira; Villa Nova; Sedyama, 1997).

$$ET_o = (0,457 * T_m + 8,13) * p * c \quad (17)$$

Em que: ET_o é a evapotranspiração de referência (mm mês^{-1}); T_m é a temperatura do ar média (°C); p é a percentagem mensal das horas anuais de luz solar; e c é o coeficiente regional de ajuste da equação (Bernardo; Soares; Mantovani, 2006).

A estimativa da ET_o diária pelo método de Camargo (1971) foi calculada com a Equação 18 (Pereira; Villa Nova; Sedyama, 1997; Pereira; Angelocci; Sentelhas, 2007).

$$ET_o = Q_o * T_m * k_f * ND \quad (18)$$

Em que: ET_o é a evapotranspiração de referência (mm d^{-1}); Q_o é a radiação solar extraterrestre (mm d^{-1} de evapotranspiração equivalente); T_m é a temperatura do ar média ($^{\circ}\text{C}$); k_f é o fator de ajuste que varia com a média da temperatura anual local ($k_f = 0,01$ para $T < 23^{\circ}\text{C}$; $k_f = 0,0105$, para $T = 24^{\circ}\text{C}$;

$k_f = 0,011$, para $T = 25^{\circ}\text{C}$; $k_f = 0,0115$, para $T = 26^{\circ}\text{C}$; e $k_f = 0,012$, para $T > 26^{\circ}\text{C}$); e ND é o número de dias do período analisado.

A estimativa da ET_o diária pelo método de Hargreaves e Samani (1985) foi obtida pela Equação 19.

$$ET_o = 0,0135 * KT * (T_m + 17,8) * Q_o * 0,408 * (T_x - T_n)^{1/2} \quad (19)$$

Em que: ET_o é a evapotranspiração de referência (mm mês^{-1}); KT é o coeficiente de transmissividade atmosférica global, cujo valor para uma região interiorana é de 0,162; e igual a 0,19 para uma região costeira; T_m é a temperatura do ar média ($^{\circ}\text{C}$); Q_o é a radiação no topo da atmosfera ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$); T_x é a temperatura máxima do ar ($^{\circ}\text{C}$); e T_n é a temperatura mínima do ar ($^{\circ}\text{C}$).

A estimativa da ET_o diária pelo método de Jensen-Haise (Jensen; Haise, 1963) foi obtida pela Equação 20.

$$ET_o = R_s(0,0252 * T_m + 0,078) \quad (20)$$

Em que: ET_o é a evapotranspiração de referência (mm mês^{-1}); Q_g é a radiação solar global (mm d^{-1}); e T_m é a temperatura do ar média ($^{\circ}\text{C}$).

A estimativa da ET_o diária pelo método de Thornthwaite (1948) foi obtida pela Equação 21.

$$ET_o = ET_p * Cor \quad (21)$$

Em que: ET_o é a evapotranspiração de referência (mm mês^{-1}); ET_p é a evapotranspiração padrão (mm mês^{-1}); e Cor é o fator de correção da evapotranspiração.

A estimativa da ET_o diária pelo método de Thornthwaite (1948) simplificado por Camargo (1962) foi obtida pela Equação 22.

$$ET_o = 30 * ET_T * Cor \quad (22)$$

Em que: ET_o é a evapotranspiração de referência (mm mês^{-1}); ET_T é a

evapotranspiração potencial diária (mm d^{-1}); e Cor é o fator de correção da evapotranspiração.

A estimativa da ET_o diária pelo método de Makkink (1957) foi obtida pela Equação 23 (Pereira; Villa Nova; Sediya, 1997; Turco; Perecin; Pinto Junior, 2008).

$$ET_o = (0,61 * Q_g * W) - 0,12 \quad (23)$$

Em que: ET_o é a evapotranspiração de referência (mm d^{-1}); Q_g é a radiação solar global medida ou estimada, mm d^{-1} ; W é o fator de ponderação, estimado por meio das expressões lineares propostas por Wilson e Rouse (1972) e Viswanadham, Silva Filho e Andre (1991) para temperaturas de bulbos úmidos variando de 0 a 16°C e $16,1$ a 32°C , respectivamente.

A estimativa da ET_o diária pelo método de Blaney e Criddle (1950) adaptado Frevert, Hill e Braaten (1983) foi obtida pela Equação 24 (Fernandes *et al.*, 2010).

$$ET_o = a + b * p(0,457 * T_m + 8,13) \quad (24)$$

Em que: ET_o é a evapotranspiração de referência (mm d^{-1}); “a” e “b” são os coeficientes de ajuste; “p” é a percentagem mensal das horas anuais de luz solar; e T_m é a temperatura do ar média ($^{\circ}\text{C}$).

As estimativas de ET_o foram analisadas por regressão linear (Equações 25 a 29), tendo como variável dependente (Y), os métodos de Blaney-Criddle, Camargo, Hargreaves-Samani, Jensen-Haise, Thornthwaite, Makkink, FAO-24 da radiação e Blaney-Criddle-Frevert; como

variável independente (X), os valores de ET_o estimados pelo método de Penman-Monteith-FAO 56.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X \quad (25)$$

Em que: Y é o valor estimado para os métodos empíricos; β_1 é o coeficiente angular; β_0 é o coeficiente linear; e X é o valor estimado pelo método padrão Penman-Monteith-FAO 56.

$$\beta_0 = Y - \beta_1 X \quad (26)$$

$$\beta_1 = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} \quad (27)$$

$$S_{xy} = \sum (X_t - \bar{X})(Y_t - \bar{Y}) \quad (28)$$

$$S_{xx} = \sum (X_i - \bar{X})^2 \quad (29)$$

Para verificar se a variável independente (X-Penman-Monteith-FAO 56) contribui para a previsão da variável dependente (Y-métodos empíricos) utilizou o valor de $\hat{B}_1$ para testar se $B_1 = 0$, assumindo o teste de hipótese: $H_0: \beta_1 = 0$, ou seja, não existe a regressão (X não contribui para a previsão de Y); $H_1: \beta_1 \neq 0$, isto é, existe a regressão (X contribui para a previsão de Y).

O “t” estatístico segue uma distribuição “t” de Student com n-2 graus de liberdade, permitindo a realização do teste de hipóteses. Assim, para o nível de significância de 5%, o valor de “t” calculado

for igual ou superior ao valor tabelado, a hipótese nula é rejeitada, ou seja, a regressão existe.

A correlação entre o método de Penman-Monteith-FAO 56 e os métodos empíricos foi realizada com base em indicadores estatísticos a fim de se observar a precisão dada pelo coeficiente de correlação (r) que está associado ao desvio entre os valores estimados e medidos, indicando o grau de dispersão dos dados obtidos em relação à média, utilizando-se a Equação 30.

$$r = \sqrt{\frac{[\sum (X_i - X_m)(Y_i - Y_m)]^2}{\sum (X_i - X_m)^2 \sum (Y_i - Y_m)^2}} \quad (30)$$

Em que: X_i é o valor estimado pelo método Penman-Monteith FAO 56; X_m é a média do método de Penman-Monteith FAO 56; Y_i é o valor estimado do método avaliado; e Y_m é a média do método avaliado.

A exatidão na estimativa da ET_o em relação ao modelo padrão foi obtida por meio do cálculo do índice “d” (Equação 31), que varia de 0 a 1 (Willmott *et al.*, 1985).

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (Y_i - X_i)^2}{\sum (|Y_i - X_m| + |X_i - X_m|)^2} \right] \quad (31)$$

O coeficiente de segurança ou desempenho “c” (Tabela 2), foi calculado pelo produto de r e d ($c = r*d$) (Camargo; Sentelhas, 1997).

Tabela 2. Valores do coeficiente de desempenho.

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

Fonte: Camargo e Sentelhas (1997)

A quantificação do erro padrão da estimativa (EPE) foi obtida pela Equação 32, enquanto a do erro padrão da estimativa ajustado (EPEA) da regressão foi obtida pela Equação 33 e por meio da relação dos valores médios, expressa em porcentagem (Equação 34). Os erros-padrão são uma medida de dispersão das observações ao redor da linha de regressão, adotando a mesma medida da variável dependente, ou seja, mede o quão distante a variável dependente Y está do seu valor predito (Stock; Watson, 2010).

$$EPE = \sqrt{\frac{\sum (X_i - Y_i)^2}{n-1}} \quad (32)$$

$$EPE = \sqrt{\frac{\sum (Y_i - \bar{Y})^2}{n-2}} \quad (33)$$

$$\% = \left(\frac{Y_i}{X_i} \right) * 100 \quad (34)$$

Em que: X_i é a estimativa da ET_o pelo modelo padrão, FAO-56 Penman-Monteith; Y_i é a estimativa da ET_o obtida por cada um dos modelos avaliados; e n é o número de observações.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A modelagem da evapotranspiração de referência, após as estimativas de dados meteorológicos falhos pelo método organizado dentro da estação, que tem como vantagem a independência de dados de outras estações, foi realizada a partir das discussões relacionais apresentadas na Tabela 3. O planejamento de áreas agrícolas e a tomada de decisão precisam de dados confiáveis de evaporação e de evapotranspiração.

Os elementos meteorológicos (Tabela 3) ajudam a descrever as condições

médias atmosféricas do município de Itacoatiara, de maneira que a temperatura máxima do ar variou entre 30,23 °C (abril) e 33,97 °C (setembro), e a mínima entre 23,80 °C (janeiro) e 24,64 °C (outubro). A menor amplitude total foi observada na temperatura mínima do ar (0,84 °C). Barbosa *et al.* (2022) e Teixeira Filho, Barbosa e Ferreira (2023) observaram ao desenvolverem estudos em municípios amazonenses, menor amplitude total na temperatura mínima, cujos valores foram iguais a 0,94 °C e 1,51 °C, respectivamente.

Tabela 3. Valores médios mensais da temperatura do ar máxima (T_x) e mínima (T_n), da umidade relativa do ar máxima (UR_x) e mínima (UR_n), da velocidade do vento a 2 m de altura (U_2), da radiação solar global (Q_g) e da insolação (n), após o preenchimento de dados faltantes (2009 a 2023), Itacoatiara, AM

Meses	T_x °C	T_n °C	UR_x %	UR_n %	U_2 m s ⁻¹	Q_g MJ m ⁻² d ⁻¹	n h
J	30,70	23,80	92,71	62,65	0,72	13,42	4,40
F	30,28	23,82	93,39	65,85	0,70	14,47	3,53
M	30,47	23,89	93,56	65,71	0,71	15,98	4,14
A	30,23	24,04	93,88	67,16	0,63	13,67	4,40
M	30,54	24,25	93,64	65,98	0,60	13,79	5,11
J	31,14	24,00	92,97	61,90	0,58	15,12	6,79
J	31,75	23,89	92,97	57,69	0,66	17,99	7,54
A	33,08	24,18	90,88	50,49	0,81	19,62	8,24
S	33,97	24,58	89,17	48,93	0,85	19,36	7,88
O	33,70	24,64	89,42	49,93	0,79	18,83	7,00
N	33,00	24,55	90,57	54,14	0,77	18,35	5,91
D	31,57	24,10	92,20	60,65	0,71	13,85	5,08

Fonte: Autores (2025)

A umidade relativa do ar, máxima, variou de 89,17 % (setembro) e 93,88 % (abril) e a mínima entre 48,93% (setembro) e 67,16 % (abril) (Tabela 3), respectivamente no inverno e no verão amazônico. Mesmo no verão amazônico, a atmosfera local tinha bastante umidade, o que denota menor demanda de água para as culturas agrícolas, e certamente, menor déficit hídrico atmosférico.

Pereira, Angelocci e Sentelhas (2007) afirmam que a velocidade do vento é afetada, também, pela rugosidade da superfície criada pelos obstáculos (vegetação, construções, relevo montanhoso etc.), e pela distância vertical acima da superfície em que ela é medida. Quanto mais próximo da superfície, maior o efeito do atrito com o terreno, desacelerando o movimento e diminuindo a velocidade de deslocamento do ar. Esse bloqueio imposto pela superfície faz com que bolhas de ar de maior velocidade se desloquem para baixo, gerando um impulso repentino no ar próximo ao chão. A esse aumento brusco na velocidade do vento denomina-se de rajada. Contudo, o vento a dois metros de altura na estação (Tabela 3), com mínimo de 0,58 m s⁻¹

¹ (2,09 km h⁻¹, junho) e máximo de 0,85 m s⁻¹ (3,06 km h⁻¹, setembro), leva a crer que a evapotranspiração mensurada foi a causa principal do aumento da perda de água da planta para a atmosfera. Conforme a classificação proposta na escala de Beaufort, são ventos de força 1, da categoria quase calmo. Essa categoria de vento, pode favorecer as atividades de planejamento agrícola na região, bem como a tomada de decisão nas operações a serem realizadas na agricultura (Teixeira Filho; Barbosa; Ferreira, 2023). Teixeira Filho e Arruda (2024), avaliando o desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Presidente Figueiredo, AM, verificaram que a velocidade do vento foi inferior a 1,0 m s⁻¹, em todos os meses do ano, sendo o valor máximo observado em março (0,71 m s⁻¹, equivalente a 2,54 km h⁻¹) e o mínimo em maio (0,44 m s⁻¹, ou 1,58 km h⁻¹), mantendo-se praticamente constante ao longo do ano, o que correspondeu à 1 na escala de Beaufort, caracterizada como “quase calmo”, apresentando também condição favorável para o planejamento agrícola e a tomada de decisões nas operações na agricultura.

Na Tabela 4 constam as médias diárias da evapotranspiração de referência (ET_o) para o município de Itacoatiara, AM, de cada método empírico avaliado em comparação com o método da FAO 56 Penman-Monteith. Nesta Tabela, nota-se que os modelos de Makkink e FAO 24 da Radiação (Tabela 3, Figura 1) subestimaram a ET_o durante todos os meses do ano, com diferenças entre os valores médios de ET_o

variando entre -0,56 e -0,78 $mm\ d^{-1}$ e entre -0,53 e -0,93 $mm\ d^{-1}$, respectivamente. Esta tendência também foi constatada por Teixeira Filho e Braga (2023) para os modelos de Makkink e Blaney-Criddle-Frevert que subestimaram a ET_o durante todos os meses do ano, com diferenças entre os valores médios de ET_o variando entre -0,40 e -0,49 $mm\ d^{-1}$ e entre -0,40 e -0,90 $mm\ d^{-1}$, respectivamente.

Tabela 4. Médias da evapotranspiração de referência (ET_o , $mm\ d^{-1}$) estimadas pelo método padrão de Penman-Monteith [$ET_{o(P-M)}$]; e pelos métodos empíricos de Blaney-Criddle [$ET_{o(B-C)}$], de Camargo [$ET_{o(C)}$], de Hargreaves-Samani [$ET_{o(H-S)}$], de Jensen-Haise [$ET_{o(J-H)}$], de Thornthwaite [$ET_{o(T)}$], de Makkink [$ET_{o(M)}$], da FAO 24 da Radiação [$ET_{o(R)}$] e de Blaney-Criddle-Frevert [$ET_{o(BC-F)}$], Itacoatiara, AM.

Meses	ET_{oP-M}	ET_{oB-C}	ET_{oH-S}	ET_{oJ-H}	ET_{oC}	ET_{oT}	ET_{oM}	ET_{oR}	ET_{oB-C-F}
J	3,10	3,37	3,99	4,19	5,04	4,83	2,41	2,62	3,25
F	3,25	3,50	3,89	4,49	5,07	4,74	2,60	2,43	2,92
M	3,47	3,28	3,84	4,98	4,96	4,75	2,88	2,53	3,09
A	3,00	3,42	3,49	4,25	4,64	4,70	2,45	2,44	2,99
M	2,96	3,46	3,31	4,33	4,38	4,76	2,48	2,44	3,22
J	3,19	3,97	3,48	4,77	4,34	4,80	2,74	2,77	3,80
J	3,77	4,01	3,85	5,72	4,59	4,89	3,29	3,07	4,20
A	4,28	4,31	4,46	6,40	5,06	5,13	3,64	3,45	4,83
S	4,42	4,55	4,85	6,45	5,40	5,33	3,62	3,49	4,88
O	4,31	4,08	4,76	6,25	5,38	5,34	3,51	3,26	4,69
N	4,14	3,98	4,48	6,02	5,22	5,27	3,40	2,93	4,14
D	3,25	3,56	4,12	4,41	5,04	5,02	2,51	2,72	3,55
Média	3,60	3,79	4,04	5,19	4,93	4,96	2,96	2,85	3,80
ME-PM ^(*)	-	0,19	0,45	1,59	1,33	1,37	-0,64	-0,75	0,20

Nota: ^(*) - Diferença entre as médias da evapotranspiração de referência (ET_o) dos métodos empíricos (ME) em relação ao método padrão da FAO-56 Penman-Monteith (P-M). **Fonte:** Autores (2025)

Os modelos que superestimaram a ET_o (Tabela 4, Figura 1) foram Hargreaves-Samani, Jensen-Haise, Camargo e Thornthwaite em relação ao modelo de Penman-Monteith em todos os meses do ano, cujas diferenças entre os valores médios (mínimo e máximo) variaram entre 0,34 e 0,43 $mm\ d^{-1}$; 1,23 e 2,03 $mm\ d^{-1}$; 1,38 e 0,98 $mm\ d^{-1}$; e entre 1,74 e 0,92 $mm\ d^{-1}$, respectivamente. No município de Benjamin Constant, Teixeira Filho e Braga (2023) também encontram tendência semelhante para os modelos de Hargreaves-Samani,

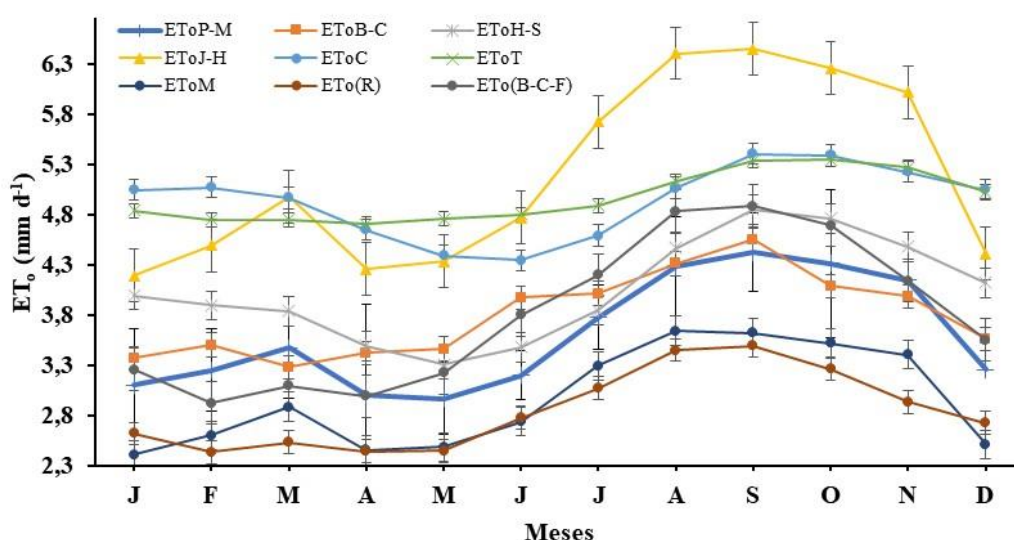
Jensen-Haise, Camargo, Thornthwaite e FAO 24 da Radiação em relação ao modelo de Penman-Monteith em todos os meses do ano, cujas diferenças entre os valores médios (mínimo e máximo) variaram entre 1,16 e 1,14 $mm\ d^{-1}$; 1,23 e 1,98 $mm\ d^{-1}$; 1,41 e 1,15 $mm\ d^{-1}$; 1,31 e 0,94 $mm\ d^{-1}$; entre 0,50 e 0,78 $mm\ d^{-1}$, respectivamente.

O método de Blaney-Criddle superestimou a ET_o nos meses de janeiro, fevereiro, abril, maio, junho, julho, agosto, setembro e dezembro, com variações entre 0,31 e 0,13 $mm\ d^{-1}$. Também foram

observadas três subestimativas nos meses de março, igual a $-0,20 \text{ mm d}^{-1}$, outubro, igual a $-0,23 \text{ mm d}^{-1}$ e novembro, igual a $-0,16 \text{ mm d}^{-1}$ (Tabela 4, Figura 1). Já o método de Blaney-Criddle-Frevest superestimou a ET_o nos meses de janeiro, maio, junho, julho, agosto, setembro e outubro, novembro e dezembro, variando entre $-0,05$ e $0,46 \text{ mm d}^{-1}$. Também foram observadas quatro subestimativas nos meses de fevereiro, igual

a $-0,33 \text{ mm d}^{-1}$, março, igual a $-0,38 \text{ mm d}^{-1}$, abril, igual a $-0,01 \text{ mm d}^{-1}$ e novembro, igual a $-0,01 \text{ mm d}^{-1}$, abril (Tabela 4, Figura 2). Araújo, Costa e Santos (2007) verificaram para Boa Vista, RR, subestimação, em todos os meses do ano, da evapotranspiração calculada pelo método padrão de Penman-Monteith, diferente do que foi verificado nesta pesquisa.

Figura 1. Comportamento mensal da evapotranspiração de referência, média diária - Itacoatiara, AM



Nota: ET_{oP-M} (Penman-Monteith), ET_{oB-C} (Blaney-Criddle), ET_{oC} (Camargo), ET_{oH-S} (Hargreaves-Samani), ET_{oJ-H} (Jensen-Haise), ET_{oT} (Thornthwaite), ET_{oT-C} (Thornthwaite-Camargo), ET_{oM} (Makkink), ET_{oR} (FAO-24 Radiação) e ET_{oB-C-F} (Blaney-Criddle-Frevert). **Fonte:** Autores (2025)

Ferraz (2008), Carvalho e Delgado (2016), Ferreira *et al.* (2020), Souza e Sousa (2020) e Barbosa *et al.* (2022), Teixeira Filho e Braga (2023) verificaram para municípios da Região Norte, tendência de superestimação da evapotranspiração potencial de referência pelos métodos de Blaney-Criddle, Camargo, Jensen-Haise, Thornthwaite e FAO 24 da Radiação durante todos os meses do ano. Teixeira Filho e Braga (2023) informam que isto pressupõe uma tendência no comportamento destes modelos ajustados a Penman-Monteith-FAO 56 em regiões cujo clima é classificado no grupo A, segundo a classificação Climática de Köppen (1948), o qual Almeida (2016)

caracteriza áreas com clima megatérmico, tropical chuvoso, com temperatura média do mês mais frio maior que 18°C , e a média anual da precipitação pluvial superior a 700 mm.

Na Figura 2 consta o grau de interrelacionamento entre a variável independente, estimada pelo método Penman-Monteith-FAO 56, e a variável dependente, estimadas pelos métodos de Blaney-Criddle, Camargo, Hargreaves-Samani, Jensen-Haise, Thornthwaite, Makkink, FAO 24 da Radiação e Blaney-Criddle-Frevert. Dessa forma, um bom ajustamento entre as variáveis envolvidas, deve estar associado a um pequeno "erro

total", o que pressupõe que o coeficiente de correlação, a medida estatística que dimensiona o grau de relação entre duas ou mais variáveis, deve estar próximo de -1 ou +1.

Existe relação funcional que explica grande parte da variação da ET_o (Blaney-Criddle, Camargo, Hargreaves-Samani, Jensen-Haise, Thornthwaite, Makkink, FAO 24 da Radiação e Blaney-Criddle-Frevert) em relação a ET_o estimada pelo método padrão de Penman-Monteith. Contudo, uma parcela da variabilidade dos modelos não explicada pelo método padrão será atribuída ao acaso, ou seja, ao erro aleatório. É possível estabelecer (estimar) uma relação funcional entre a ET_o simplificada (Blaney-Criddle, Camargo, Hargreaves-Samani, Jensen-Haise, Thornthwaite, Makkink, FAO 24 da Radiação e Blaney-Criddle-Frevert) e a ET_o padrão (Penman-Monteith-FAO 56), descrevendo quanto a perda de água do método padrão afeta os demais métodos simplificados. Isso implica na variação da necessidade de água para as culturas agrícolas, e também para o balanço atmosférico, uma vez que, parcela da variabilidade dos modelos empíricos, não explicada pelo método padrão será atribuída ao acaso, ou seja, ao erro aleatório.

Na Figura 2, Jensen-Haise apresentou a melhor correlação ($R^2 = 0,97$) para o período estudado e Camargo a pior correlação ($R^2 = 0,47$). Segundo Devore (2018), muitas variáveis x e y podem até parecer relacionadas umas com a outra, mas não de maneira determinística. Em outras palavras, a existência de um "bom" modelo de regressão não implica necessariamente em relação de causa e efeito ou de dependência entre as variáveis.

O modelo combinado de Jensen-Haise apresenta ótima correlação linear ($R^2 = 0,97$), forte superestimativa sistemática ($ME-PM = +1,59$) e com alto erro associado ($EPE = 1,70 \text{ mm d}^{-1}$), ou seja, está muito afastado em relação ao modelo padrão,

mesmo tendo demonstrado excelente ajuste. Na prática, isso resulta em maior consumo de água, ou melhor, superdimensionamento da lâmina de água exigida em projetos de irrigação para atender a demanda da cultura agrícola cultivada.

A superestimativa por Jensen-Haise, um modelo que combina radiação e temperatura de forma linear, pode ser explicada pela sua incapacidade de representar o termo aerodinâmico, ou seja, pela contribuição do vento na evapotranspiração da água. Em ambientes de baixa velocidade do vento ($U_2 < 1 \text{ m s}^{-1}$) e alta umidade, como em Itacoatiara, a evapotranspiração é fortemente limitada pelo déficit de pressão de vapor (DPV). Como Jensen-Haise não incorpora o DPV, ele superestima a perda de água, especialmente nos meses mais secos, quando o DPV é ligeiramente maior. O alto R^2 , nesse caso, apenas indica que o modelo acompanha a sazonalidade da radiação, mas com um viés sistemático.

Os métodos térmicos (Jensen-Haise e Thornthwaite) são sensíveis à temperatura, logo em regiões de clima úmido a tendência de superestimação, como abordado nas condições locais estudadas.

O modelo de Camargo apresentou valor observado do teste de "t" de 2,45, que foi maior que o valor crítico de "t" para 10 graus de liberdade, de 2,23, a 95% de confiança. Assim, a hipótese nula foi rejeitada, ou seja, o resultado do teste é estatisticamente significativo, o que demonstra que o modelo de Penman-Monteith FAO 56 afeta o comportamento do modelo de Camargo ($R^2 = 0,47$, Figura 2).

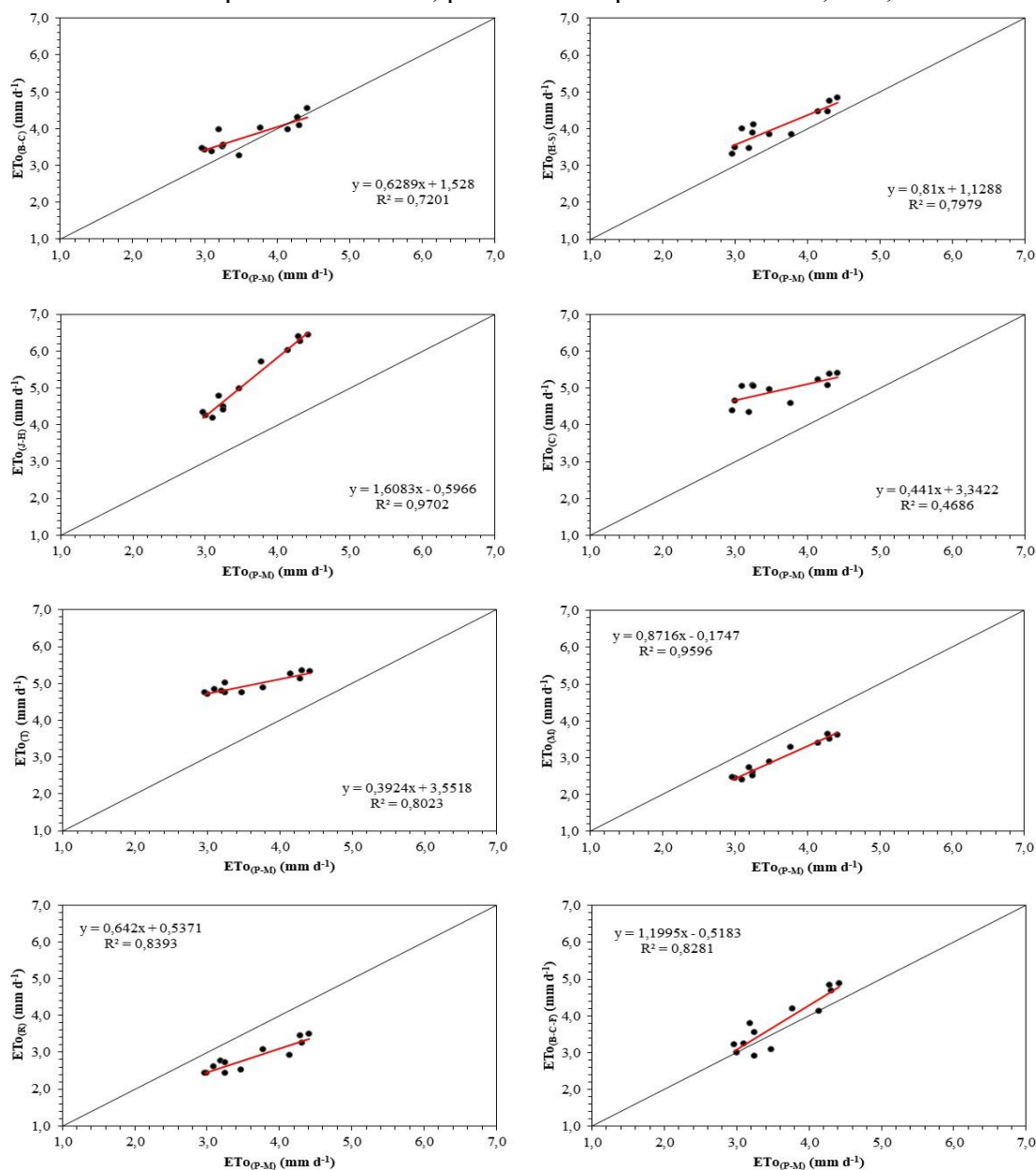
O coeficiente angular da reta de regressão indica o quanto varia a média de Y em consequência do aumento de uma unidade da variável X . Os coeficientes angulares (Figura 2) de Thornthwaite (+0,3924), Camargo (+0,4410), Blaney-Criddle (+0,6289), FAO 24 da Radiação (+0,6420), Hargreaves-Samani (+0,8100), Makkink (+0,8716), Blaney-Criddle-Frevert

(+1,1995) e Jensen-Haise (+1,6083), indicam que para cada 1 mm d⁻¹ de água evapotranspirada, no intervalo da série histórica considerada, a ET_o cresce em média entre 0,3924 mm d⁻¹ e 1,6083 mm d⁻¹.

O coeficiente linear da reta é o ponto em que a reta intercepta o eixo y, então quando x=0, y = n. Dos coeficientes obtidos,

o mais próximo de zero foi observado no modelo de Makkink (-0,1747), sendo os demais como segue, Jensen-Haise (-0,5966), Blaney-Criddle-Frevert (-0,5183), FAO 24 da Radiação (+0,5371), Hargreaves-Samani (+1,1288), Blaney-Criddle (+1,5280), Camargo (+3,3422) e Thornthwaite (+3,5518) (Figura 2).

Figura 2. Regressão linear simples entre o método padrão (Penman-Monteith FAO 56) e os métodos empíricos estudados, para o Município de Itacoatiara, AM, 2009 a 2023



Nota: Modelos empíricos de ET_o: Blaney-Criddle [ET_o(B-C)], Hargreaves-Samani [ET_o(H-S)], Jensen-Haise [ET_o(J-H)], Camargo [ET_o(C)], Thornthwaite [ET_o(T)], Thornthwaite-Camargo [ET_o(T-C)], Makkink [ET_o(M)], FAO 24 da Radiação [ET_o(R)] e Blaney-Criddle-Frevert [ET_o(B-C-F)]; método padrão: Penman-Monteith [ET_o(P-M)]. **Fonte:** Autores (2025)

O erro padrão da estimativa (Tabela 5) variou entre 0,36 e 1,70 mm d⁻¹, com os modelos Blaney-Criddle, Makkink, Blaney-Criddle-Frevert e Hargreaves-Samani apresentando os menores valores, o que demonstra a precisão desses em relação aos

valores de ET_o obtidos pelo método padrão de Penman-Monteith FAO 56. Em outras palavras, esse erro indica o quanto a média dos modelos dependentes podem variar em relação ao modelo padrão.

Tabela 5. Indicadores estatísticos, Itacoatiara, AM

Modelos	%	EPE mm d ⁻¹	EPEA mm d ⁻¹	d	r	R ²	c	Desempenho
Blaney-Criddle	105,38	0,36	0,23	1,00	0,85	0,72	0,85	Muito Bom
Hargreaves-Samani	112,38	0,53	0,24	1,00	0,89	0,80	0,89	Ótimo
Jensen-Haise	144,24	1,70	0,1645	0,96	0,99	0,97	0,95	Ótimo
Camargo	137,05	1,45	0,27	0,97	0,68	0,47	0,67	Bom
Thornthwaite	138,01	1,47	0,11	0,97	0,90	0,80	0,87	Ótimo
Makkink	82,30	0,68	0,10	0,99	0,98	0,96	0,97	Ótimo
FAO-24 da Radiação	79,13	0,82	0,1640	0,98	0,92	0,84	0,90	Ótimo
Blaney-Criddle-Frevert	105,54	0,39	0,32	1,00	0,91	0,83	0,91	Ótimo

Nota: Indicadores estatísticos utilizados na avaliação dos métodos: percentagem em relação ao método padrão de Penman-Monteith (%), erro-padrão de estimativa (EPE, mm d⁻¹), erro-padrão de estimativa ajustado (EPEA, mm d⁻¹), coeficiente de correlação (r), coeficiente de determinação (R²), índice de concordância (d), coeficiente de desempenho (c) e classificação baseada no coeficiente de desempenho. **Fonte:** Autores (2025)

O erro padrão da estimativa ajustado variou de 0,10 a 0,32 mm d⁻¹, sendo os menores valores observados nos modelos de Makkink, Thornthwaite, FAO-24 da Radiação, Jensen-Haise, Hargreaves-Samani e Blaney-Criddle-Frevert (Tabela 5), confirmando que a linha de regressão teve ajuste ótimo aos dados dos modelos investigados, visto que os valores dos coeficientes de determinação são altos.

Os métodos de Makkink (c = 0,97), Jensen-Haise (0,95), Blaney-Criddle-Frevert (0,91), FAO 24 da Radiação (0,90) e Hargreaves-Samani (0,89) tiveram desempenho “ótimo” (Tabela 5). Teixeira Filho e Braga (2023), Teixeira Filho, Barbosa e Ferreira (2023), avaliando o desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Benjamin Constant e Manicoré, AM, também observaram que os modelos de Makkink (c = 0,98), FAO 24 da Radiação (0,98), Jensen-Haise (0,95), Hargreaves-Samani (0,90) e Blaney-Criddle-Frevert (0,90) e Blaney-Criddle (0,85) apresentaram “ótimo” coeficiente de

desempenho. Ferreira *et al.* (2020) comparando vários métodos para o município de Parintins, AM, classificaram o modelo de Jensen-Haise com desempenho “ótimo” (c = 0,85). Araújo Araújo, Costa e Santos (2007) utilizando o modelo de Blaney-Criddle para a localidade de Boa Vista, RR, obtiveram desempenho “ótimo” (c = 0,92). Mendoza, Menezes e Dias (2016) classificaram as estimativas do método Hargreaves-Samani como “medianas” para a região de São Luís, MA. Todavia, os autores ressaltaram que, entre os métodos que utilizam dados de temperatura, esse obteve o melhor desempenho (c = 0,64).

Enquanto a absorção de água pela planta for mantida na mesma proporção que a perda, não haverá déficit (Visser, 1964). Como os modelos de Makkink, Jensen-Haise, Blaney-Criddle-Frevert, FAO 24 da Radiação e Hargreaves-Samani (0,89) tiveram desempenho “ótimo” (Tabela 5), eles podem ser adotados na ausência de dados que permitam calcular a ET_o por Penman-Monteith. Bernardo, Soares e Mantovani (2006) afirmam que a água

necessária é a quantidade de água requerida pela cultura, em determinado período de tempo, de modo a não limitar seu crescimento e sua produção, nas condições climáticas locais, ou seja, é a quantidade de água necessária para atender à evapotranspiração e à lixiviação dos sais do solo. Pela própria definição de água necessária à cultura, a evapotranspiração constitui a maior e mais importante parte.

O modelo combinado de Makkink, assim como o de Jensen-Haise apresenta ótima correlação linear ($R^2 = 0,96$), média subestimativa sistemática, consistente ao longo do ano ($ME-PM = -0,64$) e com baixo erro associado ($EPE = 0,68 \text{ mm d}^{-1}$), ou seja, pouco afastado em relação ao modelo padrão, demonstrando excelente ajuste. A ausência do termo aerodinâmico, baixa velocidade do vento ($U_2 < 1 \text{ m s}^{-1}$) e a alta umidade relativa do ar acarretam a subestimativa, bem com a existência do fator “W” não calibrado para o clima amazônico, que representa a parte fracionária da radiação solar utilizada na ET_o , varia com a temperatura e a altitude, portanto, o que merece atenção em trabalhos futuros.

O modelo de Blaney-Criddle-Frevert apresentou desempenho “muito bom” e o de Camargo, desempenho “bom” (Tabela 5). Souza e Sousa (2020) avaliaram o método de Camargo ($c = 0,33$) com desempenho “péssimo” para a região de Rio Branco, AC. O desempenho insatisfatório, desse método pode ser atribuído à simplicidade de sua equação, que confere menor precisão ao método, posto que ela apresenta um número reduzido de parâmetros de entrada para a estimativa da evapotranspiração (Santana *et al.*, 2018).

Segundo Vaadia, Raney e Hagan (1961), Kramer (1963), havendo um atraso na absorção de água em relação às perdas, surgirão déficits que podem reduzir, irreversivelmente, a produção potencial das culturas. Portanto, deve-se ter atenção na escolha do método de estimativa da ET_o , que pode variar conforme a localização

geográfica do local onde será implantado o projeto agrícola.

6 CONCLUSÃO

Nas condições em que foi realizado este trabalho, pode -se concluir que:

- Os resultados são válidos dentro das incertezas associadas ao método de preenchimento de falhas utilizado, que carece de validação adicional;
- O “t” estatístico segue uma distribuição “t” de Student com $n-2$ graus de liberdade, e o teste de hipóteses pode ser realizado. Assim, para o nível de significância de 5%, o valor de “t” calculado, sendo igual ou superior ao valor tabelado, a hipótese nula é rejeitada, ou seja, a regressão existe;
- O teste de hipótese revelou que o método padrão de Penman-Monteith contribui para a previsão dos modelos empíricos estudados;
- O método de Makkink apresentou o melhor desempenho global. Embora tenha apresentado melhor desempenho anual, diferenças sazonais foram observadas, especialmente no período menos chuvoso;
- Os métodos de Jensen-Haise, Blaney-Criddle-Frevert e FAO 24 da Radiação apresentaram elevada correlação. Embora Jensen-Haise e Blaney-Criddle-Frevert tenham apresentado tendência à superestimação e o método FAO 24 à subestimação, devendo ser utilizados com cautela. Os resultados referem-se às condições locais analisadas, sendo recomendada validação adicional em outras localidades de clima semelhante;
- Estudos posteriores devem avaliar o desempenho desses modelos em outras localidades da região Amazônica. E, quando possível, estudar o efeito da sazonalidade nos modelos para uma

futura recomendação de modelo regional.

7 AGRADECIMENTOS

Aos professores, Doutor Lucas Melo Vellame e Doutor Aureo Silva de Oliveira, pelo aceite e supervisão durante o desenvolvimento do Projeto de Pós-Doutorado, e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Água e Solo da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, pela acolhida e aprendizado adquirido. E ao Doutor Francisco Adriano de Carvalho Pereira, sempre solícito e pelo convite para participar de suas aulas.

8 REFERÊNCIAS

ALLEN R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D. **Crop evapotranspiration**. guidelines for computing crop water requirements (Inseri subtítulo completo). Rome: FAO, 1998. (Irrigation and Drainage Paper, 56).

ALLEN, R. J.; DEGAETANO, A. T. Estimating Missing Daily Temperature Extremes Using an Optimized Regression Approach. **International Journal of Climatology**, Reino Unido, v. 21, n. 11, p. 1305-1319, 2001.

ALMEIDA, H. A. de. **Climatologia aplicada à geografia**. Campina Grande: EDUEPB, 2016. Disponível em: <https://editora.ifpb.edu.br/index.php/uepb/catalog/book/128>. Acesso em: 01 jul. 2026.

ARAÚJO, W. F.; COSTA, S. A. A.; SANTOS, A. E. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) para Boa Vista, RR. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 20, n. 4, p. 84-88, 2007.

BARBOSA, J. V. G.; ARRUDA, D. A.; TEIXEIRA FILHO, A. J.; FERREIRA, J. C. C. Avaliação do desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Maués, Amazonas. **Irriga**, Botucatu, v. 27, n. 1, p. 79-91, jan./mar. 2022.

BERLATO, M. A.; MOLION, L. B. **Evaporação e evapotranspiração**. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Agronômicas, 1981. (Boletim Técnico IPAGRO, n. 7).

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 8. ed. atual. e ampl. Viçosa: UFV, 2006.

BLANEY, H. F.; CRIDDLE, W. D. **Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data**. Washington, DC: United States Department of Agriculture Soil Conservation Service, 1950.

BRUBACHER, J. P.; OLIVEIRA, G. G.; GUASSELLI, L. A. Preenchimento de falhas e espacialização de dados pluviométricos: desafios e perspectivas. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 35, n. 4, p. 615-629, 2020.

CAMARGO, A. P. Contribuição para a determinação da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v. 21, n. 12, p. 163-213, 1962. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0006-87051962000100012>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/brag/a/nvq3yszWN C78k9nmRytBTcJ/?lang=pt>. Acesso em: 10 out. 2023.

- 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. **Balanço hídrico no Estado de São Paulo**. 3. ed. Campinas: Instituto Agrônomo, 1971. (Boletim, 116).
- CARVALHO, R. L. S.; DELGADO, A. R. S. Estimativas da evapotranspiração de referência do município de Ariquemes (RO) utilizando os métodos Penman-Monteith FAO e Hargreaves-Samani. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 10, n. 6, p. 1038-1048, 2016. DOI: 10.7127/RBAI.V10N600497. Disponível em: <http://www.inovagri.org.br/revista/index.php/rbai/article/view/497>. Acesso em: 09 mar. 2023.
- CHRISTOFIDIS, D. Água, irrigação e agropecuária sustentável. **Revista Política Agrícola**, Brasília, DF, ano 22, n. 1, p. 115-127, jan./fev./mar. 2013. Disponível em: <https://seer.sede.embrapa.br/index.php/RPA/article/viewFile/286/247>. Acesso em: 27 mar. 2025.
- CORREA, M. de J.; LIMA, K. C.; SILVA, J. M. da; MEDEIROS, G. C. Filling of faults in climatological air temperature series in brazilian state capitals from 1980 to 2017. **Revista Brasileira de Climatologia**, Dourados, v. 29, p. 251-272, 2021. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/rbclima/article/view/15176>. Acesso em: 02 jul. 2026.
- CLIMATEDATA. **Clima Itacoatiara (Brasil)**. Oedheim: AM online, 2025. Disponível em: <https://pt.climate-data.org/america-do-sul/brasil/amazonas/itacoatiara-879515/>. Acesso em: 25 mar. 2025.
- DEVORE, J. L. **Probabilidade e estatística para engenharia e ciências**. São Paulo: Cengage, 2018.
- FANTE, K. P.; SANT'ANNA NETO, J. L. Técnicas estatísticas para a homogeneização de dados de temperatura em séries temporais climatológicas. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 18, p. 140-156, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5380/abclima.v18i0.43202>. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/43202>. Acessado em: 16 out. 2025.
- 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).
- FERRAZ, P. A. **Estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) para Região de Rio Branco - Acre**. 2008. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Produção Vegetal) – Universidade Federal do Acre, Rio Branco, 2008.
- FERREIRA, J. C. C.; BARBOSA, J. V. G.; ARRUDA, D. A.; TEIXEIRA FILHO, A. de J. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência no município de Parintins, AM. In: SALES, F. O. (org.). **Ciências exatas e da terra: aprendizado, integração e necessidades do país**. Ponta Grossa: Atena, 2020. p. 66-76.
- FREVERT, D. K.; HILL, R. W.; BRAATEN, B. C. Estimation of FAO evapotranspiration coefficients. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 109, n. 2, p. 265-270, 1983.

- HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. Reference crop evapotranspiration from temperature. **Applied Engineering in Agriculture**, St Joseph, v. 1, n. 2, p. 96-99, 1985. DOI: <http://dx.doi.org/10.13031/2013.26773>. Disponível em: [https://www.scirp.org/\(S\(i43dyn45teexjx455qlt3d2q\)\)/reference/referencespapers.aspx?referenceid=1225457](https://www.scirp.org/(S(i43dyn45teexjx455qlt3d2q))/reference/referencespapers.aspx?referenceid=1225457). Acesso em: 10 out. 2023.
- HOOGENBOOM, G.; PORTER, C. H.; SHELIA, V.; BOOTE, K. J.; SINGH, U.; PAVAN, W.; OLIVEIRA, F. A. A.; MORENO-CADENA, L. P.; FERREIRA, T. B.; WHITE, J. W.; LIZASO, J. I.; PEQUENO, D. N. L.; KIMBALL, B. A.; ALDERMAN, P. D.; THORP, K. R.; CUADRA, S. V.; VIANNA, M. S.; VILLALOBOS, F. J.; BATCHELOR, W. D.; ASSENG, S.; JONES, M. R.; HOPF, A.; DIAS, H. B.; JINTRAWET, A.; JAIKLA, R.; MEMIC, E.; HUNT, L. A.; JONES, J. W. **Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT)**. versão 4.8.5.0. Gainesville: DSSAT Foundation, 2024. Disponível em: www.dssat.net. Acesso em: 27 jan. 2025.
- INMET. **Normais Climatológicas do Brasil**. Brasília, DF: Inmet, 2025. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 20 fev. 2025.
- JENSEN, M. E.; HAISE, H. R. Estimating evapotranspiration from solar radiation. **Journal of the Irrigation and Drainage Division Proceedings of the American Society of Civil Engineers**, Reston, v. 89, p. 15-41, 1963.
- KÖPPEN, W. **Climatología: con un estudio de los climas de la tierra**. 1. Ed. México: Fondo de Cultura Economica, 1948.
- KRAMER, P. J. Tension of moisture and plant growth. **Agronomy Journal**, Indiana, v. 55, n. 1, p. 31-35. 1963.
- MAKKINK, G. F. Testing the Penman formula by means of lysimeters. **Journal of the Institution of Water Engineers**, v. 11, n. 3, p. 277-288. 1957.
- MENDOZA, C. J.; MENEZES, R. H.; DIAS, A. S. Estimativa da evapotranspiração de referência por diferentes métodos para o município de São Luís – MA. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 10, n. 3, p. 621-630, 2016.
- PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Meteorologia Agrícola**. edição revista e ampliada. Piracicaba: ESALQ, 2007. Disponível em: <https://www.studocu.com/pt-br/document/universidade-federal-do-piau/meteorologia-e-climatologia-agricola/apostila-meteorologia-agricola-esalq-2007/7792855>. Acesso em: 05 abr. 2023.
- PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997.
- RICHARDSON, C. W.; WRIGHT, D. A. **WGEN: A model for generating daily weather variables**. Washington, DC: United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service, 1984.
- SANTANA, J. S.; LIMA, E. F.; SILVA, W. A.; FERNANDES, M. C.; RIBEIRO, M. I. D. Equações de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) para a região de Balsas-MA. **Enciclopédia Biosfera**, Jandaia, v. 15, n. 27, p. 1-14, 2018.

- SILVA, M. G.; OLIVEIRA, I. D. S.; CARMO, F. F.; LÊDO, E. R. F.; SILVA FILHO, J. A. da. Estimativa da evapotranspiração de referência pela equação de HARGREAVES-SAMANI no estado do Ceará, Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, Tupã, v. 9, n. 2, p. 132-141, 2015.
- SOUZA, M. L. A.; SOUSA, J. W. Avaliação do desempenho de métodos empíricos para a estimativa da evapotranspiração de referência em Rio Branco, Acre. **Scientia Naturalis**, Rio Branco, v. 2, n. 1, p. 254-267, 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufac.br/index.php/SciNat/issue/view/174>. Acesso em: 09 mar. 2023.
- SRIVASTAVA, P. K.; SINGH, P.; MALL, R. K.; PRADHAN, R. K.; BRAY, M.; GUPTA, A. Performance assessment of evapotranspiration estimated from different data sources over agricultural landscape in Northern India. **Theoretical and Applied Climatology**, Autria, v. 140, n. 1/2, p. 145-156, 2020.
- STOCK, J. H.; WATSON, M. W. **Introduction to Econometrics**. 3. ed. York: Addison-Wesley, 2010. (Series in Economics, v. 1).
- TEIXEIRA FILHO, A. de J.; BARBOSA, J. V. G.; FERREIRA, J. C. C. Avaliação do desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Manicoré, AM. **Irriga**, Botucatu, v. 28, n. 1, p. 60-76, jan./mar. 2023.
- TEIXEIRA FILHO, A. de J.; BRAGA, A. F. de F. B. Avaliação do desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração potencial de referência para o município de Benjamin Constant, AM. **Irriga**, Botucatu, v. 28, n. 2 p. 313-330, abr./jun. 2023.
- TEIXEIRA FILHO, A. de J.; ARRUDA, D. A. Avaliação do desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Presidente Figueiredo, AM. **Irriga**, Botucatu, v. 29, p. 289-305, jan./dez. 2024.
- TETENS, O. **Über einige meteorologische Begriffe**. v. 6. Gesellschaft: Friedrich Vieweg e Sohn Akt., 1930.
- THORNTHWAITE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, Philadelphia, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948.
- TUCCI, C. E. M.; BELTRAME, L. F. S. "Evaporação e Evapotranspiração". In: TUCCI, C. E. M. (org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4 ed. 5. reimp. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2013, p. 253-287.
- TURCO, J. E. P.; PERECIN, D.; PINTO JUNIOR, D. L. Influência da acurácia de instrumentos de medidas na comparação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência. **Irriga**, Botucatu, v. 13, n. 1, p. 63-80, jan./mar. 2008.
- VAADIA, Y.; RANEY, F. C.; HAGAN, R. M. Plant water deficits and physiological processes. **Annual Review of Plant Physiology**, Davis, v. 12, n. 1, p. 265-292, 1961.
- VISSER, W. E. **Moisture requirement of crops and rate of moisture depletion of the soil**. Wageningen: Institute for Land and Water Management Research, 1964. (Technical Bulletin, n. 32).
- VISWANADHAM, Y; SILVA FILHO; V. P.; ANDRE, R. G. B. The priestley-taylor parameter a for the amazon forest. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 38, n. 1, p. 211-225, 1991.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E.; FEDDEMA, J. J.; KLINK, K. M.; LEGATES, D. R.; O'DONNELL, J.; ROWE, C. M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. 5, p. 8995-9005, 1985.

WILSON, R. G.; ROUSE, W. R. Moisture and temperature limits of the equilibrium evapotranspiration model. **Journal of Applied Meteorology**, Boston, v. 11, n. 11, p. 436-42, 1972.