Revista Brasileira de Climatologia
Brazilian Journal of Climatology
OPEN ACCESS

MÉTODOS EMPÍRICOS DE ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA CODÓ, MARANHÃO, BRASIL

Empirical Methods for Estimation of Reference Evapotranspiration for Codó, Maranhão, Brazil

Métodos empíricos de estimación de la evapotranspiración de referencia para Codó, Maranhão, Brasil

Oswaldo Palma Lopes Sobrinho
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde
engenheirooswaldopalma@gmail.com

Wady Lima Castro Junior
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – Campus Codó
wadycastro@ifma.edu.br

Denise Arrais Cipriano
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – Campus Codó
denisearrais@gmail.com

Erika de Kássia Pereira Cantanhede
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – Campus Codó
erika.cantanhede@ifma.edu.br

Resumo: A evapotranspiração de referência (ETo) é um parâmetro importante para o planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos. O objetivo deste estudo foi comparar os métodos de estimativa da evapotranspiração de referência propostos por Hargreaves-Samani, Blaney-Criddle e Priestley-Taylor em relação ao método padrão de Penman-Monteith para o município de Codó, Maranhão, Brasil. Os dados meteorológicos utilizados para a estimativa da ETo foram obtidos na Estação Meteorológica Automática, instalada no Campo Experimental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão (IFMA), localizada no município de Codó, MA. O período de coleta de dados foi de 2009 a 2013. Foram quantificados valores diários de temperatura do ar máxima ($T_{máx}$), média ($T_{méd}$) e mínima ($T_{mín}$), umidade relativa do ar máxima ($UR_{máx}$), média ($UR_{méd}$) e mínima ($UR_{mín}$), direção do vento (D_v), radiação solar global (R_s), saldo de radiação (R_n), precipitação (P) e velocidade

do vento (V/v). Para a análise do desempenho dos métodos foram considerados os coeficientes de correlação (R), de determinação (R^2) e o índice de Willmott (c). Durante todo o ano, a estimativa da ETo pelo método HS superestimou a ETo obtidas por PM, BC e PT. O mesmo ocorreu com PT em relação a PM, mas com uma menor magnitude. Independente da estação do ano, o método de BC foi o que apresentou melhor desempenho de dados em relação ao método padrão PM-56 e o de HS não apresentou boa concordância para a ETo nas condições climáticas de Codó, MA, para as estações do verão e outono.

Palavras-chave: Agrometeorologia. Penman-Monteith. Recursos Hídricos.

Abstract: Reference evapotranspiration (REo) is an important parameter for planning and managing water resources. The objective of this study was to compare the reference evapotranspiration estimation methods proposed by Hargreaves-Samani, Blaney-Criddle and Priestley-Taylor in relation to the standard Penman-Monteith method for the municipality of Codó, Maranhão, Brazil. The objective of this study was to compare the reference evapotranspiration estimation methods proposed by Hargreaves-Samani, Blaney-Criddle and Priestley-Taylor in relation to the standard Penman-Monteith method for the municipality of Codó, Maranhão, Brazil. Daily values of maximum (T_{max}), average (T_{med}) and minimum (T_{min}) air temperature, maximum (RH_{max}), mean (RH_{med}) and minimum (RHmin) relative air humidity, wind direction (Dv), radiation global solar energy (Rg), radiation balance (Rb), precipitation (P) and wind speed (W/S). To analyze the performance of the methods, the correlation coefficients (R), determination coefficients (R^2) and the Willmott index (c) were considered. Throughout the year, the REo estimate using the HS method overestimated those obtained using PM, BC and PT. The same occurred with PT in relation to PM, but with a smaller magnitude. Regardless of the season of the year, the BC method presented the best data performance in relation to the standard PM-56 method and the HS method did not present good agreement for REo in the climatic conditions of Codó, MA for the summer and fall.

Keywords: Agrometeorology. Penman-Monteith. Water Resources.

Resumen: La evapotranspiración de referencia (ETo) es un parámetro importante para la planificación y gestión de los recursos hídricos. El objetivo de este estudio fue comparar los métodos de estimación de la evapotranspiración de referencia propuestos por Hargreaves-Samani, Blaney-Criddle y Priestley-Taylor en relación con el método estándar de Penman-Monteith para el municipio de Codó, Maranhão, Brasil. Los datos meteorológicos utilizados para estimar la ETo fueron obtenidos de la Estación Meteorológica Automática, instalada en el Campo Experimental del Instituto Federal de Educación, Ciencia y Tecnología de Maranhão (IFMA), ubicado en el municipio de Codó, MA. El período de recolección de datos fue de 2009 a 2013. Valores diarios de temperatura del aire máxima (T_{max}), media (T_{med}) y mínima (T_{min}), humedad relativa del aire máxima (RH_{max}), media (RH_{med}) y mínima (RH_{min}), dirección del viento (Dv), radiación de energía solar global (Rs), balance de radiación (Rn), precipitación (P) y velocidad del viento (V/v). Para analizar el desempeño de los métodos se consideraron los coeficientes de correlación (R), coeficientes de determinación (R^2) y el índice de Willmott (c). A lo largo del año, la estimación de la ETo mediante el método HS sobrestimó la ETo obtenida por PM, BC y PT. Lo mismo ocurrió con las PT en relación con las PM, pero con una magnitud menor. Independente da estação do ano, o método de BC foi o que apresentou melhor desempenho de dados em relação ao método padrão PM-56 e o de HS não apresentou boa concordância para a ETo nas condições climáticas de Codó, MA para as estações do verão e otoño.

Palabras clave: Agrometeorología. Penman-Monteith. Recursos Hídricos.

Submetido em: 07/07/2023

Aceito para publicação em: 07/02/2024

Publicado em: 25/02/2024

1. INTRODUÇÃO

O estudo da evapotranspiração é importante no planejamento das atividades agrícolas, no manejo da irrigação e na gestão sustentável dos recursos hídricos, pois, como componente do balanço hídrico, possibilita quantificar de forma precisa a disponibilidade de água de uma determinada região (PEREIRA; PAREDES; JOVANOVIC, 2020; WANNIARACHCHI; SARUKKALIGE, 2022). As atividades agrícolas consomem grandes quantidades de água e, assim, esforços quanto ao uso racional deste recurso natural têm sido empregados (LACERDA; TURCO, 2015). Este estudo se torna mais importante em regiões caracterizadas pela irregularidade espacial e temporal da precipitação e pela escassez de reservas naturais de água, como nas áreas áridas e semiáridas do nordeste do Brasil (MOURA *et al*., 2013; MORAIS *et al.,* 2023).

A quantificação e determinação da água podem ser realizadas fazendo o balanço hídrico da camada do solo ocupada pelo sistema radicular da cultura, o qual tem na evapotranspiração e na precipitação seus principais componentes, podendo ser controlada pelo balanço de energia, demanda atmosférica e suprimento de água do solo às plantas (BERNARDO *et al.,* 2019).

A estimativa da evapotranspiração de referência (ETo) é relevante para a grande área das Ciências Agrárias, tais como: a Agronomia e a Engenharia Agrícola (LONG *et al*., 2013; FALAMARZI *et al*., 2014; MANCOSU *et al*., 2014). Neste viés, Lopes Sobrinho *et al.* (2020) mencionaram que em termos práticos de medição e estimativas da ETo há uma dificuldade e complexidade em apresentar um método que seja satisfatório. Dessa forma, pesquisadores desenvolveram diferentes métodos para estimativas da ETo, sendo que alguns exigem maior número de parâmetros, enquanto outros são mais simples. Logo, a aplicação de um método específico para a estimativa da ETo geralmente depende da disponibilidade de dados no local de estudo (SHIRI *et al*., 2014).

Alguns dos métodos mais precisos são de difícil aplicação, não só pela complexidade dos cálculos, mas também por exigirem um grande número de dados meteorológicos, que nem sempre estão disponíveis, como é o método padrão de Penman-Monteith (PM) da FAO-56 (BERNARDO *et al.,* 2019). Algumas equações são baseadas em dados de radiação e outras

de temperatura do ar. Contudo, equações podem combinar os efeitos de radiação, temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento (ALLEN *et al*., 1998).

Na região dos cocais maranhenses, especificamente no município de Codó, MA, não foram encontrados na literatura trabalhos a esse respeito. Dessa forma, o estudo contribui para o desenvolvimento econômico regional e desempenha um papel importante na produção de conhecimento local, na promoção de práticas agrícolas sustentáveis e no manejo eficiente dos recursos hídricos, atendendo às necessidades da região e colaborando para a sua resiliência em face de desafios futuros, como as mudanças climáticas.

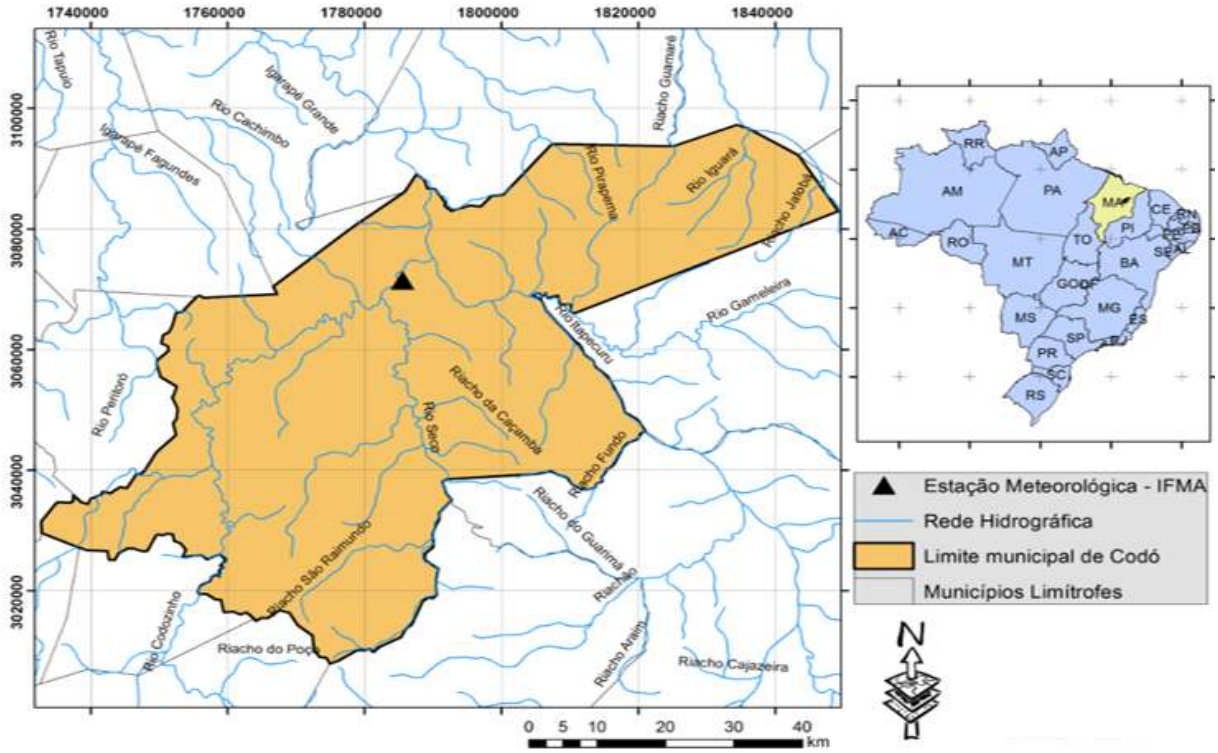
O objetivo deste estudo foi comparar os métodos de estimativa da evapotranspiração de referência propostos por Hargreaves-Samani, Blaney-Criddle e Priestley-Taylor em relação ao método padrão de Penman-Monteith para o município de Codó, Maranhão, Brasil.

2. METODOLOGIA

2.1. Caracterização da área de estudo e obtenção de dados

Foram utilizados dados meteorológicos de temperatura do ar máxima, média e mínima, umidade relativa do ar máxima, média e mínima, direção do vento, radiação solar global, saldo de radiação, precipitação e velocidade do vento diários obtidos na Estação Meteorológica Automática privada, que não pertence ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e instalada no Campo Experimental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão (IFMA), localizada no município de Codó, MA, com as coordenadas geográficas (4° 27’ 18” S, 43° 52’ 44” O, Latitude: -4.45494, Longitude: -43.8789 – Figura 1) (IBGE, 2023).

Figura 1 - Estação meteorológica automática instalada no Campo Experimental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – Campus Codó.



Fonte: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2017)

Devido à consistência e ausência de falhas nos registros, os dados meteorológicos foram coletados meticulosamente de maio de 2009 a abril de 2013.

O clima predominante de Codó, MA, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Aw, ou seja, megatérmico úmido e subúmido de inverno seco; a precipitação total média anual apresenta variações sazonais entre 1.200 e 2.000 mm; a temperatura média anual de 27 °C; e a máxima, de 36 °C (LIMA, 1998; KOTTEK *et al*., 2006; CORREIA FILHO, 2011).

Durante os meses de maio a agosto, os dias são tipicamente quentes, acompanhados de noites agradáveis que ocasionalmente podem ser mais frescas. Entre os meses de dezembro e junho, prevalece o período mais chuvoso. Já de setembro a novembro, é notável o aumento das temperaturas, enquanto fevereiro e março se destacam pelo frio, devido à presença de nebulosidade elevada. Os ventos predominantes sopram de nordeste para sudoeste, com uma velocidade média de cerca de 20 km/h (CORREIA FILHO, 2011).

O solo da área é classificado como Neossolo Quartzarênico, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação do Solo (SiBCS) (SANTOS *et al*., 2018), ou como *Etisols Quartzipsamments,* conforme *USDA Soil Taxonomy* (SOIL SURVEY STAFF, 2014) e Arenosols

(WRB/FAO, 2015). Foram determinados os valores de umidade na capacidade de campo (CC) e a densidade do solo (D_s), cujos valores são iguais a 6,67% e 1,67 g/cm³, respectivamente. Assim, a capacidade de água disponível no solo (CAD) foi de 14,6 mm/cm (CASTRO JÚNIOR, 2012).

2.2. Métodos empíricos utilizados para a estimativa da evapotranspiração de referência

Os métodos de estimativa da ETo empregados foram Blaney-Criddle (BC), Hargreaves-Samani (HS) e Priestley-Taylor (PT). Esses métodos foram comparados com o método padrão de Penman-Monteith (PM) da FAO-56.

a) Método Penman-Monteith – FAO-56

Este método é considerado o mais adequado para as estimativas da ETo, porque se baseia em princípios físicos e considera todos os fatores climáticos que afetam a ETo (LEE *et al*., 2004). Para a utilização deste método, foram empregados dados de umidade relativa do ar, temperatura do ar, radiação solar e velocidade do vento, podendo ser expresso pela Equação 1.

(1)
$$ETo=\frac{0{,}408\,\Delta\,(R_n-\,G)+\left(\gamma\frac{900}{T+273}\right)U_2(e_s-e_a)}{\Delta+[\,\gamma\,(1+0{,}34\,U_2)]}$$

Sendo: ETo – evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); Δ – declinação da curva de saturação do vapor da água (kPa $°C^{-1}$); R_n – saldo de radiação total diário (MJ m^{-2} dia^{-1}); G – densidade do fluxo de calor no solo (MJ m^{-2} dia^{-1}); γ – constante psicrométrica (kPa $°C^{-1}$); T – temperatura do ar média diária (°C); U_2 – velocidade do vento média diária a 2 m de altura (m s^{-1}); e_s – pressão de saturação do vapor da água na atmosfera (kPa); e e_a – pressão atual do vapor da água na atmosfera (kPa).

b) Método de Hargreaves-Samani (1985)

Este método também é recomendado pela FAO quando há somente disponibilidade de dados de temperatura do ar no local de estudo (ALLEN *et al*., 1998). Para a aplicação desse método, utiliza-se a Equação 2.

(2)
$$ETo=0{,}0023\,(T_m+17{,}8)\sqrt{(T_x-T_n)R_a}$$

Sendo: T_x – temperatura do ar máxima diária (°C); T_n – temperatura do ar mínima diária (°C); T_m – temperatura do ar média diária (°C); R_a – radiação solar no topo da atmosfera (MJ m^{-2} dia^{-1}).

c) Método de Blaney-Criddle (1950)

Este método considera os níveis gerais de umidade relativa do ar mínima, velocidade do vento e insolação e pode ser representado pela Equação 3.

(3) $$ET_o = a_{BC} + b_{BC} f$$

Sendo: a_{BC} – coeficiente linear da relação entre ETo e f (mm dia^{-1}); b_{BC} – coeficiente angular da relação entre ETo e f; f – fator de uso consuntivo (o produto b_{BC} f tem unidade em mm dia^{-1}).

O fator de uso consuntivo é obtido por meio da Equação 4.

(4) $$f = p\,(0{,}46T_{med} + 8{,}13)$$

Sendo: p= porcentagem de horas diurnas anuais durante o período considerado; T_{med} = temperatura do ar média diária (°C).

d) Método de Priestley-Taylor (1972)

Este método leva em consideração a radiação solar incidente, a temperatura do ar e a umidade relativa do ar. Além disso, por ser uma adaptação do método de PM, busca simplificar o cálculo, fornecendo uma estimativa viável da evapotranspiração em áreas em que há escassez de dados meteorológicos completos e precisos, podendo ser obtido empregando-se (JENSEN *et al*., 1990; ALLEN, 2000) a Equação 5.

(5) $$ET_o = 1{,}26\,\frac{\Delta}{\Delta+\gamma}\,(Rn+G)$$

Sendo: Δ – declinação da curva de saturação do vapor da água (kPa $°C^{-1}$); γ – constante psicrométrica (kPa $°C^{-1}$); Rn – saldo de radiação na superfície do cultivo (MJ m^{-2} dia^{-1}); e G – densidade de fluxo de calor no solo (MJ m^{-2} dia^{-1}).

As estimativas da ETo por Penman-Monteith-FAO e pelos métodos empíricos utilizados foram calculadas por meio do Programa *Reference Evapotranspiration Calculator – REF-ET®* (ALLEN, 2000) com o auxílio do Microsoft *Excel 2003®*.

Para as análises do desempenho dos métodos, foram considerados os coeficientes de correlação (R), que fornecem informações sobre a direção e a força da relação entre duas

variáveis; de determinação (R^2), que é uma medida do quão bem os pontos de dados se ajustam a uma linha de regressão e indica a proporção da variabilidade dos dados explicada pelo modelo estatístico; e o índice de Willmott (d) (1981), que compara a variação dos valores estimados com a dos valores observados, oferecendo uma medida de quão bem o modelo testado se ajusta aos dados reais obtidos pela Equação 6.

(6)
$$d=1-\left[\frac{\Sigma(Pi-Oi)^2}{\Sigma(|Pi-O|+|Oi-O|)^2}\right]$$

Sendo: d – índice de Willmott; Pi – evapotranspiração estimada pelo método testado (mm); Oi – evapotranspiração estimada pelo método padrão (mm); e O – média dos valores estimados pelo método padrão (mm).

Como parâmetro estatístico de comparação, foi também utilizado o índice "c" adotado por Camargo e Sentelhas (1997). Este índice serve como indicador de desempenho dos métodos, reunindo os índices de precisão "r" determinado a partir de regressão linear e o índice de Willmott “d”, sendo expresso pela Equação 7.

$$c = r \times d$$

Sendo: c – coeficiente de confiança; r – coeficiente de correlação; e d – coeficiente de concordância.

O critério adotado para avaliar o desempenho dos métodos pelo índice "c" para os valores médios mensais da ETo é apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores dos coeficientes de desempenho citados por Camargo e 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

A análise estatística das médias foi realizada utilizando o teste de Tukey a um nível de significância de 5%. As médias seguidas pelas mesmas letras, quando acompanhadas de ±

erro-padrão da média (EPM), indicam que não há diferenças significativas entre elas, de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

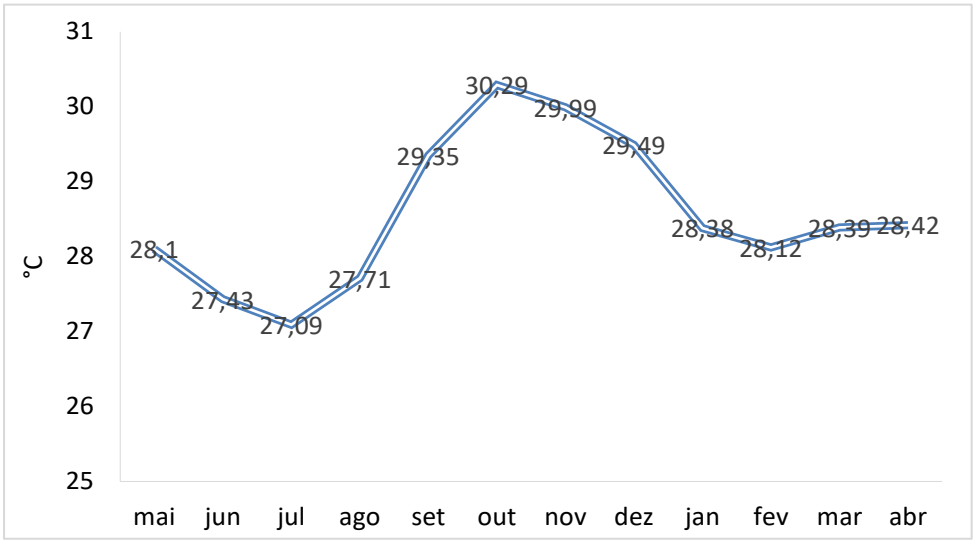
Os dados observados foram analisados por meio de análise de variância (ANOVA) e de regressão, utilizando o *software Assist*at 7.7® (SILVA; AZEVEDO, 2016). Para a obtenção das equações de regressão, coeficientes de determinação e a plotagem dos gráficos, foi utilizado o *software SigmaPlot*® versão 12.5 (SSI, 2013).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Observou-se a variação dos dados meteorológicos de temperatura média do ar, radiação solar e a velocidade do vento obtidos da estação meteorológica do IFMA-Campus Codó para o período de maio de 2009 a abril de 2013.

A temperatura do ar média mensal variou entre 27,09 °C para o mês de julho, que corresponde à estação do inverno, e 30,29 °C para o mês de outubro, referente à estação seca (Figura 2).

Figura 2 - Valores médios mensais da temperatura do ar para o município de Codó, MA, no período de 2009 a 2013.



Legenda: maio (mai), jun (junho), julho (jul), agosto (ago), setembro (set), outubro (out), novembro (nov), dezembro (dez), janeiro (jan), fevereiro (fev), março (mar) e abril (abr).

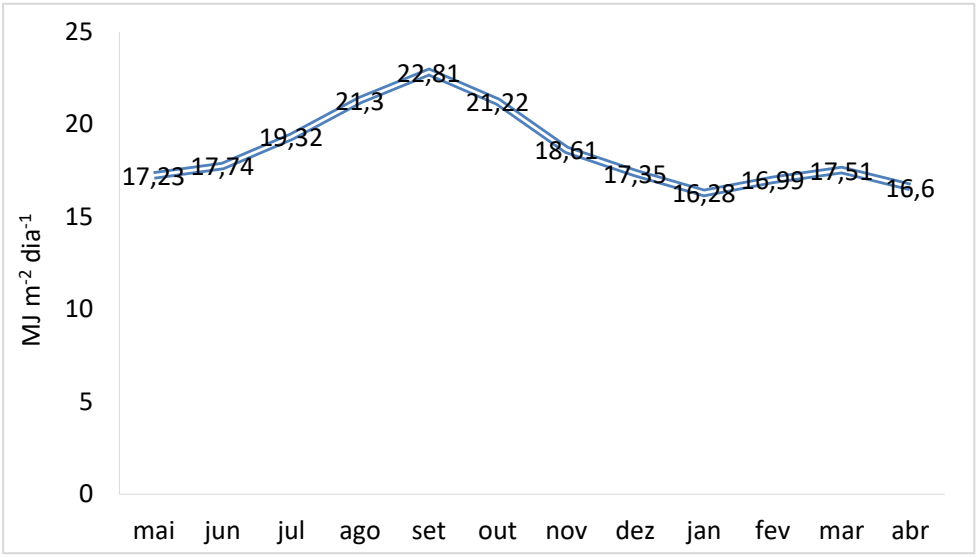
Fonte: Elaborada pelos autores (2023).

A variação sazonal da temperatura média mensal demonstra um acréscimo gradual ao longo dos meses, em conformidade com a transição das estações climáticas. Esse aumento

progressivo está relacionado à evolução das estações e pode exercer influência significativa sobre a taxa de evapotranspiração. Em geral, temperaturas mais elevadas costumam se correlacionar com uma evapotranspiração mais acentuada, aspecto relevante a ser considerado na análise comparativa dos métodos de estimativa. Além disso, a variação na temperatura pode afetar o desempenho dos métodos na estimativa da evapotranspiração de referência para Codó, MA.

Os valores dos totais médios mensais da radiação solar foram iguais a 22,81 MJ m^{-2} dia^{-1} em setembro e a 15,52 MJ m^{-2} dia^{-1} em maio (Figura 3).

Figura 3 - Valores dos totais médios mensais da radiação solar (MJ m^{-2} dia^{-1}) para o município de Codó, MA, no período de 2009 a 2013.



Legenda: maio (mai), jun (junho), julho (jul), agosto (ago), setembro (set), outubro (out), novembro (nov), dezembro (dez), janeiro (jan), fevereiro (fev), março (mar) e abril (abr).

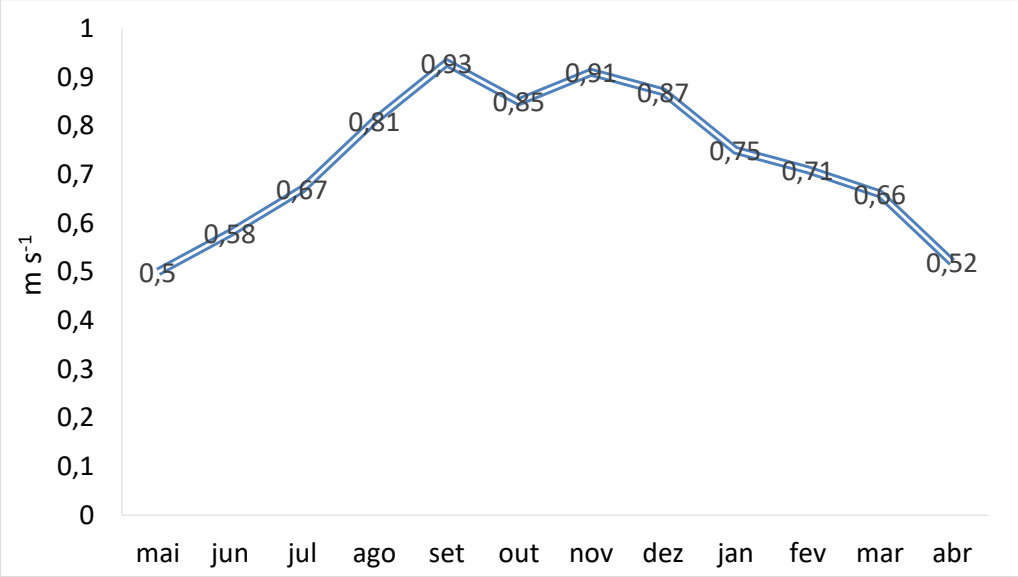
Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

A variação na radiação solar reflete as mudanças sazonais típicas na região. Durante a estação seca, que começa após setembro, a radiação solar atinge níveis mais altos, contribuindo para temperaturas superiores e uma umidade relativa do ar mais baixa. Por outro lado, a estação chuvosa, que engloba maio, costuma apresentar menor radiação solar devido à presença de nuvens e possíveis períodos de chuva. Na análise da evapotranspiração, a radiação solar desempenha um papel vital no processo de evaporação. A variação nos valores médios mensais da radiação solar pode ser um fator crucial na comparação dos métodos de estimativa de evapotranspiração, visto que a quantidade de radiação solar

influencia diretamente a taxa de evapotranspiração. Portanto, compreender essas variações sazonais é fundamental para uma estimativa precisa da evapotranspiração de referência em Codó, MA.

A velocidade do vento variou de 0,48 m s^{-1} a 0,93 m s^{-1} para os meses de maio e setembro, respectivamente (Figura 4).

Figura 4 - Valores médios mensais da velocidade do vento (m s^{-1}) para o município de Codó, MA, no período de 2009 a 2013.



Legenda: maio (mai), jun (junho), julho (jul), agosto (ago), setembro (set), outubro (out), novembro (nov), dezembro (dez), janeiro (jan), fevereiro (fev), março (mar) e abril (abr).

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Os dados sobre a variação da velocidade do vento são importantes para entender as condições atmosféricas locais, sendo fundamentais na análise da evapotranspiração e do balanço hídrico. A variação sazonal do vento pode ter uma influência direta nos métodos de estimativa da evapotranspiração, pois o vento impacta diretamente na taxa de evaporação e transpiração das plantas, afetando, consequentemente, a evapotranspiração total na região estudada.

Devido à baixa latitude, as estações do ano não se distinguem muito no que tange às características climáticas de temperatura. No entanto, há uma interferência direta do período chuvoso, o que orientou a divisão da análise dos resultados em dois períodos distintos, seco e chuvoso. Observou-se que as ETo com maiores valores se concentraram em setembro, ou seja, início da primavera (maiores velocidades do vento e radiação solar – Figuras 3 e 4); e, no

verão (dezembro a março), as ETo apresentaram valores menores, devido principalmente às chuvas, que atuaram aumentando a umidade relativa do ar e diminuindo a insolação.

Os valores da ETo médios mensais estimados para Codó, MA, no período em estudo estão apresentados na Tabela 2 e na Figura 5. Os métodos de BC, HS e PT apresentaram valores médios anuais para a ETo iguais a 4,4; 5,7 e 4,5, respectivamente. Esses métodos superestimaram a ETo quando comparados com os valores obtidos pelo método padrão de PM-56, cujo valor médio foi 4,1 mm dia^{-1} (Tabela 2).

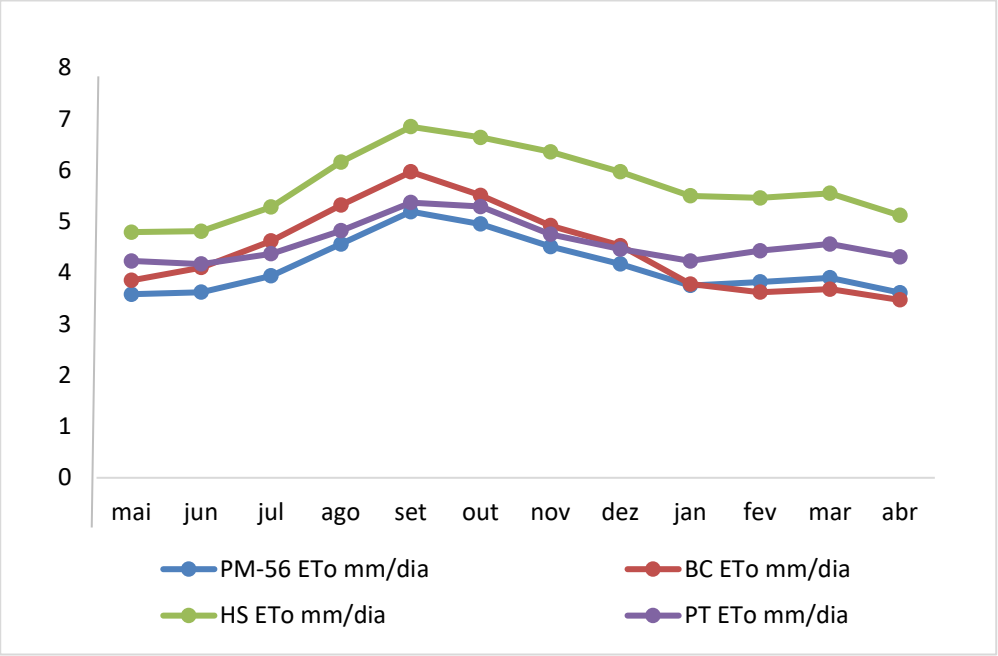
Tabela 2 - Valores médios mensais da ETo calculados pelos métodos de Penman-Monteith – FAO-56 (PM), Blaney-Criddle (BC), Hargreaves-Samani (HS) e Priestley-Taylor (PT) para o município de Codó, MA, 2009 a 2013.

Meses	**PM-56 (mm dia^{-1})**	**BC (mm dia^{-1})**	**HS (mm dia^{-1})**	**PT (mm dia^{-1})**
Maio	3,6	3,8	4,8	4,2
Junho	3,6	4,1	4,8	4,2
Julho	3,9	4,6	5,3	4,4
Agosto	4,6	5,3	6,1	4,8
Setembro	5,2	5,9	6,8	5,4
Outubro	5,0	5,5	6,6	5,3
Novembro	4,5	4,9	6,3	4,7
Dezembro	4,2	4,5	5,9	4,4
Janeiro	3,6	3,7	5,5	4,2
Fevereiro	3,8	3,6	5,4	4,4
Março	3,9	3,6	5,5	4,5
Abril	3,6	3,4	5,1	4,3
Média	**4,1**	**4,4**	**5,7**	**4,5**

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Na Figura 5 e Tabela 2, observou-se a variação média mensal da ETo estimada pelos métodos de PM-56, BC, HS e PT. Os maiores valores da ETo foram obtidos pelos métodos HS e PT que superestimaram durante todo o ano em relação ao de PM-56. O método de BC superestima os valores de PM-56 de maio a dezembro e subestima de fevereiro a abril.

Figura 5 - Variação mensal da evapotranspiração pelos métodos de Penman-Monteith (PM), Hargreaves-Samani (HS), Blaney-Criddle (BC) e Priestley-Taylor (PT) para o município de Codó, MA, no período de 2009 a 2013.

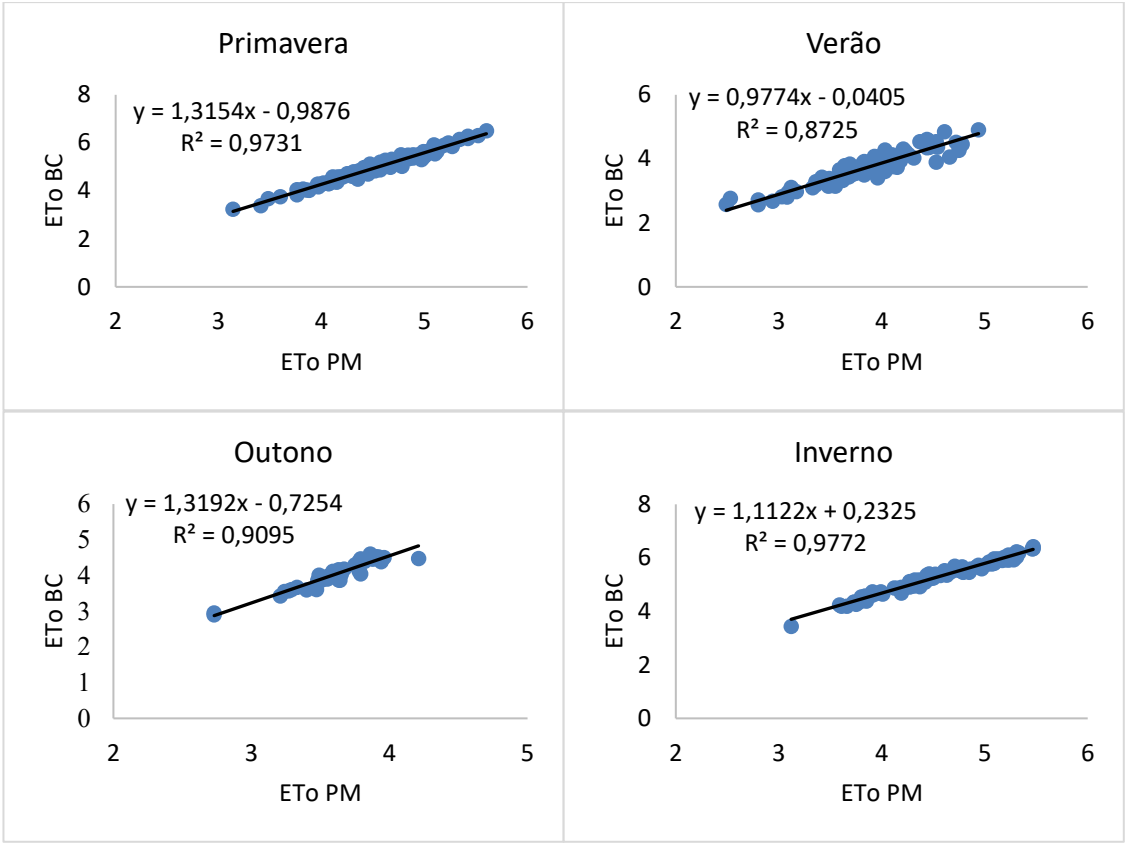


Legenda: maio (mai), jun (junho), julho (jul), agosto (ago), setembro (set), outubro (out), novembro (nov), dezembro (dez), janeiro (jan), fevereiro (fev), março (mar) e abril (abr).

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Observou-se a comparação entre os valores médios sazonais da ETo estimados pelos métodos de BC, PT e HS em relação ao método de PM-56 para o município de Codó, MA, no período de 2009 a 2013 (Figura 6, 7 e 8). Notou-se que o método de BC apresenta distintos ajustes ao modelo linear em relação ao método padrão PM-56 nas diferentes estações do ano, sendo que, na primavera e no inverno, as equações obtidas explicam 97% dos dados observados, enquanto que, no verão e no outono, explicam mais de 87% (Figura 6).

Figura 6 - Comparação entre os valores médios sazonais da evapotranspiração de referência (ETo) estimados pelo método de Blaney-Criddle (BC) em relação ao método de Penman-Monteith (PM) para o município de Codó, MA, no período de 2009 a 2013.

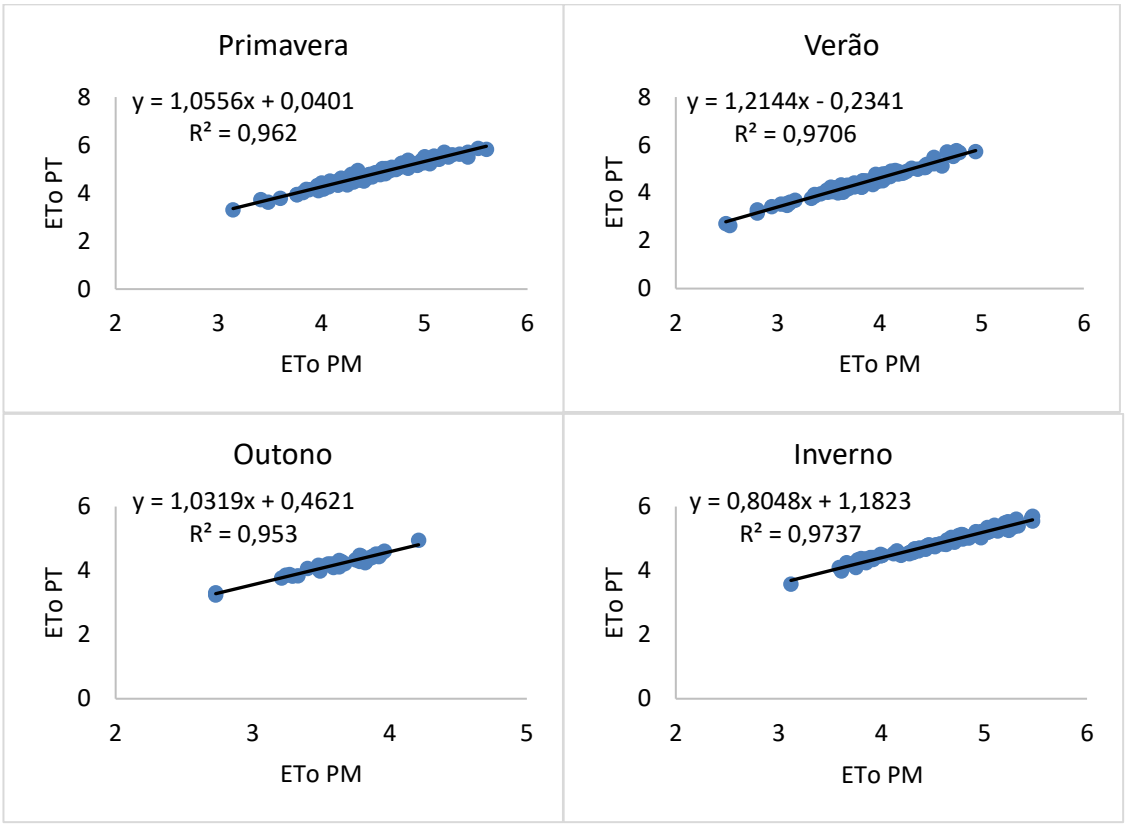


Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Resultados que corroboram este estudo foram reportados por Costa *et al.* (2017) para o Estado de Alagoas, os quais constataram que o melhor desempenho foi obtido pelo método de BC, quando comparado aos métodos de Radiação Solar, HS e Makkink em relação ao de PM-56.

Observando-se a dispersão dos dados e os coeficientes de determinação, percebeu-se que a metodologia de PT se ajustou ao modelo linear em relação ao método padrão de PM-56 para todas as estações do ano em que as equações obtidas explicam acima de 95% dos dados observados (Figura 7).

Figura 7 - Comparação entre os valores médios sazonais da evapotranspiração de referência (ETo) estimados pelo método de Priestley-Taylor (PT) em relação ao método padrão de Penman-Monteith (PM) para o município de Codó, MA, no período de 2009 a 2013.

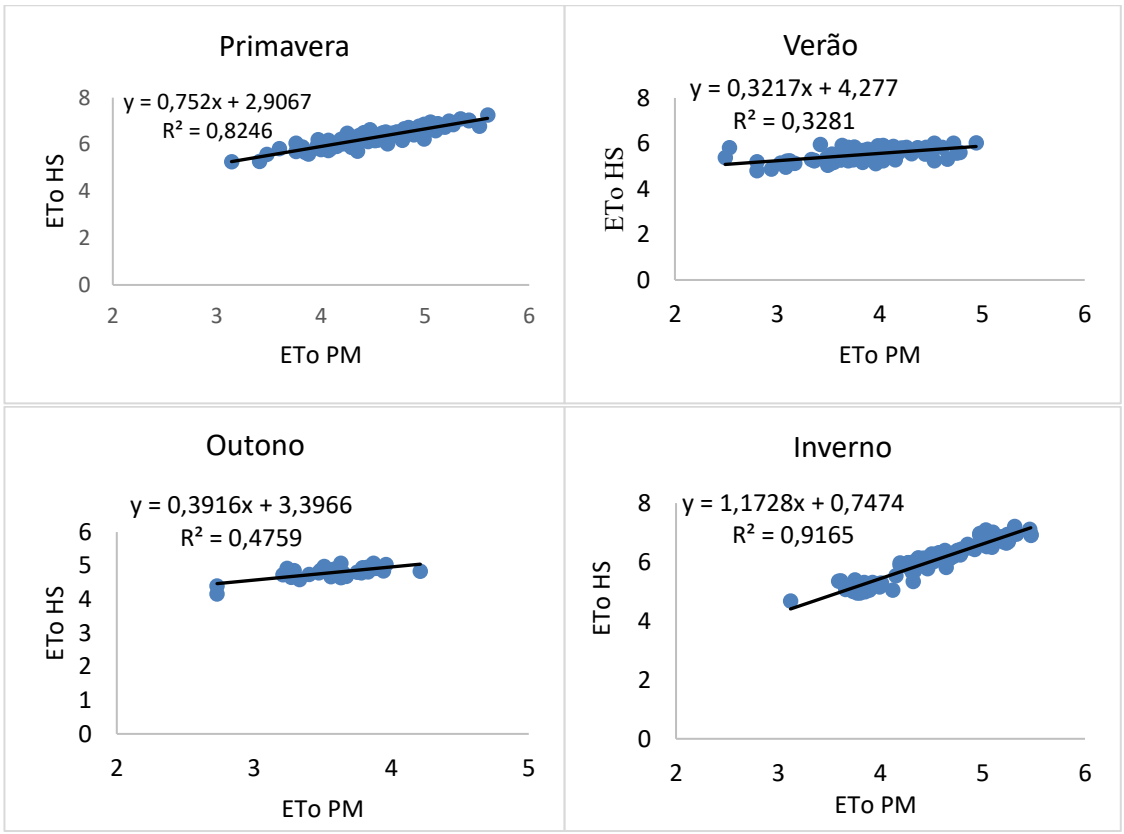


Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Passos *et al.* (2017) afirmaram que, para as condições climáticas no município de Chapadinha, MA, o método de PT foi o que melhor se ajustou em relação aos métodos de Camargo, HS e Jensen-Haise, sendo o seu uso recomendado como alternativa em relação ao método padrão de PM-56.

Para a metodologia de HS, os ajustes ao modelo linear em relação ao método padrão PM-56 para as estações da primavera e do inverno explicam 82% e 92% dos dados observados, respectivamente. Para o verão (33%) e outono (47%), as equações obtidas tiveram baixa representatividade dos dados disponíveis (Figura 8).

Figura 8 - Comparação entre os valores médios sazonais da evapotranspiração de referência (ETo) estimados pelo método de Hargreaves-Samani (HS) em relação ao método de Penman-Monteith (PM) para o município de Codó, MA, no período de 2009 a 2013.

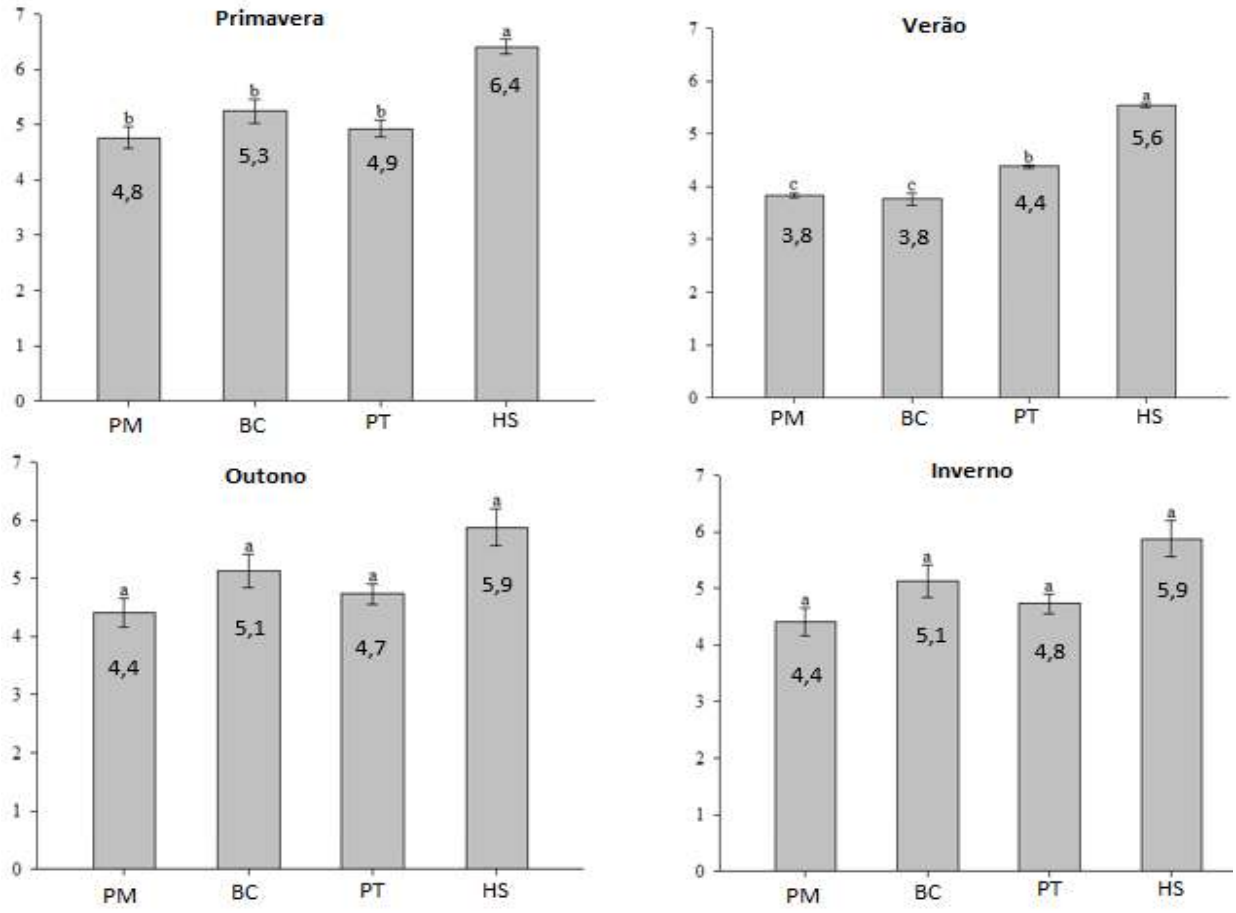


Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Santana *et al.* (2018), para o município de Balsas, MA, constataram que a equações de HS e PT superestimaram a ETo com uma diferença média relativa de 23,68 e 9,54% em comparação ao método de PM-56, respectivamente.

Observando-se a Figura 9, notou-se que o comportamento das metodologias difere de acordo com as estações do ano. A ETo estimada por HS superestima as obtidas por PM-56, BC e PT na primavera e no verão. A ETo obtida por BC e PT diferem significativamente da PM-56 somente no verão, apresentando-se como uma opção em substituição à metodologia de PM-56 para as estações primavera, outono e inverno em Codó, MA.

Figura 9 - Comparação de metodologias de estimativa de ETo ao longo das estações do ano para o município de Codó, MA. Médias ± erro-padrão da média (EPM) seguidas com a mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade.



Legenda: Penman-Monteith (PM), Blaney-Criddle (BC), Priestley-Taylor (PT) e Hargreaves-Samani (HS).
Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Na estação do verão, observou-se que, com PT, os valores de ETo superestimam os obtidos com BC e PM-56 e que não há diferença significativa entre os valores de ETo conseguidos com PM-56 e BC. Desta maneira, sabendo-se que o método padrão da FAO é PM-56 para a estação do verão, uma alternativa a essa metodologia seria BC, a qual necessita de menos dados de entrada para o cálculo da ETo.

Ainda pela Figura 9, observou-se que, para as estações do outono e inverno, não houve diferença estatística na obtenção da ETo com uso das metodologias de PM-56, BC, PT e HS para o município de Codó, MA.

Os valores de ETo obtidos por HS superestimaram estatisticamente os valores obtidos pelas demais metodologias comparadas, nas estações da primavera e verão, as quais

apresentam temperaturas médias do ar mais elevadas. Na metodologia HS, pela própria equação, considera-se em maior parte a radiação solar e temperatura do ar, descartando a umidade relativa do ar dentre outras variáveis, ou seja, com o aumento da temperatura média do ar ao longo das estações do ano, independentemente da alteração de outras variáveis meteorológicas, há um aumento na ETo estimada por HS.

Na região do município de Codó, MA, o período chuvoso coincide com o final da estação da primavera, o verão e início do outono com temperaturas do ar mais elevadas. Então, neste período, mantêm-se as elevadas temperaturas médias do ar e alta umidade relativa do ar, o que pode interferir para que os valores de HS superestimem a ETo.

Na Tabela 3, observam-se os valores do índice de exatidão ou concordância (d) de Willmott, do coeficiente de correlação (r), de determinação (R^2) e o índice de desempenho (c) para as estimativas da ETo em Codó, MA, no período de 2009 a 2013.

Tabela 3 - Índices estatísticos para as estimativas da evapotranspiração de referência no município de Codó, MA durante o período de 2009 a 2013.

Métodos	ETo média (mm/dia^{-1})	Porcentagem (%)	r	R^2	d	c	Classificação
PM-56	4,11	100,0	-	-	-	-	-
BC	4,42	107,0	0,94	0,89	0,79	0,74	Muito bom
HS	5,71	138,9	0,87	0,75	0,20	0,17	Péssimo
PT	4,56	110,9	0,95	0,91	0,64	0,61	Mediano

Legenda: r= coeficiente de correção; R^2= coeficiente de determinação; d= índice de exatidão ou concordância e o c= índice de desempenho; PM-56= método padrão de Penman-Monteith da FAO-56; BC= Blaney-Criddle; HS= Hargreaves-Samani; PT= Priestley-Taylor; ETo= evapotranspiração de referência.

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

O método de PT apresentou o melhor ajuste determinado pelo r, cujo valor foi de 0,95, seguido do método de BC e HS, que apresentaram valores de 0,94 e 0,87, respectivamente. O valor "d" do método de BC foi o que apresentou o maior valor de 0,79, seguido do método de PT com valor de 0,64, enquanto que o de HS apresentou valor muito baixo de 0,20 (Tabela 3). Resultados semelhantes aos desta pesquisa foram reportados por Lucena *et al.* (2016) para o município de Bom Jesus, PI, que obtiveram desempenho para o método de HS caracterizado como sofrível e apresentaram os índices: c= 0,5747 e d = 0,9999.

Os resultados deste estudo indicam que os R^2 apresentaram valores de 0,91, 0,89 e 0,75 para os métodos de PT, BC e HS, respectivamente (Tabela 3). Andrade Júnior *et al.* (2003)

obtiveram R^2 obtidos das análises de regressão lineares entre as duas estimativas de ETo de 0,69 para Parnaíba, PI, e 0,79 para Teresina, PI, indicando que considerável parte da variância total dos valores é explicada pelos métodos.

No município de Codó, MA, os valores obtidos pelo índice "c" de desempenho indicam que, quando comparados com o método de PM-56, o método de BC apresentou desempenho igual a 0,74, sendo considerado "muito bom", e os métodos de PT e HS apresentaram desempenho igual a 0,61 e 0,17, sendo classificados como "mediano" e "péssimo", respectivamente (Tabela 3). No período chuvoso, Ribeiro; Simeão; Santos (2016), para as condições climáticas de Piripiri, PI, em estudo com o objetivo de avaliar métodos de estimativa da ETo, obtiveram desempenho "muito bom" (c= 0,77; d= 0,98) para o método de PT e "sofrível" para o de HS. Já para o período seco, os métodos de HS e PT apresentaram desempenhos considerados "medianos".

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A ETo obtida pelo método de BC apresentou melhor ajuste para a estação do verão, por não diferir estatisticamente da estimativa da evapotranspiração de referência obtida pelo método de PM. Nas estações do outono e inverno, não houve diferença significativa entre os valores obtidos de evapotranspiração de referência pelas metodologias de PM, BC, PT e HS.

Na estação da primavera, a estimativa da ETo com HS superestimou estatisticamente as demais metodologias analisadas, não apresentando diferença significativa entre a ETo obtida por PM, BC e PT durante essa estação.

Na estação chuvosa, a metodologia proposta por BC apresentou melhor ajuste ao método padrão de PM com valores estatisticamente semelhantes.

O método de estimativa da ETo para os dados e períodos observados no município de Codó, MA, que apresentou melhor ajuste de dados com relação ao método padrão de PM foi o de BC, independente da estação do ano, haja vista que os valores não diferiram estatisticamente do método padrão de PM.

O método de HS não apresentou bom ajuste para a ETo nas condições climáticas de Codó, MA, para as estações mais quentes, ou seja, a primavera e o verão.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G. **REF-ET: Reference evapotranspiration calculation software for FAO and ASCE standardized equations.** Moscow: Ed. University of Idaho, 76, 2000.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. 1998. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements.** Irrigation and Drainage Paper, 56. Rome: FAO, 328 p.

ANDRADE JÚNIOR, A.S.; BASTOS, E.A.; SENTELHAS, P.C.; GAMA DA SILVA, A. 2003. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para Parnaíba e Teresina, Piauí. **Revista Brasileira de Agrometeorologia,** v. 11, p. 63-68, 2003.

BERNARDO, S.; MANTOVANI, E.C.; SILVA, D.D.; SOARES, A. A. **Manual de irrigação**. 9ª ed. Viçosa: Editora Universitária da UFV, 2019, v. 1, 545 p.

BLANEY, H.F.; CRIDDLE, W.O. **Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data**. Washington: Ed. USDA Soil Conservation Service, 1950, 48 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,** v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CASTRO JÚNIOR, Wady Lima. **Análise técnico-econômica de tecnologias de manejo da irrigação na produção de feijão-caupi na região dos cocais - MA**. 2012. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-Mg, 2012, 95 p.

COSTA, J. A.; RODRIGUES, G. P.; SILVA, N.D.; LOPES SOBRINHO, O. P.; COSTA, L. D. A. Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para Alagoas. **Revista Agrometeoros.** V. 25, p. 185-191, 2017. DOI: http://dx.doi.org/10.31062/agrom.v25i1.26277.

CORREIA FILHO, F. L. **Projeto Cadastro de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea, estado do Maranhão: relatório diagnóstico do município de Codó**. Teresina: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2011. 31 p.

FALAMARZI, Y.; PALIZDAN, N.; HUANG, Y.F.; LEE, T.S. Estimating evapotranspiration from temperature and wind speed data using artificial and wavelet neural networks (WNNs). **Elsevier - Agricultural Water Management.** v. 140, p. 26-36, 2014. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2014.03.014.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **World Reference Base for Soil Resources 2014: International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps**. FAO: Rome, Italy, 2015; 192p.

HARGREAVES, G.H. & SAMANI, Z.A. Reference crop evapotranspiration from temperature.

Journal of Applied Engineering in Agriculture, v. 1, p. 96–99, 1985.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Sistema de projeção UTM**. Meridiano: Greenwich. Datum: SIRGAS, 2017.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Codó**. 2023. Disponível em: https://pt.db-city.com/Brasil--Maranh%C3%A3o--Cod%C3%B3. Acesso em: 02 jan. 2023.

JENSEN, M.E.; BURMAN, R.D. & ALLEN, R.G. Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. **American Society of Civil Engineers Manual and Reports on Engineering Practice**, n. 70, New York, 1990, 360p.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. **Journal of Meteorologische Zeitschrift**, v. 15, p. 259-263, 2006.

LACERDA, Z. C.; TURCO, J. E. P. Estimation methods of reference evapotranspiration (ETo) for Uberlândia – MG. **Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engeneering**, v. 35, p. 27-38, 2015. Doi:http://dx.doi.org/10.1590/ 1809-4430·

LEÃO, R.A.O.; SOARES, A.A.; TEIXEIRA, A.S.; SILVA, D.D. Estimation of evaporation in the Banabuiú dam, in the state of Ceará, Brazil, by different combined methods, derived from the Penman equation. **Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engeneering** v. 33, p. 129-144, 2013. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162013000100014.

LEE, T.M.; NAJIM, M.M.M.; AMINUL, M.H. Estimating evapotranspiration of irrigated at the west coast of the Peninsular of Malaysia. **Journal of Applied Irrigation Science**, v. 39, n. 1, p. 103-117, 2004.

LONG, H.; SHUAI, X.; LEI, Q.; ZHANG, R. Spatiotemporal distribution of calibration coefficients of Hargreaves equation for estimating potential evapotranspiration in Mainland China. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 139, n. 4, p. 293-299, 2013. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943- 4774.0000534.

LOPES SOBRINHO, O. P.; CASTRO JUNIOR, W. L.; SANTOS, L. N. S.; SILVA, G. S.; TAVARES, G. G.; PEREIRA, A. I. S. Empirical methods for reference evapotranspiration estimation. **Journal Scientia Agraria Paranaensis**, v. 19, n. 3, p. 203-210, 2020. ISSN: 1983-1471.

LUCENA, F.A.P.; SILVA, E.M.; RIBEIRO, A.A.; SIMEÃO, M.; LUCENA, J.P.P. 2016. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência no município de Bom Jesus, PI. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 10, p. 663-675, 2016. DOI: http://dx.doi.org/10.7127/RBAI.V10N300404.

MANCOSU, N.; SNYDER, R.L.; SPANO, D. Procedures to develop a standardized reference evapotranspiration zone map. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 140, n. 9, p. 1-11, 2014. DOI:https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000697.

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,** v. 10, n. 30, p. 621-630, 2016. DOI: 10.7127/RBAI.V10N300379.

MOURA, A.R.C.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; ANTONINO, A.C.D.; AZEVEDO, J.R.G.; SILVA, B.B. & OLIVEIRA, L.M.M. Evapotranspiração de referência baseada em métodos empíricos em bacia experimental no Estado de Pernambuco, Brasil. **Revista Brasileira Meteorologia,** v. 28, p. 181-191, 2013. DOI: http://dx.doi.org/10.1590/S0102-77862013000200007.

MORAIS, L.F.; CAVALCANTE, A.C.R.; FURTADO, R.N.; GORAYEB, A.; AQUINO, D. do N.; NOGUEIRA, F.H.M.; CÂNDIDO, M.J.D. Spatial and Temporal analysis (2008-2017) of droughts and their effects on livestock in the Brazilian semi-arid region. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 95, p. e20220890, 2023.

PASSOS, V.L.M.; RAPOSO, B.A.; MENDES, J.T. Evapotranspiração de referência por diferentes métodos para o município de Chapadinha, MA. **Revista Agropecuária Científica no Semi-Árido,** v. 10, p. 59-66, 2017. DOI: http://dx.doi.org/10.30969/acsa.v13i2.868.

PEREIRA, L.S.; PAREDES, P.; JOVANOVIC, N. Soil water balance models for determining crop water and irrigation requirements and irrigation scheduling focusing on the FAO-56 method and the dual Kc approach. **Journal of Agricultural Water Management**, v. 241, p. 106357, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106357.

PRIESTLEY, C.H.B.; TAYLOR, R.J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly Weather Review,** v. 100, n. 2, p. 81-92, 1972.

RIBEIRO, A.A.; SIMEÃO, M.; SANTOS, A.R.B. Comparação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência no período chuvoso e seco em Piripiri (PI). **Revista Agrogeoambiental,** v. 8, p. 89-100, 2016. DOI: http://dx.doi.org/10.18406/2316-1817v8n32016862.

SANTOS, H.G. DOS.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C. DOS.; OLIVEIRA, V.A. DE.; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A. DE.; ARAUJO FILHO, J.C.DE.; OLIVEIRA, J.B.DE. & CUNHA, T.J.F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**, 5. ed. rev. e ampl. Brasília - DF: Embrapa, 2018.

SANTANA, J.S.; LIMA, E.F.; SILVA, W.A.; FERNANDES, M.C.; RIBEIRO, M.I.D. Equações de estimativa da evapotranspiração de referência (ETo) para a região de Balsas-MA. **Enciclopédia Biosfera,** v. 15, p. 1-14, 2018.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to Soil Taxonomy**. 12. ed. Washington, DC: USDA - Natural Resources Conservation Service, 2014. 372 p.

SHIRI, J.; NAZEMIA, A.H.; SADRADDINIA, A.A.; LANDERASB, G.; KISI, O.; FARDA, A.F.; MARTI, P. Comparison of heuristic and empirical approaches for estimating reference evapotranspiration from limited inputs in Iran. **Journal Computers and Electronics in Agriculture**, v. 108, p. 230-241, 2014. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.08.007.

SILVA, T.J.A.; MONTENEGRO, A.A.A.; RODRIGUES, J.J.V.; BONFIM, E.M.S. Aplicação de lisímetro de pesagem hidráulica na determinação da evapotranspiração de referência, em Petrolina, PE. **Engenharia Agrícola,** v. 23, p. 511-520, 2003.

SILVA, F.A.S.; AZEVEDO, C. A. V. The Assistat Software Version 7.7 and its use in the analysis of experimental data. **African Journal of Agricultural Research,** v. 11, p. 3733-3740, 2016. DOI: https://doi.org/10.5897/AJAR2016.11522.

SYSTAT SOFTWARE INC. **SigmaPlot versão 12.5**. San Jose, California, USA. Retrieved on Mar. 6, 2020. Disponível em: http://www.systatsoftware.com, 2013.

TAGLIAFERRE, C.; JESUS, S.R.A.; ROCHA, A.F.; COSTA, S.L.; SANTOS, S.C. Estudo comparativo de diferentes metodologias para determinação da evapotranspiração de referência em Eunápolis, BA. **Revista Caatinga**, v. 23, n. 1, p. 103-111, 2010.

WILLMOTT, C. J. On the validation of model. **Journal of Physical Geography,** v. 2, n.2, p. 184-194, 1981. DOI: https://doi.org/10.1080/02723646.1981.10642213.

WANNIARACHCHI, S.; SARUKKALIGE, R. A review on evapotranspiration estimation in agricultural water management: past, present, and future. **Journal of Hydrology**, v. 9, n. 7, p. 123, 2022. DOI: https://doi.org/10.3390/hydrology9070123.