

EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA A REGIÃO DO CARIRI, CE: CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DE MODELOS ALTERNATIVOS

**ANA ALICE CARDOSO CARNEIRO¹; ANA CÉLIA MAIA MEIRELES²; CARLOS
WAGNER OLIVEIRA²; ANTÔNIA RAQUEL DE MORAIS ALCÂNTARA¹;
EVERTON ALENCAR PATRICIO¹ E JOSÉ BANDEIRA BRASIL³**

¹ Centro de Ciências Agrárias e da Biodiversidade (CCAB), Universidade Federal do Cariri (UFCA), Rua Ícaro de Sousa Moreira, n.126, Muriti, CEP: 63130-025, Crato, Ceará, Brasil, ana.carneiro@aluno.ufca.edu.br, <https://orcid.org/0009-0008-0964-9873>, everton.alencar@aluno.ufca.edu.br, <https://orcid.org/0009-0001-8625-9739>, raquel.moraes@aluno.ufca.edu.br, <https://orcid.org/0009-0007-1991-8785>

² Centro de Ciências Agrárias e da Biodiversidade (CCAB), Universidade Federal do Cariri (UFCA), Rua Ícaro de Sousa Moreira, n.126, Muriti, CEP: 63130-025, Crato, Ceará, Brasil. carlos.oliveira@ufca.edu.br, <https://orcid.org/0000-0003-1013-297>, ana.meireles@ufca.edu.br, <https://orcid.org/0000-0002-8860-2043>

³ Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional Sustentável (PRODER), Universidade Federal do Cariri (UFCA), Rua Ícaro de Sousa Moreira, n.126, Muriti, CEP: 63130-02, Crato, Ceará, Brasil, josebbrasil@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-4335-7838>

1 RESUMO

A evapotranspiração de referência (ET_o) é uma variável meteorológica fundamental para planejamento hidrológico e agroclimático de uma região. Assim, esse trabalho teve por objetivo calibrar e validar modelos alternativos para o cálculo da evapotranspiração de referência na região do Cariri cearense. Para tanto, foi utilizado um período de 3 anos (2021 a 2023), sendo dois anos para calibração e um ano para validação dos coeficientes obtidos. O método da FAO (Penman-Monteith) foi usado como padrão de comparação para os métodos: Hargreaves e Samani, Priestley e Taylor, Jensen-Haise e Blaney-Criddle. O desempenho dos métodos foi analisado por meio de indicadores estatísticos, sendo estes: coeficiente de determinação, erro médio, raiz quadrada do erro quadrado médio, coeficiente de correlação de Pearson, índice de exatidão de Willmont e o índice de exatidão descrito por Camargo e Sentelhas. A calibração dos modelos alternativos de estimativa da ET_o para a região do cariri cearense possibilitou medidas mais precisas. Os modelos ajustados de Jensen-Haise e Priestley e Taylor apresentaram estimativas mais precisas e exatas, podendo ser utilizados, quando necessário, em substituição ao modelo da FAO Penman Montheith. Os métodos de Hargreaves e Samani e Blaney-Criddle foram menos precisos na estimativa de ET_o.

Palavras-chave: demanda evapotranspiratória, índices estatísticos, ajuste linear.

**CARNEIRO, A. A. C.; MEIRELES, A. C. M.; OLIVEIRA, C.W.; ALCÂNTARA, A. R.
M.; PATRICIO, E. A.; BRASIL, J. B.
REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION FOR THE CARIRI REGION, CE:
CALIBRATION AND VALIDATION OF ALTERNATIVE MODELS**

2 ABSTRACT

Reference evapotranspiration (ET_o) is a fundamental meteorological variable for hydrological and agroclimatic planning in a region. Therefore, this work aimed to calibrate and validate alternative models for calculating reference evapotranspiration in the Cariri region of Ceará. To this end, a period of 3 years was used (2021–2023), with two years for calibration and one year for validation of the obtained coefficients. The FAO method (Penman–Monteith) was used as a comparison standard for the methods of Hargreaves and Samani, Priestley and Taylor, Jensen–Haise and Blaney–Criddle. The performance of the methods was analyzed via statistical indicators, namely, the coefficient of determination, mean error, square root of the mean square error, Pearson's correlation coefficient, Willmont's accuracy index and the accuracy index described by Camargo and Sentelhas. The calibration of alternative ET_o estimation models for the Cariri region of Ceará allowed more precise measurements. The adjusted Jensen–Haise and Priestley and Taylor models presented more precise and accurate estimates and can be used, when necessary, to replace the FAO Penman–Monteith model. The Hargreaves, Samani and Blaney–Criddle methods were less accurate in estimating ET_o.

Keywords: evapotranspiration demand, statistical indices, linear adjustment.

3 INTRODUÇÃO

O crescimento acelerado da população mundial desperta a necessidade de otimizar os sistemas de produção de alimentos bem como racionalizar os recursos naturais disponíveis. A irrigação desempenha um papel importante na redução de perdas e na maximização da produtividade das culturas, garantindo a segurança da produção agrícola (Menezes *et al.*, 2024). Com isso, as práticas de gerenciamento hídrico nos cultivos irrigados exigem que as necessidades hídricas das culturas e o volume de água de irrigação sejam estimados com precisão, o que, por sua vez, exige um conhecimento preciso da evapotranspiração das culturas (Paredes *et al.*, 2020). A evapotranspiração de referência (ET_o) é um dos principais fatores que interferem na lâmina de água disponível para a irrigação de regiões áridas e semi-áridas, pois estas apresentam grande variabilidade espaço temporal na precipitação, logo é de extrema importância uma correta determinação de ET_o para o melhor planejamento dos recursos hídricos.

A precisão na estimativa da ET_o é indispensável para o manejo de irrigação bem

como para o monitoramento do ciclo hidrológico a nível de bacia hidrográfica. Contudo, a disponibilidade de dados climáticos, por vezes limitados, restringe a aplicação do modelo padrão da FAO (Penman-Monteith), sendo necessário a utilização de modelos alternativos de fácil aplicação. O método de Penman-Monteith (FAO) é considerado o mais apropriado internacionalmente por se tratar de um método que utiliza vários parâmetros meteorológicos e pelo seu alto nível de acurácia, porém este fator o limita devido à dificuldade de disponibilidade de todos os parâmetros utilizados na equação (Carvalho *et al.*, 2011). Diante do exposto, objetivou-se calibrar e validar modelos alternativos de estimativa da ET_o para a região do Cariri, CE.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido no Centro de Ciências Agrárias e da Biodiversidade (CCAB), Campus da Universidade Federal do Cariri, situado no município do Crato, CE. A região localiza-se na sub-bacia da bacia hidrográfica do Rio Salgado, no Cariri

cearense, e possui a classificação por Köppen de clima tropical – Aw. A área de estudo apresenta características climáticas úmidas, com estações chuvosa e seca bem definidas, com temperaturas anuais variando entre 24 °C e 27 °C. O município do Crato apresenta uma particularidade climática por se localizar na base da Floresta Nacional do Araripe (FLONA) no extremo-sul do estado. Tais características são intervenientes para que as temperaturas sejam relativamente mais baixas no inverno apesar de apresentar elevadas temperaturas no período seco do ano.

Os dados usados na pesquisa foram obtidos por meio de uma estação meteorológica automática, do modelo HOBO

RX3000, instaladas de acordo com as seguintes coordenadas geográficas: 7°14' S e 39°22' W, com altitude de 425 m acima do nível do mar. A série de dados utilizada correspondeu ao período de 2021 a 2023, cujos anos de 2021 e 2022 foram utilizados para a calibração dos parâmetros dos modelos alternativos, e os dados referente ao ano de 2023 foram utilizados para validar a calibração dos modelos. As variáveis meteorológicas utilizadas foram temperatura do ar (média, mínima e máxima, em °C); radiação solar ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); velocidade do vento (m s^{-1}); precipitação (mm) e umidade relativa do ar (média, mínima e máxima, em %). As equações utilizadas para o cálculo da ETo estão descritas na Tabela 1.

Tabela 1. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ETo) e suas respectivas equações

Métodos	Equações de estimativa da ETo	Variáveis de Entrada
Penman-Monteith (PM), Allen et al. (1998)	$ETo = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma + \frac{900}{(T + 273)}U_2(ea - es)}{\Delta + \gamma + (1 + 0,34U_2)}$	Tmed, Rg, UR, V
Hargreaves e Samani (HS), Pereira et al. (1997)	$ETo = A R_a(Tmed + 0,17)(Tmax - Tmin)^c$	Tmax, Tmed, Tmin
Priestley e Taylor (PT), (1972)	$ETo = A \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \left(\frac{Rn - G}{\lambda} \right)$	Tmed, Rg
Jensen-Haise (JH), (1963)	$ETo = Rs (A \times Tmed + B)$	Tmed, Rg
Blaney-Criddle (BC), (1977)	$ETo = a + bp(0,457 \times Tmed + 8,13)$	Tmed

Fonte: Autores (2025)

ETo: evapotranspiração de referência (mm d^{-1}); Tmax, Tmin, Tmed representam temperatura máxima, mínima, média, respectivamente a (°C); Rg: radiação solar global ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$); Rn: saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$); V: velocidade do vento a 2 m de altura (m s^{-1}); UR: umidade relativa (%); Δ : tangente à curva de pressão de saturação do vapor d'água ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); γ : constante psicrométrica ($0,0662 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); ea: pressão de vapor do ar ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); es: pressão de saturação à temperatura da superfície ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); Ra: radiação extraterrestre (mm d^{-1}); G: densidade de fluxo de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), considerada zero para estimar de ETo diária.

A calibração dos coeficientes empíricos A, B e C dos métodos alternativos em relação ao método padrão foi realizada de acordo com metodologia descrita por Wraith e Or (1998), a partir do Microsoft Excel®, por meio do ajuste de equação não linear

usando o aplicativo SOLVER. Quanto a validação da calibração, essa foi realizada por meio indicadores estatísticos como o coeficiente de determinação (R^2); o erro médio (EM) e a raiz do quadrado do erro médio quadrático (RMSE), dados pelas

equações 1 e 2; o coeficiente de correlação de Pearson (r), o índice de exatidão de Willmont (d) descrito pela equação 3, e o índice de desempenho ou concordância (c) descrito por Camargo e Sentelhas (1997), dado pela equação 4.

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

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

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{y}| + |O_i - \bar{y}|)^2} \right] \quad (3)$$

$$C = r * d \quad (4)$$

Em que: n = número de observações, O_i = é o valor estimado pelo modelo padrão; P_i = é o valor estimado pelos modelos alternativos; \bar{y} = média dos valores estimados pelo modelo padrão; r = coeficiente de correlação; d = índice de Willmont. O índice de concordância de Camargo e Sentelhas (c) pode ser interpretado de acordo com a Tabela 4.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 estão descritos os coeficientes originais das equações utilizadas nesse estudo, bem como os coeficientes após o processo de calibração. Observa-se que todos os coeficientes apresentaram modificação em relação ao seu valor original. Tal mudança de valor equivale ao ajuste para melhor estimativa dos valores de ETo.

Tabela 2. Coeficientes originais e calibrados dos modelos alternativos de ETo para a região do Cariri, CE.

Métodos	Coeficientes			
	Originais		Ajustados	
	A	B	A	B
Hargreaves e Samani (HS)	0,0023	0,5	0,001	0,678
Jensen-Haise (JH)	0,025	0,08	0,015	0,146
Priestley e Taylor (PT)	1,26	-	1,182	-
Blaney-Criddle (BC)	0,457	8,13	0,479	9,337

Fonte: Autores (2025)

Após a calibração os modelos apresentaram boas estimativas de ETo. Os modelos alternativos de JH e PT foram os que apresentaram melhores resultados, com desempenho classificado como ótimo, apresentando r de 0,960 e 0,899, respectivamente. Ambos os modelos obtiveram o índice de d de 0,98 e 0,97 com medidas de erro representando uma superestimativa em relação ao modelo padrão de PM-FAO, variando entre 0,24 e 0,29 mm dia⁻¹ (RMSE). Se tratando do EM, o modelo de JH tendeu a superestimar em 0,12 mm dia⁻¹ o método de PM-FAO, já o modelo de PT apresentou tendência a subestimar, segundo

Celestin *et al.* (2020) métodos baseados em radiação solar apresentam tendência de subestimar o modelo de PM. Os resultados aqui discutidos estão descritos na Tabela 1.

Em contraste, os métodos HS e BC foram os que mais se distanciaram do método padrão, tendo o desempenho classificado como mediano e muito bom, respectivamente, onde HS apresentou valores de r 0,772 e BC de 0,921. Esses modelos alcançaram o índice d de 0,817 e 0,932 e suas medidas de erro representaram subestimativa quando comparados ao método padrão de PM-FAO, com variações de 0,876 e 0,534 mm dia⁻¹ (RMSE). Estes métodos por

utilizarem somente a temperatura do ar como variável independente apresentam menor capacidade de ajuste, sendo considerados

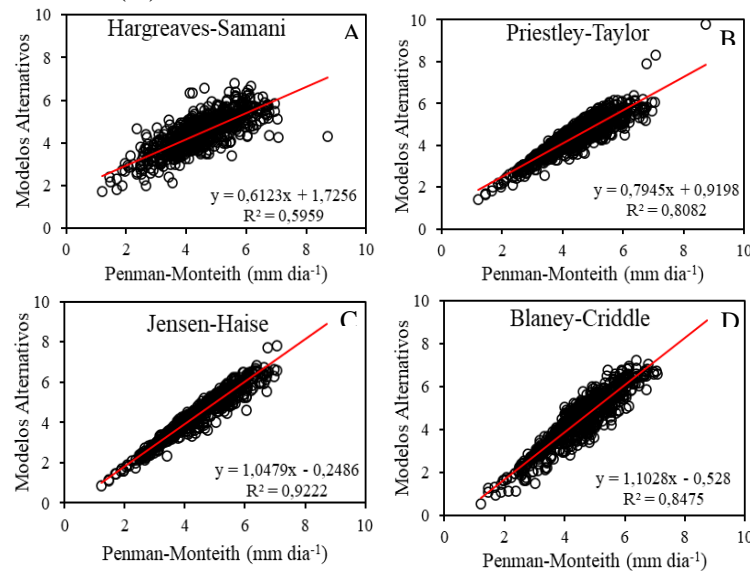
menos eficientes (Sales *et al.*, 2018). Esses resultados podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3. Critério de interpretação do coeficiente de confiança

Métodos	Índices				Erro (mm d ⁻¹)	
	r	d	c	Desempenho	RMSE	EM
Hargreaves e Samani (HS)	0,772	0,817	0,631	Mediano	0,876	-0,602
Jensen-Haise (JH)	0,960	0,986	0,947	Ótimo	0,242	0,115
Priestley e Taylor (PT)	0,899	0,979	0,880	Ótimo	0,299	-0,001
Blaney-Criddle (BC)	0,921	0,932	0,858	Muito bom	0,534	-0,294

Fonte: Autores (2025)

Figura 1. Regressão linear entre os valores diários de evapotranspiração de referência (ET_o) estimados pelo método padrão da FAO Penman Monteith em relação aos modelos ajustados de Hargreaves e Samani (A), Priestley e Taylor (B), Jensen-Haise (C) Blaney-Criddle (D).



Fonte: Autores (2025)

De acordo com a análise de regressão, assim como constatado anteriormente, os modelos de JH e PT apresentaram boa precisão na estimativa de ET_o, com R² 0,92 e 0,81 para ambos os métodos, respectivamente (Figura 1). Nota-se que, para os modelos de JH e PT, a distribuição dos pontos ao redor da linha de tendência apresentou baixa variação, quando comparado aos modelos de HS e BC, os quais por outro lado, apresentaram menor desempenho na estimativa de ET_o, com valores de R² de 0,59 e 0,84 respectivamente,

sendo possível ver maiores variações na distribuição dos seus pontos ao redor da linha de tendência.

6 CONCLUSÕES

O processo de calibração dos modelos alternativos de estimativa da ET_o possibilitou medidas mais precisas para a região do cariri cearense. Os modelos ajustados de Jensen-Haise e Priestley e Taylor apresentaram

estimativas mais precisas e exatas, podendo ser utilizados, quando necessário, em substituição ao modelo da FAO Penman Monteith. Os métodos de Hargreaves e Samani e Blaney-Criddle foram menos precisos na estimativa de ETo por usarem somente a temperatura como variável independente.

7 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Centro de Ciências Agrárias e da Biodiversidade (CCAB) da Universidade Federal do Cariri (UFCA) pela logística para realização do trabalho, ao grupo de ensino tutorado PETagronomia pelo financiamento das pesquisas, ao grupo de laboratório de estatística, modelagem e geoprocessamento pelo apoio técnico e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) pelo seu apoio financeiro aos bolsistas pós-doutorandos participantes e orientadores desta pesquisa e ao PROJETO: Edital n.162022, PDPG – Pós-doutorado Estratégico.

8 REFERÊNCIAS

- 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**, Serra Talhada, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.
- CARVALHO, L. G. D.; RIOS, G. F. A.; MIRANDA, W. L.; CASTRO NETO, P. Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 1, p. 456-465, 2011.
- CELESTIN, S.; QI, F.; LI, R.; YU, T.; CHENG, W. Evaluation of 32 simple equations against the Penman–Monteith method to estimate the reference evapotranspiration in the Hexi corridor, Northwest China. **Water**, Basel, v. 12, n. 10, article 2772, p. 1-22, 2020.
- MENEZES, S. M.; SILVA, G. F.; SILVA, M. M.; MORAIS, J. E. F.; VASCONCELOS, M. C.; SOUZA, C. S.; ROLIM, M. M. Pulsed drip irrigation reduces sugarcane water consumption and improves growth, productivity, sugar and ethanol yields. **BioEnergy Research**, New York, v. 17, n. 3, p. 1413-1424, 2024.
- PAREDES, P.; PEREIRA, L. S.; ALMOROX, J.; DAROUICH, H. Reference grass evapotranspiration with reduced data sets: Parameterization of the FAO Penman-Monteith temperature approach and the Hargreaves-Samani equation using local climatic variables. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 240, article 106210, p. 1-23, 2020.
- SALES, R. A.; OLIVEIRA, E. C.; LIMA, M. J. A.; GELCER, E. M.; SANTOS, R. A.; LIMA, C. F. Ajuste dos coeficientes das equações de estimativa da evapotranspiração de referência para São Mateus, ES. **Irriga**, Botucatu, v. 23, n. 1, p. 154-167, 2018.
- WRAITH, J. M.; OR, D. Nonlinear Parameter Estimation Using Spreadsheet Software. **Journal of Natural Resources and Life Sciences Education**, Madison, v. 27, n. 1, p. 13-19, 1998.