



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS CRATEÚS**  
**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**LUAN SILVA ARAÚJO**

**DESEMPENHO DE MÉTODOS EMPÍRICOS NA ESTIMATIVA DA  
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA: UM ESTUDO NO CEARÁ**

**CRATEÚS**  
**2025**

LUAN SILVA ARAÚJO

DESEMPENHO DE MÉTODOS EMPÍRICOS NA ESTIMATIVA DA  
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA: UM ESTUDO NO CEARÁ

Trabalho de conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Engenharia Civil da Universidade  
Federal do Ceará, como requisito parcial à  
obtenção do título de bacharel em Engenharia  
Civil.

Orientador: Prof. Dr. Alan Michell Barros  
Alexandre.

CRATEÚS

2025

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- A69d Araújo, Luan Silva.  
Desempenho de métodos empíricos na estimativa da evapotranspiração de referência : Um estudo no Ceará / Luan Silva Araújo. – 2025.  
85 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Crateús, Curso de Engenharia Civil, Crateús, 2025.  
Orientação: Prof. Dr. Alan Michell Barros Alexandre.
1. Índices Climáticos. 2. Avaliação de modelos de previsão. 3. Coeficientes estatísticos. I. Título.  
CDD 620
-

LUAN SILVA ARAÚJO

DESEMPENHO DE MÉTODOS EMPÍRICOS NA ESTIMATIVA DA  
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA: UM ESTUDO NO CEARÁ.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Engenharia Civil da Universidade  
Federal do Ceará, como requisito parcial à  
obtenção do título de bacharel em Engenharia  
Civil.

Aprovada em: \_\_\_/\_\_\_/\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Alan Michell Barros Alexandre.  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Janine Brandão de Farias Mesquita  
Universidade Estadual do Ceará (UFC)

---

Prof<sup>a</sup>. Me. Karina Albuquerque da Silva  
Universidade Federal do Ceará (UFC)



A Deus.

Aos meus pais, Auzenir e Edmundo

Aos meus avós, Ana e Francisco.

## AGRADECIMENTOS

A jornada até a conclusão deste trabalho foi desafiadora, mas repleta de aprendizados e crescimento. Por isso, é com gratidão que dedico estas palavras àqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

Primeiramente, agradeço a Deus, por me conceder saúde, coragem e sabedoria para chegar até aqui.

Aos meus familiares, em especial aos meus avós, Ana Germano Filipe e Francisco José da Silva Filho (*in memoriam*), pais, Auzenir Maria Silva (*in memoriam*) e Edmundo Gouveia de Araújo, irmãos, Lucas, João, Cauã e Maria e namorada e cunhado, Maria Alicia Ferreira Barbosa e Alex Ferreira Barbosa, que sempre me apoiaram, incentivaram e compreenderam meus momentos de dedicação e esforço. O suporte incondicional de vocês foi essencial para que eu pudesse seguir em frente.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Alan Michell Barros, por ter me aceitado como orientando, pela paciência, dedicação e valiosas orientações que contribuíram significativamente para o desenvolvimento deste trabalho. Seu conhecimento e incentivo foram fundamentais para a construção deste estudo.

Aos professores participantes da banca examinadora, Prof<sup>a</sup>. Dra. Janine Brandão de Farias Mesquita e Prof<sup>a</sup>. Me. Karina Albuquerque da Silva, por aceitarem o convite e pela disponibilidade.

Aos colegas de curso e amigos que compartilharam comigo essa caminhada, em especial ao Dhieimisson Cavalcante, Alderyr Maia, Leonardo Sales e Pedro Augusto, pelos momentos de descontração, troca de conhecimento, pelas palavras de apoio e parceria.

E, por fim, a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, meu sincero muito obrigado.

“Mas os que esperam no Senhor renovarão as suas forças; subirão com asas como águias; correrão, e não se cansarão; caminharão, e não se fatigarão”

Isaías 40:31

## RESUMO

A estimativa da evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) é fundamental para o planejamento hídrico e a gestão dos recursos agrícolas, especialmente em regiões semiáridas como o Ceará, onde a escassez de água é uma realidade. Este estudo tem como objetivo comparar diferentes métodos empíricos de cálculo da  $ET_o$  em municípios cearenses, tomando como padrão o método de Penman-Monteith, parametrizado pela *Food and Agriculture Organization* (FAO). A comparação busca avaliar o desempenho dos métodos e identificar as abordagens mais adequadas as regiões com dados observado, considerando suas condições climáticas específicas. A análise comparativa foi realizada por meio de métricas estatísticas como os coeficientes de correlação ( $r$ ) de Pearson, de concordância ( $d$ ) de Willmott e de confiança ( $c$ ) de Camargo e Sentelhas. O valor para o índice de confiança ( $c$ ) foi tomado como uma medida de desempenho para triar e selecionar apenas as metodologias mais promissoras. Os cálculos e gráficos foram elaborados no *software* Microsoft Excel (versão 2016), enquanto os mapas foram gerados no QGIS Desktop (versão 3.28.0), utilizando o estimador de densidade de Kernel. Para sintetizar os resultados foram elaborados um gráfico e uma matriz de desempenho considerando o valor do índice de confiança ( $c$ ), a partir disso os métodos foram ranqueados em termos gerais considerando o seu valor médio e desvio padrão para toda a amostragem e de forma específica considerando os resultados para cada município. No geral Blaney-Criddle, Linacre e Penman tiveram os melhores desempenhos e tomando em consideração os resultados isolados em cada município, as análises comparativas evidenciaram desempenhos distintos, o que ratifica a importância de conhecer as condições climáticas locais e a forma como cada metodologia considera a influência das variáveis climáticas no processo de evapotranspiração na escolha do método de estimativa da  $ET_o$ , uma vez que fatores como umidade relativa, radiação solar e variação térmica influenciam diretamente os valores obtidos. Levando em conta condições climáticas específicas, os melhores resultados foram para Priestley & Taylor nos municípios úmidos e Linacre nos municípios secos.

**Palavras-chave:** Índices climáticos. Avaliação de modelos de previsão. Coeficientes estatísticos.

## ABSTRACT

The estimation of reference evapotranspiration ( $ET_o$ ) is essential for water planning and agricultural resource management, especially in semi-arid regions such as Ceará, where water scarcity is a reality. This study aims to compare different empirical methods for calculating  $ET_o$  in municipalities of Ceará, using the Penman-Monteith method, parameterized by the Food and Agriculture Organization (FAO), as a standard. The comparison seeks to evaluate the performance of the methods and identify the most suitable approaches for each municipality, considering their specific climatic conditions. The comparative analysis was conducted using statistical metrics such as the correlation coefficients: Pearson's ( $r$ ), Willmott's concordance index ( $d$ ), and Camargo and Sentelhas' confidence index ( $c$ ). The value of the confidence index ( $c$ ) was taken as a performance measure to screen and select only the most promising methodologies. Calculations and graphs were developed using Microsoft Excel (version 2016), while the maps were generated in QGIS Desktop (version 3.28.0) using the Kernel density estimator. To synthesize the results, a performance matrix and a graph were created, considering the confidence index ( $c$ ). Based on this, the methods were ranked both in general terms, taking into account their mean values and standard deviations across the entire sample, and specifically, by analyzing the results for each municipality. Overall, the Blaney-Criddle, Linacre, and Penman methods showed the best performances. When analyzing the results for individual municipalities, the comparative analyses highlighted distinct performances, reinforcing the importance of understanding local climatic conditions and how each methodology incorporates the influence of climatic variables in the evapotranspiration estimation process. Factors such as relative humidity, solar radiation, and thermal variation directly influence the obtained values, which should be considered when selecting an  $ET_o$  estimation method. Taking specific climatic conditions into account, the best results were obtained with Priestley & Taylor in the humid municipalities and Linacre in the dry municipalities.

**Keywords:** Climatic indices. Evaluation of forecasting models. Statistical coefficients.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fluxograma da metodologia de pesquisa.....	40
Figura 2: Localização dos municípios analisados. ....	41
Figura 3: Clima do estado do Ceará. ....	42
Figura 4: Diferença entre o método de Hargreaves e Penman-Monteith. ....	49
Figura 5: Diferença entre o método de Linacre e Penman-Monteith. ....	52
Figura 6: Diferença entre o método de Priestley & Taylor e Penman-Monteith. ....	55
Figura 7: Diferença entre o método de Benavides & Lopez e Penman-Monteith.....	58
Figura 8: Diferença entre o método de Jensen-Hayse e Penman-Monteith. ....	61
Figura 9: Diferença entre o método de Blaney-Criddle e Penman-Monteith.....	64
Figura 10: Diferença entre o método da Radiação Solar e Penman-Monteith. ....	67
Figura 11: Diferença entre o método de Romaneko e Penman-Monteith. ....	70
Figura 12: Diferença entre o método de Penman e Penman-Monteith.....	73

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Distribuição dos resultados para o índice de confiança $c$ . .....	46
Gráfico 2: Gráfico de desempenho.....	75

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valor de $K$ em relação à temperatura média anual. ....	29
Tabela 2: Critério de interpretação do desempenho dos modelos de previsão pelo índice $c$ . ...	39
Tabela 3: Localização das estações meteorológicas. ....	41
Tabela 4: Evapotranspiração de referência usando Penman-Monteith.....	47
Tabela 5: Evapotranspiração de referência usando Hargreaves. ....	48
Tabela 6: Análise comparativa entre o método de Hargreaves e Penman-Monteith. ....	50
Tabela 7: Evapotranspiração de referência usando Linacre. ....	51
Tabela 8: Análise comparativa entre o método de Linacre e Penman-Monteith. ....	53
Tabela 9: Evapotranspiração de referência usando Priestley & Taylor. ....	54
Tabela 10: Análise comparativa entre o método de Priestley & Taylor e Penman-Monteith...	56
Tabela 11: Evapotranspiração de referência usando Benavides & Lopez. ....	57
Tabela 12: Análise comparativa entre o método de Benavides & Lopez e Penman-Monteith.	59
Tabela 13: Evapotranspiração de referência usando Jensen-Hayse.....	60
Tabela 14: Análise comparativa entre o método de Jensen-Hayse e Penman-Monteith. ....	62
Tabela 15: Evapotranspiração de referência usando Blaney-Criddle.....	63
Tabela 16: Análise comparativa entre o método de Blaney-Criddle e Penman-Monteith.....	65
Tabela 17: Evapotranspiração de referência usando Radiação Solar. ....	66
Tabela 18: Análise comparativa entre o método da Radiação Solar e Penman-Monteith. ....	68
Tabela 19: Evapotranspiração de referência usando Romaneko. ....	69
Tabela 20: Análise comparativa entre o método de Romaneko e Penman-Monteith.....	71
Tabela 21: Evapotranspiração de referência usando Penman.....	72
Tabela 22: Análise comparativa entre o método de Penman e Penman-Monteith. ....	74
Tabela 24: Matriz de desempenho. ....	76
Tabela 25: Ranking dos métodos por município. ....	77



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i>
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
CODEVASF	Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba
$r$	Coefficiente de correlação de Pearson
$d$	Coefficiente de concordância de Willmott
$c$	Coefficiente de confiança de Camargo e Sentelhas
$n$	Número de dados utilizados
$o_j$	Valor observado
$x_j$	Valor estimado
$\bar{o}$	Média dos valores observados
$\bar{x}$	Média dos valores estimados
$ET_r$	Evapotranspiração real
$ET_p$	Evapotranspiração potencial
$ET_o$	Evapotranspiração de referência
$ET_c$	Evapotranspiração de cultura
$G$	Densidade do fluxo de calor no solo
$T_{máx}$	Temperatura máxima do ar
$T_{mín}$	Temperatura mínima do ar
$T_{méd}$	Temperatura média do ar
$T_{po}$	Temperatura do ponto de orvalho
$UR_{máx}$	Umidade relativa máxima do ar
$UR_{mín}$	Umidade relativa mínima do ar
$UR_{méd}$	Umidade relativa média do ar
$RH$	Umidade relativa média mensal
$e_s$	Pressão de saturação do vapor
$e_a$	Pressão atual do vapor
$e_s(T_{máx})$	Pressão de vapor de saturação para temperatura máxima
$e_s(T_{mín})$	Pressão de vapor de saturação para temperatura mínima
$e_s(T_{méd})$	Pressão de vapor de saturação para temperatura média
$e^o(T_{po})$	Pressão de vapor de saturação da temperatura do ponto de orvalho
$e^o(T_{méd})$	Pressão de vapor de saturação da temperatura média do ar

$DVP$	Déficit do vapor de saturação
$P_a$	Pressão atmosférica
$Y$	Fator psicrométrico
$\Delta$	Declinação da curva de saturação do vapor de água
$W$	Fator de ponderação
$\lambda$	Calor latente de vaporização
$U_2$	Velocidade do vento (média diária) a 2m acima da superfície do solo
$U_Z$	Velocidade obtida na estação automática ou convencional de altura Z
$Z$	Altura do anemômetro
$z$	Altitude da estação
$h$	Altitude local
$E_a$	Poder de evaporação do ar
$dr$	Distância relativa Sol-Terra
$\delta$	Inclinação solar
$\omega_s$	Ângulo solar
$j$	Dia Juliano
$\varphi$	Latitude da estação meteorológica
$N$	Fotoperíodo
$n$	Insolação total
$p$	Porcentagem total do fotoperíodo
$r$	Poder refletor
$R_a$	Radiação solar extraterrestre
$R_s$	Radiação solar global
$R_{so}$	Radiação de onda longa para dias claros
$R_{NC}$	Radiação de onda curta
$R_{NL}$	Radiação de onda longa
$R_{ns}$	Balanco da radiação de ondas curtas
$R_{nl}$	Balanco da radiação de ondas longas
$R_n$	Radiação líquida
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann
$i$	Índice calor mensal
$I$	Índice calor anual
$ND$	Número de dias do mês

$K$	Fator de ajuste de Camargo que varia com a temperatura média anual
$\alpha$	Parâmetro de Priestley & Taylor
$a$	Coefficiente de Frevert <i>et al.</i> (1983)
$b$	Coefficiente de Frevert <i>et al.</i> (1983)
$a_t$	Fator de umidade relativa de Turc
$P_t$	Densidade de vapor d'água
$K_p$	Coefficiente de conversão da evapotranspiração do tanque "Classe A" em $ET_o$
$E_v$	Lâmina de evaporação do tanque "Classe A"
$B$	Bordadura da área
<i>csv</i>	<i>Comma Separated Value</i>
<i>SIG</i>	Sistema de informações geográficas
$k$	Função de Kernel
$h$	Raio de busca
$x$	Posição do centro de cada célula do raster de saída
$X_i$	Posição do ponto $i$ proveniente do centroide de cada polígono
$n$	Número total de focos de calor
H	Hargreaves
L	Linacre
PT	Priestley & Taylor
BL	Benavides & Lopez
JH	Jensen-Hayse
BC	Blaney-Criddle
RS	Radiação Solar
R	Romaneko
P	Penman

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
<b>1.1 Contextualização</b> .....	<b>17</b>
<b>1.2 Justificativa</b> .....	<b>18</b>
<b>1.3 Objetivos</b> .....	<b>18</b>
<i>1.3.1 Objetivo Geral</i> .....	<i>18</i>
<i>1.3.2 Objetivos específicos</i> .....	<i>19</i>
<b>1.4 Roteiro temático</b> .....	<b>19</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>20</b>
<b>2.1 Conceitos e definições</b> .....	<b>20</b>
<b>2.2 Influência das condições climáticas na evapotranspiração</b> .....	<b>21</b>
<b>2.3 Métodos empíricos para estimativa da evapotranspiração</b> .....	<b>22</b>
<i>2.3.1 Método de Penman-Monteith</i> .....	<i>23</i>
<i>2.3.2 Método de Thornthwaite</i> .....	<i>27</i>
<i>2.3.3 Método de Hargreaves</i> .....	<i>28</i>
<i>2.3.4 Método de Linacre</i> .....	<i>28</i>
<i>2.3.5 Método de Camargo</i> .....	<i>29</i>
<i>2.3.6 Método de Makkink</i> .....	<i>29</i>
<i>2.3.7 Método de Priestley &amp; Taylor</i> .....	<i>30</i>
<i>2.3.8 Método de Benavides &amp; Lopez</i> .....	<i>30</i>
<i>2.3.9 Método de Jensen-Hayse</i> .....	<i>31</i>
<i>2.3.10 Método de Blaney-Criddle</i> .....	<i>31</i>
<i>2.3.11 Método de Turc</i> .....	<i>32</i>
<i>2.3.12 Método de Hamon</i> .....	<i>32</i>
<i>2.3.13 Método de Kharrufa</i> .....	<i>33</i>
<i>2.3.14 Método da Radiação Solar</i> .....	<i>33</i>
<i>2.3.15 Método de Romaneko</i> .....	<i>33</i>
<i>2.3.16 Método de Penman</i> .....	<i>34</i>
<i>2.3.17 Método do Tanque “Classe A”</i> .....	<i>35</i>
<i>2.3.18 Método do Balanço de Energia</i> .....	<i>36</i>
<b>2.4 Avaliação do desempenho</b> .....	<b>36</b>
<i>2.4.1 Coeficiente de correlação <math>r</math> de Pearson</i> .....	<i>37</i>
<i>2.4.2 Coeficiente de concordância <math>d</math> de Willmott</i> .....	<i>38</i>

<i>2.4.3 Coeficiente de confiança c de Camargo e Sentelhas</i> .....	38
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>40</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>46</b>
4.1 Seleção dos métodos .....	46
4.2 Método de Penman-Monteith .....	47
4.3 Método de Hargreaves .....	48
4.4 Método de Linacre.....	51
4.5 Método de Priestley & Taylor.....	54
4.6 Método de Benavides & Lopez.....	57
4.7 Método de Jensen-Hayse.....	60
4.8 Método de Blaney-Criddle.....	63
4.9 Método da Radiação Solar.....	66
4.10 Método de Romaneko.....	69
4.11 Método de Penman .....	72
4.12 Avaliação geral dos métodos .....	75
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	<b>80</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>82</b>

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

Diferentemente de outros recursos naturais, a água doce possui poucos substitutos para a maioria de seus usos e, embora seja renovável, sua distribuição geográfica e disponibilidade variam significativamente. A maior parte da água doce da Terra está inacessível, armazenada em geleiras e aquíferos profundos, restando apenas uma fração disponível para uso humano. Esse recurso essencial sustenta ecossistemas, abastece populações e viabiliza atividades agrícolas e industriais, mas enfrenta crescentes desafios devido ao aumento da demanda e às mudanças ambientais. Assim, compreender os limites da disponibilidade hídrica e aprimorar sua gestão é fundamental para garantir a sustentabilidade desse bem vital (POSTEL; DAILY; EHRLICH, 1996).

Segundo o Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2024 (KONCAGÜL *et al.*, 2024, p. 2), “em todo o mundo, a agricultura é responsável por cerca de 70% das retiradas de água doce, seguida pela indústria (pouco menos de 20%) e pelos usos domésticos (ou municipais) (cerca de 12%)”.

Apesar da participação significativa no consumo de água, na agricultura a média estimada de eficiência na irrigação a nível global é de 37% (PAZ *et al.*, 2000).

Embora o Brasil tenha a maior disponibilidade hídrica do mundo, esse recurso é distribuído de forma desigual. Das reservas brasileiras, 68% estão no Norte, enquanto há apenas 3% no Nordeste (RIBEIRO, 2017).

Nesse sentido, no contexto do estado do Ceará, onde a escassez de água é agravada por longos períodos de seca e baixa precipitação, torna-se essencial adotar um manejo eficiente dos recursos hídricos na agricultura irrigada. A otimização do uso da água é fundamental para garantir a sustentabilidade da produção agrícola e minimizar os impactos da escassez hídrica na região.

A evapotranspiração é um processo fundamental no ciclo hidrológico, englobando a perda de água do solo por evaporação e a transpiração das plantas (EMBRAPA, 2010). Sabendo disso, ao estimar corretamente a evapotranspiração, é possível determinar a quantidade exata de água necessária para cada cultura, evitando tanto o desperdício quanto a deficiência hídrica, resultando em maior eficiência no uso dos recursos hídricos e aumento da produtividade agrícola.

Stone *et al.* (1995, p. 9) reforça isso quando diz que, “Na agricultura irrigada, o conhecimento da evapotranspiração máximas nos diferentes estádios de desenvolvimento das

plantas cultivadas é fundamental para o planejamento e manejo da irrigação”.

A luz dos fatos supracitados fica evidente a importância de estimar a evapotranspiração a fim de otimizar o uso dos recursos hídricos na agricultura.

## 1.2 Justificativa

Para determinar a evapotranspiração de referência, em qualquer região, Allen *et al.* (1998) recomendam o método de Penman-Monteith, que é amplamente adotado pela *Food and Agriculture Organization* (FAO). Isso se deve à sua base física sólida e à alta precisão nas estimativas da evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ). No documento *Crop Evapotranspiration – Guidelines for Computing Crop Water Requirements*, os autores afirmam que "o método de Penman-Monteith é recomendado como o único método padrão para calcular a evapotranspiração de referência" (Allen *et al.*, 1998, p. 17). Apesar disso, esse método exige uma gama completa de dados meteorológicos que, em muitas localidades, podem ser escassos ou de difícil obtenção.

Diversas equações foram criadas para estimar a evapotranspiração potencial das culturas de referência. No entanto, os principais desafios associados à maioria desses métodos envolvem a disponibilidade de dados climatológicos e a necessidade de ajustes locais. Em muitos países em desenvolvimento, os dados climatológicos costumam ser incompletos e imprecisos (HARGREAVES; SAMANI, 1985).

Diante disso, torna-se evidente a necessidade de avaliar o desempenho de metodologias empíricas alternativas para a estimativa da evapotranspiração em municípios cearenses, permitindo identificar quais métodos são mais adequados para cada região e condição climática específica. Esse conhecimento contribuirá para subsidiar futuras aplicações em áreas como a agricultura irrigada, o manejo sustentável da água e o monitoramento ambiental, oferecendo suporte técnico e científico para tomadores de decisão.

Assim, os resultados obtidos poderão fornecer recomendações práticas sobre a escolha do método mais apropriado para estimativas locais da  $ET_o$ , considerando as limitações e características climáticas do Ceará.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desse trabalho é avaliar diferentes metodologias empíricas de estimativa da evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) no estado do Ceará.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Utilizar o método de Penman-Monteith como padrão de referência e analisar a precisão e aplicabilidade em diferentes condições climáticas de métodos empíricos;
- Calcular os valores mensais de evapotranspiração de referência utilizando métodos empíricos, com base em dados meteorológicos fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET);
- Analisar a variabilidade espacial da  $ET_o$  entre os modelos de previsão e valores observados no Ceará;
- Avaliar o desempenho dos métodos empíricos por meio de métricas estatísticas, como coeficientes de correlação ( $r$ ) de Pearson, concordância ( $d$ ) de Willmott e confiança ( $c$ ) de Camargo e Sentelhas;
- Identificar em quais condições climáticas os métodos estudados apresentam melhor desempenho;
- Propor recomendações sobre o uso dos métodos avaliados para diferentes regiões do Ceará, com base nos resultados obtidos.

### 1.4 Roteiro temático

Este trabalho é seccionado em cinco partes, onde a primeira seção contextualiza o tema, bem como define a problemática, justificativa e objetivos do estudo. A seção seguinte, formada por quatro partes, inicialmente apresenta conceitos e definições importantes para o entendimento do estudo, sequencialmente é dissertado sobre a influência das condições climáticas no processo de evapotranspiração, a terceira parte expõe as metodologias usadas para estimar a evapotranspiração de referência que fornecerão os resultados para compor esse trabalho e por fim a última parte descreve os parâmetros e métricas estatísticas que servirão de alicerce para comparar os resultados e determinar o desempenho de cada metodologia em cada município.

A terceira seção traz uma descrição metodológica, que expõe os passos necessários para obter os dados, tratá-los, entendê-los e produzir os resultados. Sequencialmente, na quarta seção são apresentados os produtos do estudo, interpretados e as discussões devidas, considerando os resultados de cada método para a  $ET_o$  em cada município, bem como os resultados dos índices estatísticos, de modo a classificar o seu desempenho. Por último, compondo a quinta seção, é evidenciado as conclusões oriundas dos resultados deste estudo.



## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nesta seção será discorrido sobre os conhecimentos necessários para a elaboração deste estudo, sendo: definições e tipos de evapotranspiração, o clima como condicionante do processo de evapotranspiração, métodos empíricos para estimativa da evapotranspiração, métricas e parâmetros estatísticos para avaliação do desempenho das metodologias analisadas.

### 2.1 Conceitos e definições

Segundo Coelho Filho *et al.* (2011, p. 93), “A evapotranspiração pode ser definida como a soma da quantidade de água perdida por uma superfície coberta com vegetação, por meio da evaporação direta da superfície do solo e da água perdida pelas plantas por transpiração”.

Na irrigação e climatologia, a evapotranspiração é medida como a quantidade de água perdida por unidade de área, sendo expressa em termos de altura ou lâmina d’água, geralmente em milímetros por unidade de tempo. Como exemplo, um milímetro de evapotranspiração corresponde à transferência de um litro de água para a atmosfera por metro quadrado da superfície considerada na projeção horizontal (EMBRAPA, 2010).

Na literatura existem quatro conceitos para a evapotranspiração: real, potencial, de referência e de cultura. O seu tipo depende das condições da superfície e disponibilidade de água no solo consideradas.

A evapotranspiração real corresponde à quantidade de água que retorna à atmosfera por meio da evaporação e da transpiração das plantas, considerando as condições reais do clima e a disponibilidade de umidade no solo. Isto é, por representar a quantidade efetiva de água transferida da superfície (solo e vegetação) para a atmosfera sob condições ambientais específicas, a  $ET_r$  só pode ser obtida com precisão por meio de medições diretas, utilizando métodos de aferição em campo (MATZENAUER, 1992).

A evapotranspiração potencial, apresentada pela primeira vez no final dos anos 40 e início dos anos 50 pelo método de Penman, é essencialmente definida como a quantidade de água perdida para a atmosfera, por meio da transpiração das plantas e da evaporação do solo, em um determinado período, a partir de uma vegetação rasteira, densa e uniformemente distribuída, que cobre completamente o solo, sem enfrentar restrições de disponibilidade hídrica (TANNER; PELTON, 1960).

O conceito de evapotranspiração potencial  $ET_p$  apresenta limitações devido às suas condições de contorno. Embora seja definido considerando uma vegetação rasteira, verde e

uniforme, há uma diversidade de culturas que se enquadram nessa descrição, o que pode gerar ambiguidades. Além disso, a  $ET_p$  desconsidera as restrições hídricas do solo, assumindo disponibilidade ilimitada de água, o que pode não representar as condições reais observadas no ambiente (EMBRAPA, 2010).

A fim de evitar as ambiguidades provenientes do conceito da evapotranspiração potencial, a evapotranspiração de referência foi definida como sendo a taxa de evapotranspiração de uma cultura de referência hipotética com 0,12 metros de altura e um albedo de 0,23, condições semelhantes à evapotranspiração de uma grande área coberta por vegetação rasteira, de altura uniforme, com crescimento vigoroso, água disponível em quantidade suficiente e solo totalmente coberto (SMITH *et al.*, 1990). Por fornecer condições de contornos padronizadas e de fácil reprodução no cultivo, a  $ET_o$  é amplamente utilizada nas práticas agrícolas, especialmente para o planejamento de irrigação.

Por fim, a evapotranspiração de cultura, é caracterizada pela liberação de vapor d'água para a atmosfera em uma cultura saudável, livre de doenças e pragas, e que se desenvolve em uma área de um hectare ou mais, sob condições ideais de solo, como umidade e fertilidade. Dessa forma, a evapotranspiração da cultura depende das condições meteorológicas e das características da cultura cultivada (EMBRAPA, 2010).

## **2.2 Influência das condições climáticas na evapotranspiração**

Em situações ideais, com abundância de água no solo, a evapotranspiração depende unicamente das condições climáticas e do tipo de vegetação. Esse processo está essencialmente ligado à energia solar necessária para a transformação do estado físico da água, tornando a radiação solar o principal fator climático envolvido. A energia necessária para as plantas pode ser fornecida tanto pela radiação solar quanto pela energia advectiva. Em áreas úmidas, a radiação solar é a principal fonte de calor para as culturas, enquanto em climas secos, a advecção tem um papel mais significativo (STONE; SILVEIRA, 1995).

Stone e Silveira (1995) destacam que a temperatura do ar está diretamente relacionada à radiação solar e, por consequência, à evaporação. Eles explicam que, ao aumentar a temperatura do ar, há um incremento na intensidade da evaporação, pois isso permite que uma maior quantidade de vapor d'água seja retida no mesmo volume de ar ao atingir o ponto de saturação. Essa dinâmica ocorre devido à relação direta entre o fluxo de vapor d'água para a atmosfera e o déficit de saturação, que é dado pela diferença entre a pressão de saturação do vapor d'água e a pressão atual do vapor d'água. Assim, quanto maior o déficit de saturação,

maior será a taxa de evaporação, sendo que o aumento da temperatura eleva a pressão de saturação, intensificando esse déficit e, conseqüentemente, a evaporação.

No estudo de Ismael Filho *et al.* (2015), onde é analisado a influência das variáveis climáticas sobre a evapotranspiração, tem como resultado que a radiação solar e a temperatura média são as variáveis com maior influência sobre a evapotranspiração de referência, com correlações estimadas em 0,94 e 0,74, respectivamente.

Diferente da temperatura, a umidade tem relação oposta com evapotranspiração. À medida que ela cresce, o processo de evapotranspiração é desfavorecido, pois o valor de  $e$  aumenta reduzindo o déficit de saturação (EMBRAPA, 2010).

Essa ideia é corroborada por Ismael Filho *et al.* (2015), que destacam a influência da umidade relativa do ar sobre a evapotranspiração, afirmando que, assim como a radiação solar e a temperatura, a umidade relativa tem um grande impacto, mas apresenta uma relação inversa com a evapotranspiração, com um valor de -0,87.

O vento influencia a evaporação ao remover e renovar o ar na camada imediatamente acima da superfície de evaporação. Em geral, o vento desloca o ar saturado ou quase saturado dessa camada, deixando o ar mais seco sobre a superfície, o que permite que o processo de evaporação continue de forma constante (STONE; SILVEIRA, 1995).

Segundo Ismael Filho *et al.* (2015), a velocidade do vento tem uma influência limitada no processo de evapotranspiração, uma vez que essa variável apresentou a menor correlação com a evapotranspiração, com um valor de apenas 0,019.

### **2.3 Métodos empíricos para estimativa da evapotranspiração**

Os métodos empíricos são amplamente utilizados para estimar a evapotranspiração devido à sua simplicidade e facilidade de aplicação, principalmente quando há uma limitação para a captação de dados mais complexos que exigem equipamentos de medição mais sofisticados. Normalmente, são baseados em fórmulas matemáticas simples e variáveis facilmente acessíveis, o que os torna uma alternativa fácil e razoavelmente precisa para estimar a evapotranspiração.

Nas seções subsequentes serão apresentados os métodos empíricos que compõem esse estudo, obtidos a partir do documento da EMBRAPA “Evapotranspiração – Uma Revisão sobre os Métodos Empíricos” (EMBRAPA, 2010).

### 2.3.1 Método de Penman-Monteith

A equação de Penman-Monteith (1998) é expressa pela Equação 1.

$$ET_o = \frac{0,408\Delta * (R_n - G) + Y * \frac{900}{T_{méd} + 273,16} * U_2 * (e_s - e_a)}{\Delta + Y * (1 + 0,34U_2)} \quad (1)$$

Onde:

- $R_n$  – Saldo de radiação;
- $G$  – Densidade do fluxo de calor no solo;
- $\Delta$  – Declinação da curva de saturação do vapor de água;
- $U_2$  – Velocidade do vento (média diária) a 2m acima da superfície do solo;
- $T_{méd}$  – Temperatura média do ar;
- $e_s$  – Pressão de saturação do vapor;
- $e_a$  – Pressão atual do vapor;
- $Y$  – Fator psicrométrico.

Os valores de velocidade do vento podem ser transformados de qualquer altura para 2 metros pela Equação 2.

$$U_2 = U_Z * \frac{4,87}{\ln(67,8 * Z - 5,42)} \quad (2)$$

Onde:

- $U_Z$  – Velocidade obtida na estação automática ou convencional de altura Z;
- $Z$  – Altura do anemômetro.

A pressão de vapor de saturação para qualquer temperatura pode ser obtida pela Equação 3.

$$e_s(T) = 0,6108 * e^{\left(\frac{12,27 * T}{T + 237,3}\right)} \quad (3)$$

Onde:

- $T$  – Temperatura.

Conhecendo a Equação 3 é possível calcular a pressão de vapor de saturação para as temperaturas máximas, mínimas e médias, e por conseguinte determinar os valores para  $e_s$  e  $e_a$  através das Equações 4 e 5, respectivamente.

$$e_s = \frac{e_s(T_{máx}) + e_s(T_{mín})}{2} \quad (4)$$

Onde:

- $e_s(T_{máx})$  – Pressão de vapor de saturação para temperatura máxima;
- $e_s(T_{mín})$  – Pressão de vapor de saturação para temperatura mínima.

$$e_a = e_s(T_{méd}) * \frac{UR_{méd}}{100} \quad (5)$$

Onde:

- $e_s(T_{méd})$  – Pressão de vapor de saturação para temperatura média;
- $UR_{méd}$  – Umidade relativa média do ar.

Para calcular a constante psicrométrica Y, antes é necessário estimar a pressão atmosférica dada pela Equação 6.

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

Onde:

- $z$  – Altitude da estação de coleta dos dados.

Uma vez que  $P_a$  é conhecido, a pressão psicrométrica Y pode ser determinar a partir da Equação 7.

$$Y = 0,664742 * 10^{-3} * P_a \quad (7)$$

Onde:

- $P_a$  – Pressão atmosférica.

Antes de estimar o saldo de radiação  $R_n$  precisamos conhecer outras variáveis

auxiliares, como:

$$dr = 1 + 0,033 * \cos(0,0172 * j) \quad (8)$$

$$\delta = 0,409 * \sin((0,0172 * j) - 1,39) \quad (9)$$

$$\omega_s = \cos^{-1} \left( \tan^{-1} \left( \varphi * \frac{\pi}{180} \right) * \tan(\delta) \right) \quad (10)$$

Onde:

- $dr$  – Distância relativa Sol-Terra;
- $\delta$  – Inclinação solar;
- $\omega_s$  – Ângulo solar;
- $j$  – Dia Juliano;
- $\varphi$  – Latitude da estação meteorológica.

A partir das Equações 8, 9 e 10, é possível determinar a radiação solar extraterrestre ( $R_a$ ) dada pela Equação 11 e por conseguinte a radiação de onda longa para dias claros ( $R_{so}$ ) dada pela Equação 12.

$$R_a = 37,6 * dr * (\omega_s * \sin \varphi * \sin \delta + \cos \varphi * \cos \delta * \sin \omega_s) \quad (11)$$

$$R_{so} = \left( 0,75 + 2 * \frac{z}{100000} \right) * R_a \quad (12)$$

Onde:

- $dr$  – Distância relativa Sol-Terra;
- $\delta$  – Inclinação solar;
- $\omega_s$  – Ângulo solar;
- $\varphi$  – Latitude da estação meteorológica;
- $z$  – Altitude da estação de coleta dos dados.

O fotoperíodo ( $N$ ) pode ser estimado a partir da Equação 13.

$$N = \frac{24}{\pi} * \omega_s \quad (13)$$

Onde:

- $\omega_s$  – Ângulo solar.

Conhecendo o valor de  $N$ , podemos determinar a radiação solar global pela Equação 14, usando também a insolação total ( $n$ ) que pode ser obtida através dos dados fornecidos por estações meteorológicas.

$$R_s = \left(0,25 + 0,5 * \frac{n}{N}\right) * R_a \quad (14)$$

Onde:

- $R_a$  – Radiação solar extraterrestre;
- $n$  – Insolação total;
- $N$  – Fotoperíodo.

A radiação de onda curta ( $R_{NC}$ ) pode ser calculada pela Equação 15 uma vez que o valor da radiação solar global ( $R_s$ ) é conhecido.

$$R_{NC} = 0,77 * R_s \quad (15)$$

Onde:

- $R_s$  – Radiação solar global.

Usando os resultados das Equações 5 e 12, é possível calcular a radiação de onda longa ( $R_{NL}$ ) pela Equação 16.

$$R_{NL} = \sigma \left[ \frac{(T_{máx} + 273,16)^4 + (T_{mín} + 273,16)^4}{2} \right] (0,34 - 0,14\sqrt{e_a}) \left( 1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (16)$$

Onde:

- $\sigma$  – Constante de Stefan-Boltzmann;
- $T_{máx}$  – Temperatura máxima;
- $T_{mín}$  – Temperatura mínima;
- $e_a$  – Pressão atual do vapor;
- $R_s$  – Radiação solar global;
- $R_{so}$  – Radiação de onda longa para dias claros.

Por fim, a radiação líquida  $R_n$  pode ser calculada através da Equação 17.

$$R_n = R_{NC} - R_{NL} \quad (17)$$

Onde:

- $R_{NC}$  – Radiação de onda curta;
- $R_{NL}$  – Radiação de onda longa.

### 2.3.2 Método de Thornthwaite

A equação de Thornthwaite (1948) é expressa pela Equação 18.

$$ET_o = 16 * \left( \frac{10 * T_{méd}}{I} \right)^a * \frac{N}{12} * \frac{ND}{30} \quad (18)$$

Onde:

- $T_{méd}$  – Temperatura média do ar;
- $I$  – Índice calor anual;
- $a$  – Coeficiente;
- $N$  – Fotoperíodo do 15º dia do mês;
- $ND$  – Número de dias do mês.

O índice de calor anual é definido pela soma de 12 valores mensais do índice de calor ( $i$ ) dados pelas Equações 19 e 20.

$$i = \left( \frac{T_{méd}}{5} \right)^{1,514} \quad (19)$$

$$I = \sum_1^{12} i \quad (20)$$

Onde:

- $T_{méd}$  – Temperatura média do ar;
- $i$  – Índice de calor mensal.

Uma vez que  $I$  é conhecido, pode-se calcular o coeficiente  $a$  pela Equação 21.



$$a = 6,75 * 10^{-7} * I^3 - 7,71 * 10^{-5} * I^2 + 0,01791 * I + 0,49239 \quad (21)$$

Onde:

- $I$  – Índice de calor anual.

### 2.3.3 Método de Hargreaves

A equação de Hargreaves (1974) é expressa pela Equação 22.

$$ET_o = 0,408 * 0,0023 * (T_{méd} + 17,8) * (T_{máx} - T_{mín})^{0,5} * R_a \quad (22)$$

Onde:

- $T_{méd}$  – Temperatura média do ar;
- $T_{máx}$  – Temperatura máxima do ar;
- $T_{mín}$  – Temperatura mínima do ar;
- $R_a$  – Radiação solar extraterrestre.

### 2.3.4 Método de Linacre

A equação de Linacre (1977) é expressa pela Equação 23.

$$ET_o = \frac{500 * \left( \frac{T_{méd} + 0,006 * h}{100 - \varphi} \right) + 15 * (T_{méd} - T_{po})}{(80 - T_{méd})} \quad (23)$$

Onde:

- $T_{méd}$  – Temperatura média do ar;
- $h$  – Altitude local;
- $\varphi$  – Latitude;
- $T_{po}$  – Temperatura do ponto de orvalho.

A temperatura do ponto de orvalho pode ser obtida pela Equação 24.

$$T_{po} = \frac{237,3 * \log(e_a) - 156,8}{8,16 - \log(e_a)} \quad (24)$$

Onde:

- $e_a$  – Pressão atual do vapor.

### 2.3.5 Método de Camargo

A equação de Camargo (1971) é expressa pela Equação 25.

$$ET_o = K * R_a * T_{méd} * ND \quad (25)$$

Onde:

- $K$  – Fator de ajuste que varia com a temperatura média anual;
- $R_a$  – Radiação solar extraterrestre;
- $T_{méd}$  – Temperatura média do ar;
- $ND$  – Número de dias do mês.

O valor de  $K$  pode ser obtido conforme os limites estabelecidos na Tabela 1.

Tabela 1: Valor de  $K$  em relação à temperatura média anual.

$T_a$ (°C)	Valor de $K$
< 23,5	0,01
23,6 a 24,5	0,0105
24,6 a 25,5	0,011
25,6 a 26,5	0,0115
26,6 a 27,5	0,012
>27,5	0,013

Fonte: Camargo; Camargo, 2000.

### 2.3.6 Método de Makkink

A equação de Makkink (1957) é expressa pela Equação 26.

$$ET_o = (0,61 * R_s * W) - 0,12 \quad (26)$$

Onde:

- $R_s$  – Radiação solar global convertida em unidades de água evaporada (mm);
- $W$  – Fator de ponderação.

O fator de ponderação  $W$  pode ser obtido pela Equação 27.

$$W = \frac{\Delta}{\Delta + \bar{Y}} \quad (27)$$

Onde:

- $\Delta$  – Declinação da curva de saturação do vapor de água;
- $Y$  – Fator psicrométrico.

A radiação solar global deve ser convertida ainda para milímetros e pode ser obtida pela Equação 28.

$$R_{s(mm)} = \frac{R_s}{\lambda} \quad (28)$$

Onde:

- $R_s$  – Radiação solar global;
- $\lambda$  – Calor latente de vaporização.

### 2.3.7 Método de Priestley & Taylor

A equação de Priestley & Taylor (1972) é expressa pela Equação 29.

$$ET_o = \frac{\alpha * W * (R_n - G)}{\lambda} \quad (29)$$

Onde:

- $\alpha$  – Parâmetro de Priestley & Taylor;
- $W$  – Fator de ponderação;
- $R_n$  – Saldo de radiação;
- $G$  – Densidade do fluxo de calor no solo;
- $\lambda$  – Calor latente de vaporização.

### 2.3.8 Método de Benavides & Lopez

A equação de Benavides & Lopez (1970) é expressa pela Equação 30.

$$ET_o = 1,21 * 10 * \left( \frac{7,45 * T_{méd}}{234,7 + T_{méd}} \right) * (1 - 0,01 * UR_{méd}) + 0,21 * T_{méd} - 2,30 \quad (30)$$

Onde:

- $T_{méd}$  – Temperatura média do ar;
- $UR_{méd}$  – Umidade relativa média do ar.

### 2.3.9 Método de Jensen-Hayse

A equação de Jensen-Hayse (1963) é expressa pela Equação 31.

$$ET_o = R_s * (0,025 * T_{méd} + 0,078) \quad (31)$$

Onde:

- $R_s$  – Radiação solar global convertida em unidades de água evaporada (mm);
- $T_{méd}$  – Temperatura média do ar.

### 2.3.10 Método de Blaney-Criddle

A equação de Blaney-Criddle (1963) é expressa pela Equação 32.

$$ET_o = a + b * p * (0,46 * T_{méd} + 8,13) \quad (32)$$

Onde:

- $a$  e  $b$  – Coeficientes de Frevert *et al.* (1983);
- $p$  – Porcentagem do total de fotoperíodo médio mensal sobre o total de fotoperíodo anual;
- $T_{méd}$  – Temperatura média do ar.

Os coeficientes  $a$  e  $b$  podem ser obtidos pelas Equações 33 e 34, respectivamente.

$$a = 0,0043 * UR_{mín} - \frac{n}{N} - 1,41 \quad (33)$$

$$b = a_0 + a_1 * UR_{mín} + a_2 * \frac{n}{N} + a_3 * U_2 + a_4 * UR_{mín} * \frac{n}{N} + a_5 * UR_{mín} * U_2 \quad (34)$$

Onde:

- $UR_{mín}$  – Umidade relativa mínima do ar;
- $n$  – Insolação total;
- $N$  – Fotoperíodo;

- $U_2$  – Velocidade do vento (média diária) a 2m acima da superfície do solo;
- $a_0 = 0,81917$ ;
- $a_1 = -0,0040922$ ;
- $a_2 = 1,0705$ ;
- $a_3 = 0,065649$ ;
- $a_4 = -0,0059684$ ;
- $a_5 = -0,0005967$ ;

### 2.3.11 Método de Turc

A equação de Turc (1961) é expressa pela Equação 35.

$$ET_o = a_t * 0,013 * \left( \frac{T_{méd}}{T_{méd} + 15} \right) * \left( \frac{\frac{R_s}{0,0238846} + 50}{\lambda} \right) \quad (35)$$

Onde:

- $a_t$  – Fator de umidade relativa;
- $T_{méd}$  – Temperatura média do ar;
- $R_s$  – Radiação solar global;
- $\lambda$  – Calor latente de vaporização.

O fator de umidade relativa pode ser obtido pela Equação 36.

$$ET_o = 1 + \left( \frac{50 - UR}{70} \right) \quad (36)$$

Onde:

- $UR$  – Umidade relativa do ar.

### 2.3.12 Método de Hamon

A equação de Hamon (1961) é expressa pela Equação 37.

$$ET_o = 0,55 * \left( \frac{N}{12} \right)^2 * Pt \quad (37)$$

Onde:

- $N$  – Fotoperíodo;
- $Pt$  – Densidade de vapor d'água.

O valor de  $Pt$  pode ser obtido pela Equação 38.

$$Pt = \frac{4,95 * e^{(0,062 * T_{méd})}}{100} \quad (38)$$

Onde:

- $T_{méd}$  – Temperatura média do ar.

### 2.3.13 Método de Kharrufa

A equação de Kharrufa (1985) é expressa pela Equação 39.

$$ET_o = 0,34 * p * T_{méd}^{1,3} \quad (39)$$

Onde:

- $p$  – Porcentagem total do fotoperíodo;
- $T_{méd}$  – Temperatura média do ar.

### 2.3.14 Método da Radiação Solar

A equação da Radiação Solar (1984) é expressa pela Equação 40.

$$ET_o = a + b * (W * R_s) \quad (40)$$

Onde:

- $a$  e  $b$  – Coeficientes de Frevert *et al.* (1983);
- $W$  – Fator de ponderação;
- $R_s$  – Radiação solar global.

### 2.3.15 Método de Romaneko

A equação de Romaneko (1961) é expressa pela Equação 41.

$$ET_o = 0,0018 * (25 + T_{méd})^2 * (100 - RH) \quad (41)$$

Onde:

- $T_{méd}$  – Temperatura média do ar;
- $RH$  – Umidade relativa média mensal.

A umidade relativa média mensal pode ser obtida pela Equação 42.

$$RH = \frac{e^o(T_{po})}{e^o(T_{méd})} \quad (42)$$

Onde:

- $e^o(T_{po})$  – Pressão de vapor de saturação da temperatura do ponto de orvalho;
- $e^o(T_{méd})$  – Pressão de vapor de saturação da temperatura média do ar.

A pressão de vapor de saturação pode ser obtida para qualquer temperatura a partir da Equação 43.

$$e^o(T) = 33,8679 * [(0,00738 * T + 0,8072)^8 - 0,000019 * |1,8 * T + 48| + 0,001316] \quad (43)$$

Onde:

- $T$  – Temperatura.

### 2.3.16 Método de Penman

A equação de Penman (1948) é expressa pela Equação 44.

$$ET_o = \frac{W * R_n}{\lambda} + (1 - W) * E_a \quad (44)$$

Onde:

- $W$  – Fator de ponderação;
- $R_n$  – Saldo de radiação;
- $\lambda$  – Calor latente de vaporização;
- $E_a$  – Poder de evaporação do ar.

O poder de evaporação do ar pode ser obtido pela Equação 45.

$$E_a = m * (a + b * U_2) * DVP \quad (45)$$

Onde:

- $m = 6,43$ ;
- $a = 1$ ;
- $b = 0,526$ ;
- $U_2$  – Velocidade do vento (média diária) a  $2m$  acima da superfície do solo;
- $DVP$  – Déficit do vapor de saturação.

O valor de  $DVP$  pode ser obtido através da Equação 46.

$$DVP = e_s - e_a \quad (46)$$

Onde:

- $e_s$  – Pressão de saturação do vapor;
- $e_a$  – Pressão atual do vapor.

### 2.3.17 Método do Tanque “Classe A”

A equação do Tanque Classe A (1998) é expressa pela Equação 47.

$$ET_o = K_p * E_v \quad (47)$$

Onde:

- a)  $K_p$  – Coeficiente de conversão da evapotranspiração do tanque “Classe A” em  $ET_o$ ;
- b)  $E_v$  – Lâmina de evaporação do tanque “Classe A”.

O valor de  $K_p$  é dado pela Equação 48.

$$K_p = 0,108 - 0,0286 * U_2 + 0,0422 * \ln B + 0,1434 * \ln UR_{méd} - 0,000631 * (\ln B)^2 * \ln UR_{méd} \quad (48)$$

Onde:

- $U_2$  – Velocidade do vento (média diária) a  $2m$  acima da superfície do solo;



- $B$  – Bordadura da área;
- $UR_{méd}$  – Umidade relativa média do ar.

### 2.3.18 Método do Balanço de Energia

A equação do Balanço de Energia (1998) é expressa pela Equação 49.

$$ET_o = R_{ns} + R_{nl} \quad (49)$$

Onde:

- $R_{ns}$  – Balanço da radiação de ondas curtas;
- $R_{nl}$  – Balanço da radiação de ondas longas.

O balanço da radiação de ondas curtas é obtido pela Equação 50.

$$R_{ns} = R_s * (1 - r) \quad (50)$$

Onde:

- $R_s$  – Radiação solar global;
- $r$  – Poder refletor.

O balanço da radiação de ondas longas é obtido pela Equação 51.

$$R_{nl} = -[0,56 - 0,25 * (e_a)^{0,5}] * \sigma * T_{méd}^4 * \left(0,1 + 0,9 * \frac{n}{N}\right) \quad (51)$$

Onde:

- $e_a$  – Pressão atual do vapor;
- $\sigma$  – Constante de Stefan-Boltzmann;
- $T_{méd}$  – Temperatura média do ar;
- $n$  – Insolação total;
- $N$  – Fotoperíodo.

## 2.4 Avaliação do desempenho

A avaliação do desempenho dos modelos de estimativa da evapotranspiração de referência em comparação com o método de Penman-Monteith é realizada por meio de

coeficientes estatísticos. Esses parâmetros servirão de base para quantificar o grau de acurácia e precisão dos modelos, quantificando a correlação e concordância entre os valores estimados e esperados.

Nas seções subsequentes serão apresentados os parâmetros estatísticos que compõem esse estudo.

#### 2.4.1 Coeficiente de correlação $r$ de Pearson

A equação do coeficiente de correlação de Pearson é expressa pela Equação 52 (DEVORE, 2005).

$$r = \frac{\frac{\sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x}) * (o_j - \bar{o})}{n}}{\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2}{n}} * \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (o_j - \bar{o})^2}{n}}} \quad (52)$$

Onde:

- $n$  – Número de dados utilizados;
- $o_j$  – Valor observado;
- $x_j$  – Valor estimado;
- $\bar{o}$  – Média dos valores observados;
- $\bar{x}$  – Média dos valores estimados.

O coeficiente de correlação  $r$  de Pearson é uma medida estatística que avalia o grau de associação linear existente entre duas variáveis quantitativas. Seu valor indica a intensidade da relação linear entre as variáveis e varia de -1 a 1, onde seus extremos indicam uma correlação perfeita e o valor zero que não há relação linear entre as variáveis (FIGUEIREDO FILHO e SILVA JÚNIOR, 2009).

No contexto deste estudo, para avaliar o desempenho de um modelo de estimativa, é fundamental que ele consiga reproduzir as variações climáticas ao longo do tempo captadas pelo modelo padrão. Nesse sentido, o coeficiente de correlação  $r$  de Pearson é a métrica que indica o grau de correspondência entre essas variações, permitindo avaliar a precisão do modelo na representação das tendências climáticas. Quanto mais próximo de 1 for o valor,  $r$  indicará que as estimativas seguem o mesmo padrão de variação que o método de referência.

### 2.4.2 Coeficiente de concordância $d$ de Willmott

A equação do coeficiente de concordância de Willmott é expressa pela Equação 53 (WILLMOTT *et al.*, 1985).

$$d = 1 - \frac{\sum_{j=1}^n (o_j - x_j)^2}{\sum_{j=1}^n (|x_j - \bar{o}| + |o_j - \bar{o}|)^2} \quad (53)$$

Onde:

- $n$  – Número de dados utilizados;
- $o_j$  – Valor observado;
- $x_j$  – Valor estimado;
- $\bar{o}$  – Média dos valores observados.

De acordo com Camargo e Camargo (2000, p. 128), “a concordância se refere à exatidão ou à aproximação dos dados estimados aos verdadeiros, observados”. O coeficiente de concordância  $d$  resume todas as diferenças entre as estimativas e as observações em uma única medida quantitativa. Em outras palavras, ele avalia o quão bem o modelo consegue capturar o desvio dos dados em relação à média observada. O valor do índice de concordância varia de 0 a 1, onde valores próximos a 1 indicam uma correspondência quase perfeita entre as estimativas e os dados observados (ALENCAR *et al.*, 2011).

### 2.4.3 Coeficiente de confiança $c$ de Camargo e Sentelhas

A equação do coeficiente de confiança de Camargo e Sentelhas é expressa pela Equação 54 (CAMARGO; SENTELHAS, 1997).

$$c = r * d \quad (54)$$

Onde:

- $r$  – Coeficiente de correlação de Pearson;
- $d$  – Coeficiente de confiança de Camargo e Sentelhas.

O índice de confiança  $c$  avalia simultaneamente a precisão e a exatidão dos resultados. Seus valores variam de zero, indicando ausência de concordância, até um,

representando concordância total.

Camargo e Sentelhas (1997) propõem a Tabela 2 para interpretar o desempenho dos modelos de previsão a partir do resultado para o índice  $c$ .

Tabela 2: Critério de interpretação do desempenho dos modelos de previsão pelo índice  $c$ .

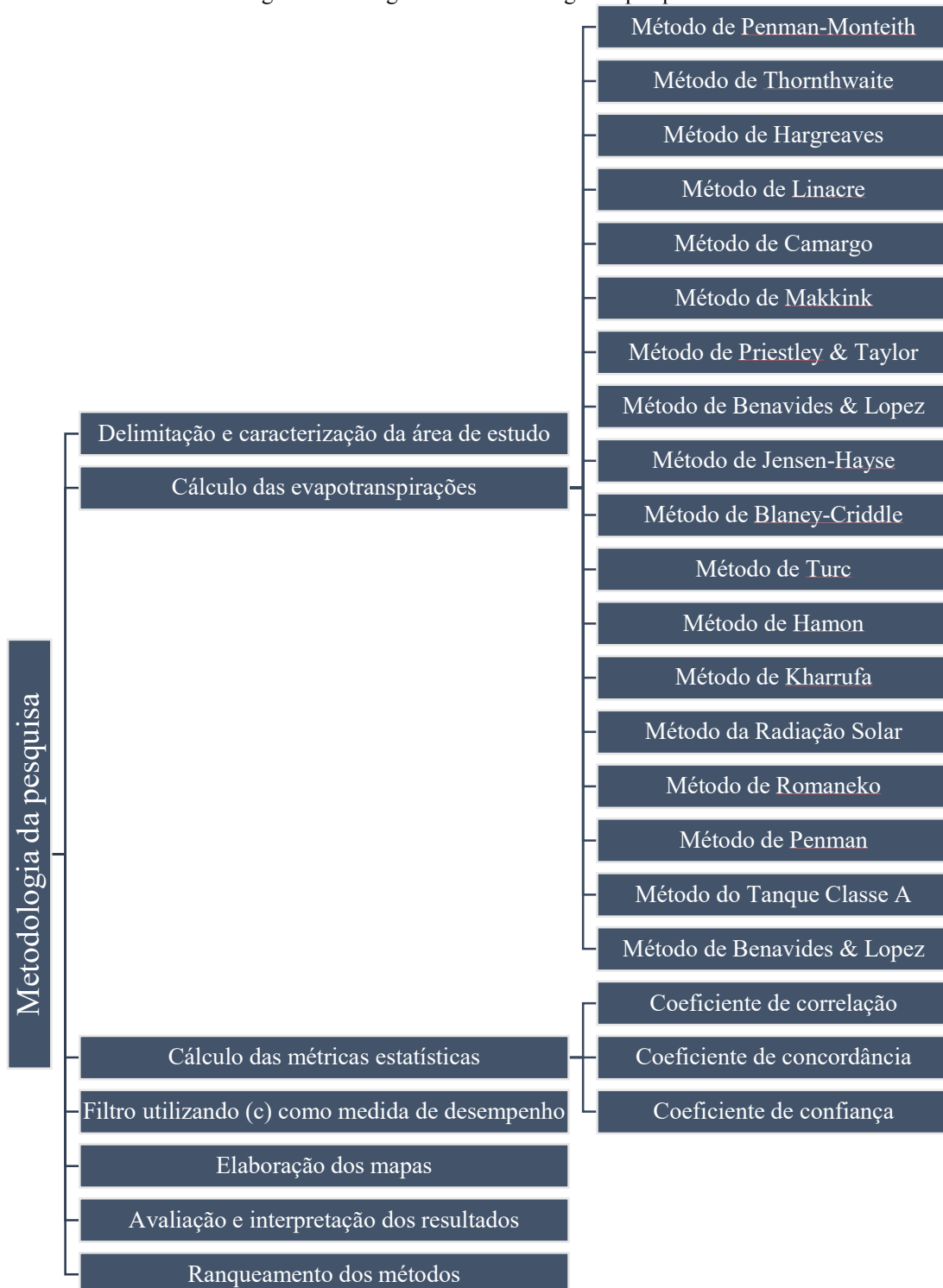
$c$	Desempenho
$> 0,85$	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito Bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
$\leq 0,40$	Péssimo

Fonte: Camargo; Sentelhas (1997)

### 3 METODOLOGIA

Nesta seção serão apresentados os procedimentos metodológicos utilizados para atingir os objetivos propostos. No fluxograma representado pela Figura 1, é possível identificar as atividades desenvolvidas.

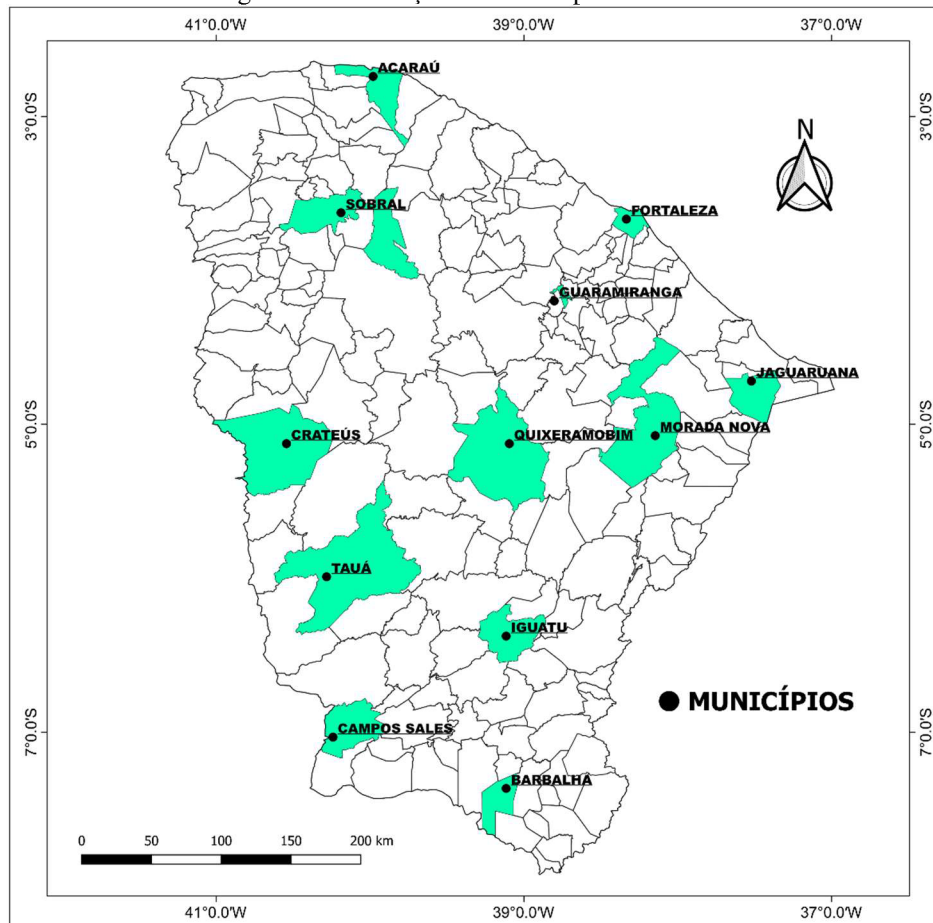
Figura 1: Fluxograma da metodologia de pesquisa.



Fonte: Autoria própria (2025).

A área de estudo desse trabalho é delimitada pelo estado cearense através de 12 municípios distribuídos ao longo de todo o seu território, conforme a Figura 2.

Figura 2: Localização dos municípios analisados.



Fonte: Autoria própria (2025).

Para cada cidade há uma estação meteorológica localizadas conforme a Tabela 3.

Tabela 3: Localização das estações meteorológicas.

MUNICÍPIOS	CÓDIGO	LATITUDE	LONGITUDE	ALTITUDE
ACARAÚ	82294	-2.88	-40.13	7.00
SOBRAL	82392	-3.68	-40.33	70.00
FORTALEZA	82397	-3.72	-38.55	16.00
GUARAMIRANGA	82487	-4.27	-39.00	865.00
JAGUARUANA	82493	-4.83	-37.77	20.00
CRATEÚS	82583	-5.19	-40.67	274.00
QUIXERAMOBIM	82586	-5.19	-39.28	191.00
MORADA NOVA	82588	-5.11	-38.37	52.00
TAUÁ	82683	-6.00	-40.42	402.00
IGUATU	82686	-6.35	-39.30	217.00
CAMPOS SALES	82777	-7.08	-40.38	567.00
BARBALHA	82784	-7.30	-39.30	414.00

Fonte: Autoria própria (2025).

Considerando a influência das variáveis climáticas no processo de evapotranspiração é importante conhecer o clima das regiões que compõem esse estudo. O clima de uma região é resultado da interação de diversos elementos atmosféricos ao longo do tempo, incluindo a radiação solar, a precipitação, a temperatura, a umidade do ar, o vento, a pressão atmosférica, a evapotranspiração e a nebulosidade (HARTMANN, 2016).

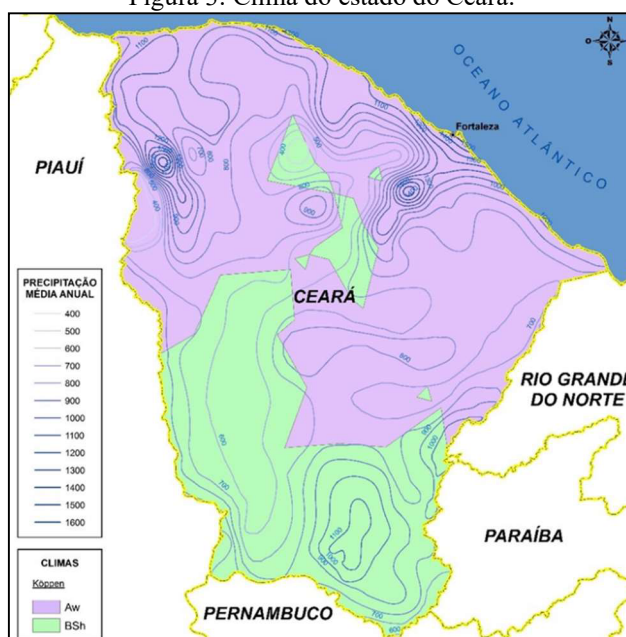
De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, o clima do Ceará é composto por duas principais categorias: o tropical úmido e o semiárido, sendo este último o mais predominante no estado (CODEVASF, 2022).

As regiões semiáridas são aquelas com um nível de aridez que não é suficientemente baixo para serem consideradas úmidas, nem tão elevado a ponto de serem classificadas como áridas. O clima subúmido, por sua vez, apresenta traços intermediárias entre os climas úmido e semiárido (SALES *et al.*, 2021).

O clima semiárido é caracterizado por temperaturas elevadas, baixa amplitude térmica anual e precipitações escassas e irregulares, resultando em longos períodos de seca, e o clima subúmido, por sua vez, é marcado por uma estação seca bem definida e outra chuvosa. As temperaturas são elevadas, típicas de regiões tropicais, e a vegetação predominante inclui formações como cerrados e matas secas (AB'SABER, 2003).

É possível observar a disposição da classificação climática no estado do Ceará através da Figura 3, em que na escala de Köppen-Geiger, o termo  $BS_h$  corresponde ao clima seco semiárido quente, e  $A_w$  ao clima tropical de savana com chuvas de verão (CODEVASF, 2022).

Figura 3: Clima do estado do Ceará.



Fonte: CODEVASF (2022, p.31).

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos a partir de estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e abrangem o período de 1962 a 2020. O conjunto de dados contempla variáveis meteorológicas essenciais para o cálculo da evapotranspiração de referência, incluindo:

- Temperatura do ar;
- Umidade relativa;
- Insolação total;
- Velocidade dos ventos;
- Latitude;
- Altitude.

É importante destacar a presença de lacunas na série histórica, tornando necessário a aplicação de técnicas de preenchimento de falhas para garantir a consistência e integridade das informações. O processo de tratamento dos dados envolveu a identificação e correção dessas lacunas por meio do método de regressão linear, no qual foram avaliados os coeficientes de correlação de Pearson entre um ou mais postos meteorológicos vizinhos, a fim de determinar o grau de correlação e, assim, assegurar a confiabilidade dos dados utilizados no estudo.

O conjunto de dados foi previamente tratado e disponibilizado para este trabalho por Rodrigues (2024), em seu trabalho foi usado a mesma base de dados para analisar a variabilidade do balanço hídrico climatológico no estado do Ceará.

O software Microsoft Excel (versão 2016) foi utilizado para tabular e organizar esses dados possibilitando calcular:

- ✓ Os valores de evapotranspiração de referência segundo diferentes metodologias;
- ✓ Os coeficientes estatísticos para método e estação.

Para a análise dos resultados das metodologias de estimativa da evapotranspiração, foi elaborado o Gráfico 1 para representar o comportamento do índice de confiança  $c$  de cada método avaliado. Isso permite visualizar a distribuição dos valores, destacando estatísticas como a mediana, os 1º e 3º quartis e a dispersão dos dados. Essa abordagem facilita a identificação dos métodos que apresentam maior consistência e desempenho mais adequado em relação à referência adotada.

Com essa filtragem, foram selecionados apenas os métodos que possuem um desempenho consistentemente bom, eliminando aqueles que apresentam medianas inferiores e,



consequentemente, maior incerteza ou discrepância em relação ao método de referência. Dessa forma, a análise será focada nas metodologias mais promissoras, permitindo uma avaliação mais precisa de quais abordagens são mais adequadas para a estimativa da evapotranspiração nas condições climáticas analisadas.

A partir do gráfico gerado, será estabelecido um critério para filtrar os métodos que apresentam os melhores resultados. O critério adotado será uma mediana superior a 0,7, garantindo que apenas as metodologias que mantêm um desempenho satisfatório sejam consideradas para análises mais aprofundadas. Esse valor foi escolhido por representar um limite adequado para distinguir os métodos que conseguem reproduzir os valores de evapotranspiração de forma mais confiável.

Para ilustrar a distribuição espacial dos erros de cada método, os seguintes procedimentos foram adotados:

- ✓ Geração de arquivos em formato *.csv* (*Comma Separated Value*) contendo as discrepâncias entre os valores da  $ET_0$  pelos modelos de previsão e de referência;
- ✓ Importação desses arquivos para ambiente SIG (Sistema de informações geográficas) por meio do *software* QGIS Desktop (versão 3.28.0);
- ✓ Aplicação do estimador de densidade de Kernel, utilizando a ferramenta Mapa de Calor do QGIS. Esse estimador cria áreas de influência em torno de pontos de amostra, permitindo visualizar a distribuição espacial dos erros;
- ✓ Produção de mapas mensais, evidenciando a magnitude dos erros e o comportamento dos diferentes métodos sob a influência das variações climáticas ao longo do tempo.

A função do estimador Kernel é descrita pela Equação 55 (OLIVEIRA e OLIVEIRA, 2017, p.92).

$$f_h(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - X_i}{h}\right) \quad (55)$$

Onde:

- $k$  - Função de Kernel;
- $h$  - Raio de busca;
- $x$  - Posição do centro de cada célula do raster de saída;
- $X_i$  - Posição do ponto  $i$  proveniente do centroide de cada polígono;
- $n$  - Número total de focos de calor.

A comparação entre os métodos de estimativa da evapotranspiração de referência foi realizada com base em métricas estatísticas, utilizando o método de Penman-Monteith como referência. As métricas adotadas foram:

- ✓  $r$  – Coeficiente de correlação de Pearson: avalia a força e a direção da relação linear entre os valores estimados e de referência;
- ✓  $d$  – Coeficiente de concordância de Willmott: mede o grau de concordância entre os dados estimados e de referência, considerando a magnitude e tendência;
- ✓  $c$  – Coeficiente de correlação de Camargo e Sentelhas: combina os coeficientes  $r$  e  $d$ , fornecendo uma visão abrangente da precisão das estimativas.

Com base nos valores obtidos para o coeficiente de confiança  $c$ , os métodos foram classificados conforme seu desempenho, permitindo a identificação dos mais adequados às condições climáticas dos municípios analisados.

Nas tabelas que apresentam os resultados, os métodos foram ordenados em ordem decrescente considerando o valor do índice de confiança  $c$ , de modo a facilitar a identificação dos municípios com melhores desempenho.

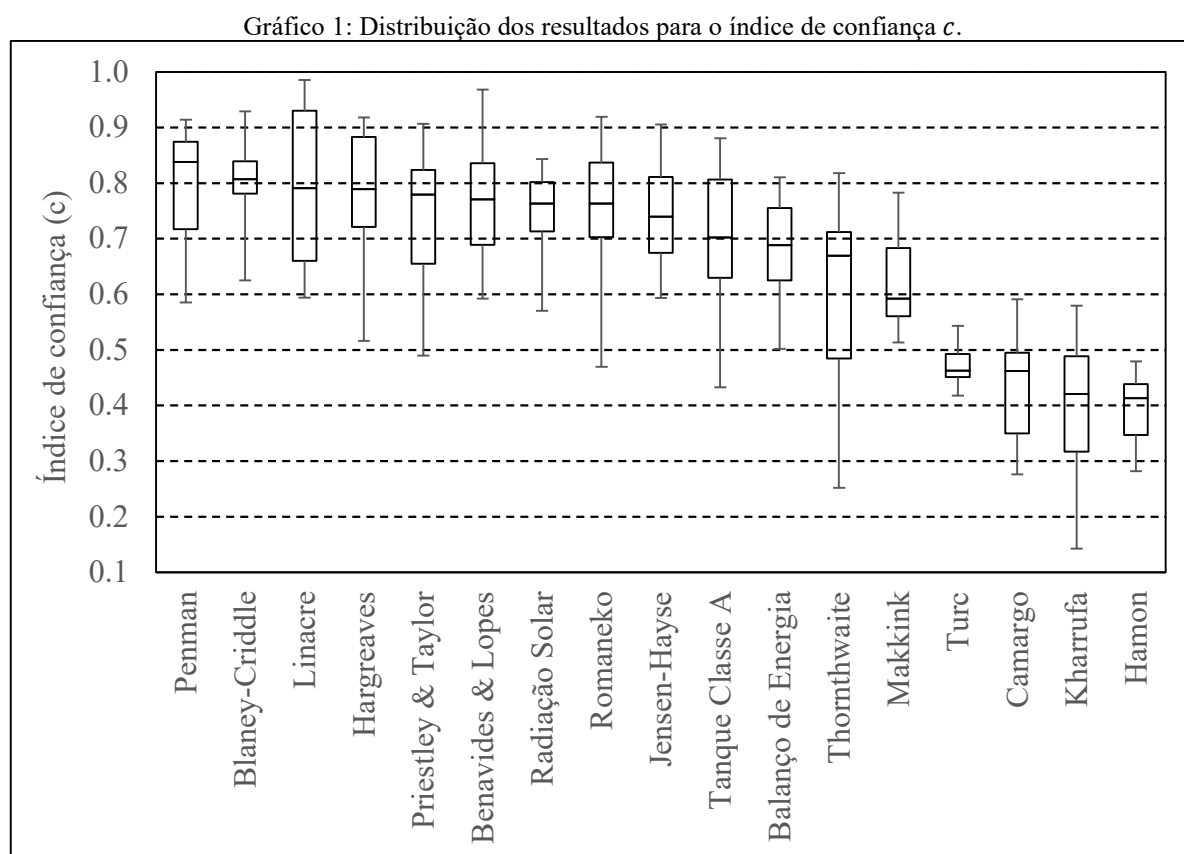
Para sintetizar os resultados, foram elaborados um gráfico e uma matriz de desempenho em função dos resultados para o coeficiente de confiança  $c$ . O gráfico permite visualizar de forma clara o desempenho de cada metodologias individualmente em cada município, enquanto a matriz apresenta esses resultados em valores numéricos, incluindo a média e o desvio padrão. Desse modo, foi possível ranquear os métodos tanto em termos gerais quanto de maneira específica para cada município.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão expostos e discutidos os resultados desenvolvidos neste trabalho, para cada um dos métodos em diferentes municípios do estado cearense.

Primeiramente, será apresentado o resultado da triagem realizada para selecionar as metodologias com melhor desempenho geral. Sequencialmente, serão expostos os resultados da evapotranspiração de referência e dos índices estatísticos para cada metodologia, através de tabelas e mapas, o que permitirá avaliar e classificar o desempenho de cada método. Por fim para sintetizar os resultados, são demonstrados um gráfico e uma matriz de desempenho em função dos resultados de cada método para o índice de confiança  $c$ . A partir disso, os métodos serão ranqueados considerando toda a amostragem e de forma isolada.

### 4.1 Seleção dos métodos



Fonte: Autoria própria (2025).

A partir do Gráfico 1, considerando o requisito estabelecido previamente, serão avaliadas as seguintes metodologias: Penman, Blaney-Cridle, Linacre, Hargreaves, Priestley & Taylor, Benavides & Lopez, Radiação Solar, Romaneko e Jensen-Hayse.

## 4.2 Método de Penman-Monteith

Na Tabela 4 são apresentados os resultados para a evapotranspiração de referência utilizando o método de Penman-Monteith.

Tabela 4: Evapotranspiração de referência usando Penman-Monteith.

MESES	MUNICÍPIOS					
	ACARAÚ	SOBRAL	FORTALEZA	GUARAMIRANGA	JAGUARUANA	CRATEÚS
JANEIRO	146,59	151,63	148,54	108,30	179,34	164,15
FEVEREIRO	119,17	123,16	121,07	87,73	144,24	134,13
MARÇO	121,29	126,92	123,02	87,55	146,12	136,55
ABRIL	111,16	115,11	110,84	80,30	128,99	120,45
MAIO	124,30	120,63	122,46	84,92	134,87	130,40
JUNHO	126,36	118,43	119,13	80,55	128,73	135,80
JULHO	143,76	136,06	136,84	93,99	146,97	161,35
AGOSTO	172,63	170,69	161,53	117,60	181,30	191,95
SETEMBRO	178,47	184,07	169,89	124,36	200,64	205,92
OUTUBRO	189,18	199,36	181,91	134,04	217,98	220,16
NOVEMBRO	175,84	183,35	171,05	123,21	203,38	202,38
DEZEMBRO	171,09	178,37	168,87	121,26	197,94	194,49
MÉDIA	148,32	150,65	144,60	103,65	167,54	166,48
TOTAL	1779,83	1807,78	1735,15	1243,81	2010,51	1997,74

Fonte: Autoria própria (2025).

Tabela 4: Continuação.

MESES	MUNICÍPIOS					
	QUIXERAMOBIM	MORADA NOVA	TAUÁ	IGUATU	CAMPOS SALES	BARBALHA
JANEIRO	183,01	177,79	163,49	172,20	170,90	148,76
FEVEREIRO	147,05	144,10	133,92	138,55	134,67	123,05
MARÇO	149,52	147,73	139,06	145,77	138,52	134,05
ABRIL	129,61	130,73	122,80	130,84	128,79	121,34
MAIO	130,52	133,31	129,96	134,42	139,89	120,69
JUNHO	127,04	127,67	131,80	134,57	144,89	115,62
JULHO	147,57	151,24	152,46	157,67	171,56	130,41
AGOSTO	186,50	179,31	179,82	189,92	202,27	157,81
SETEMBRO	208,36	192,89	191,42	200,81	214,91	169,76
OUTUBRO	228,30	211,60	204,55	217,15	227,71	182,03
NOVEMBRO	214,09	199,75	191,15	205,81	207,18	167,14
DEZEMBRO	208,09	196,32	186,19	199,54	198,62	163,58
MÉDIA	171,64	166,04	160,55	168,94	173,33	144,52
TOTAL	2059,67	1992,44	1926,63	2027,27	2079,91	1734,25

Fonte: Autoria própria (2025).

Para o método de Penman-Monteith não haverá resultado estatístico, afinal ele é tomado como método padrão de referência.

### 4.3 Método de Hargreaves

Na Tabela 5 são apresentados os resultados para a evapotranspiração de referência utilizando o método de Hargreaves.

Tabela 5: Evapotranspiração de referência usando Hargreaves.

MESES	MUNICÍPIOS					
	ACARAÚ	SOBRAL	FORTALEZA	GUARAMIRANGA	JAGUARUANA	CRATEÚS
JANEIRO	143,22	164,19	123,93	115,91	162,35	163,05
FEVEREIRO	128,93	142,20	113,85	101,23	144,78	142,66
MARÇO	138,13	148,38	123,21	105,75	147,68	148,50
ABRIL	127,38	132,99	113,42	93,73	132,09	132,13
MAIO	127,86	133,78	111,98	88,48	127,20	133,10
JUNHO	122,06	131,61	105,21	82,18	121,69	128,62
JULHO	131,45	147,67	114,60	93,77	136,37	142,28
AGOSTO	145,36	168,98	125,99	111,92	158,30	160,58
SETEMBRO	147,43	177,43	127,34	122,11	168,88	171,02
OUTUBRO	154,69	188,45	131,82	131,42	178,02	184,58
NOVEMBRO	147,02	178,13	123,55	122,59	166,74	175,73
DEZEMBRO	148,69	176,23	127,53	121,94	167,00	174,41
MÉDIA	138,52	157,50	120,20	107,59	150,93	154,72
TOTAL	1662,20	1890,03	1442,43	1291,04	1811,11	1856,66

Fonte: Autoria própria (2025).

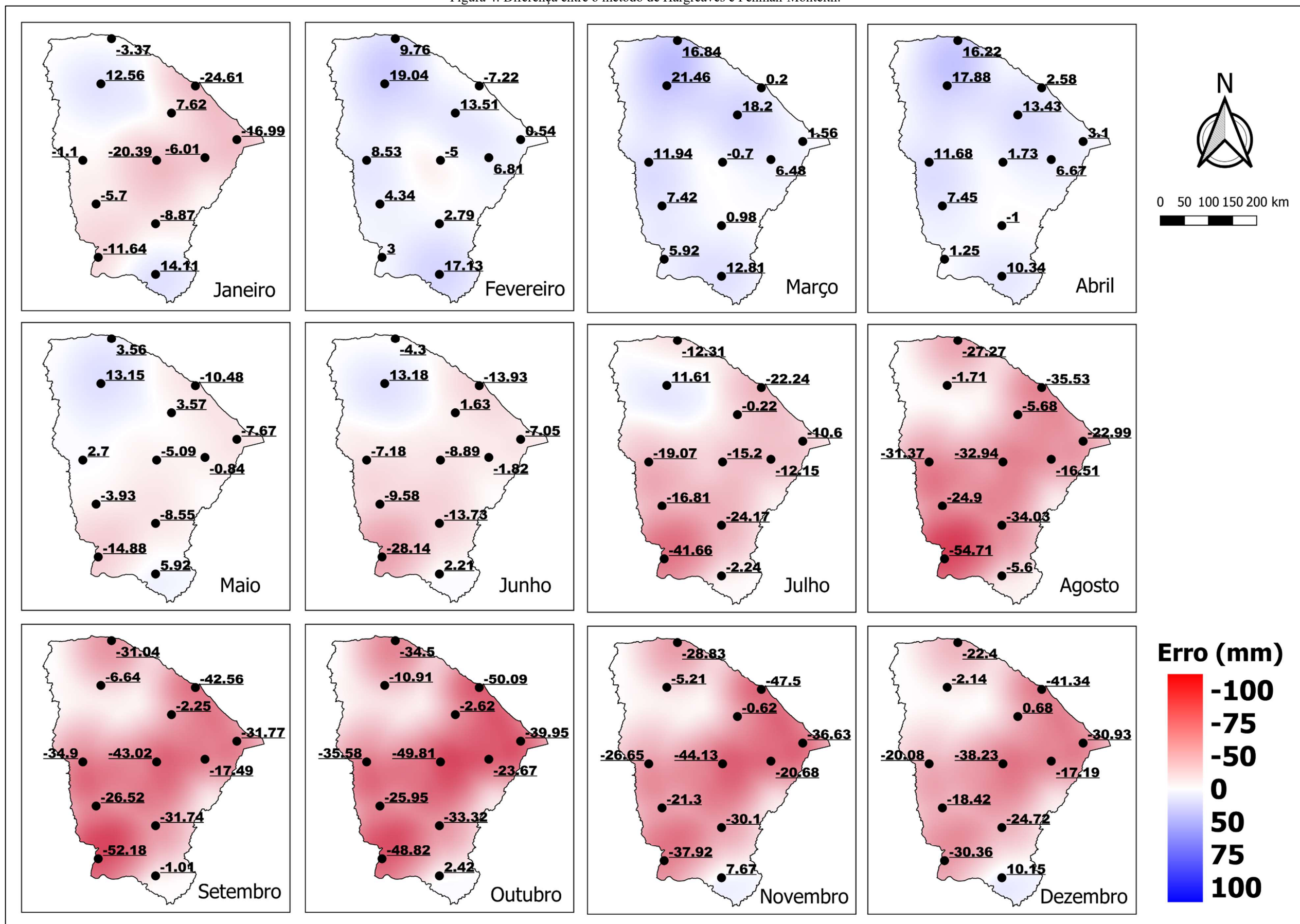
Tabela 5: Continuação.

MESES	MUNICÍPIOS					
	QUIXERAMOBIM	MORADA NOVA	TAUÁ	IGUATU	CAMPOS SALES	BARBALHA
JANEIRO	162,61	171,78	157,79	163,33	159,26	162,87
FEVEREIRO	142,05	150,91	138,27	141,34	137,67	140,18
MARÇO	148,82	154,21	146,48	146,75	144,44	146,85
ABRIL	131,34	137,40	130,25	129,84	130,04	131,69
MAIO	125,43	132,47	126,03	125,86	125,01	126,62
JUNHO	118,15	125,85	122,22	120,84	116,74	117,84
JULHO	132,37	139,09	135,65	133,50	129,90	128,17
AGOSTO	153,56	162,81	154,91	155,89	147,55	152,21
SETEMBRO	165,34	175,40	164,90	169,08	162,74	168,75
OUTUBRO	178,49	187,93	178,60	183,83	178,89	184,45
NOVEMBRO	169,96	179,07	169,85	175,71	169,26	174,81
DEZEMBRO	169,86	179,13	167,78	174,82	168,26	173,73
MÉDIA	149,83	158,00	149,39	151,73	147,48	150,68
TOTAL	1797,99	1896,04	1792,73	1820,80	1769,76	1808,16

Fonte: Autoria própria (2025).

A Figura 4 ilustra as diferenças entre os valores para a  $ET_o$  com relação ao método de Penman-Monteith.

Figura 4: Diferença entre o método de Hargreaves e Penman-Monteith.



Fonte: Autoria própria (2025).

Na Tabela 6 são expostos os resultados para os índices e coeficientes estatísticos.

Tabela 6: Análise comparativa entre o método de Hargreaves e Penman-Monteith.

MUNICÍPIOS	PARÂMETROS			Classificação do índice de confiança ( <i>c</i> )
	<i>r</i>	<i>d</i>	<i>c</i>	
SOBRAL	0,99	0,93	0,92	Ótimo
BARBALHA	0,95	0,95	0,91	Ótimo
MORADA NOVA	0,97	0,93	0,89	Ótimo
GUARAMIRANGA	0,93	0,94	0,88	Ótimo
TAUÁ	0,94	0,87	0,82	Muito Bom
IGUATU	0,94	0,84	0,79	Muito Bom
JAGUARUANA	0,96	0,82	0,79	Muito Bom
CRATEÚS	0,93	0,84	0,79	Muito Bom
QUIXERAMOBIM	0,96	0,78	0,75	Muito Bom
ACARAÚ	0,90	0,71	0,63	Mediano
CAMPOS SALES	0,83	0,70	0,58	Sofrível
FORTALEZA	0,86	0,60	0,52	Sofrível

Fonte: Autoria própria (2025).

A Figura 4 indica que o método de Hargreaves resultados consistentemente bons no primeiro semestre do ano com pouca variação para a  $ET_o$ . No entanto, no segundo semestre, período de escassez de chuvas e clima mais seco, quando são esperados valores mais elevados para a evapotranspiração, o método subestima significativamente os valores de referência.

Nos municípios mais úmidos, como Fortaleza e Acaraú, o coeficiente de concordância  $d$  indicou uma baixa correspondência entre as estimativas e os valores de referência. Apesar disso, Guaramiranga que também apresenta clima subúmido, teve resultados significativamente melhores. Apesar dos altos índices de umidade relativa, Fortaleza e Acaraú registram maiores temperaturas e amplitude térmica, prejudicando a precisão das estimativas. Por outro lado, Guaramiranga, apesar da umidade relativa elevada, apresenta temperaturas amenas e condições climáticas mais estáveis, favorecendo o desempenho do método.

Nesse sentido é possível inferir que, para que o método de Hargreaves apresente um desempenho satisfatório, é essencial que haja uma relação equilibrada entre a temperatura e amplitude térmica e umidade relativa. O método tende a fornecer piores estimativas em condições onde os fatores são baixos ou, alternativamente, quando são elevados. Em municípios úmidos, porém com grandes temperaturas e variações de temperatura, o desempenho do método é prejudicado, uma vez que isso amplifica a evapotranspiração, enquanto a alta umidade tende a inibir esse processo na realidade, resultando em discrepâncias significativas entre os valores.

#### 4.4 Método de Linacre

Na Tabela 7 são apresentados os resultados para a evapotranspiração de referência utilizando o método de Linacre.

Tabela 7: Evapotranspiração de referência usando Linacre.

MESES	MUNICÍPIOS					
	ACARAÚ	SOBRAL	FORTALEZA	GUARAMIRANGA	JAGUARUANA	CRATEÚS
JANEIRO	118,34	140,15	122,41	92,77	141,19	160,88
FEVEREIRO	99,67	109,78	103,94	79,25	119,20	124,84
MARÇO	101,01	107,48	107,03	83,08	120,34	122,32
ABRIL	95,86	102,54	101,00	78,96	113,04	113,60
MAIO	101,71	112,81	108,55	82,58	121,11	128,69
JUNHO	101,11	120,92	106,55	79,41	120,24	139,31
JULHO	110,07	136,02	114,50	84,10	131,20	164,07
AGOSTO	121,75	158,93	125,37	93,84	144,31	190,68
SETEMBRO	122,78	163,23	127,35	95,57	148,17	204,36
OUTUBRO	128,77	171,20	133,09	99,93	153,09	217,92
NOVEMBRO	124,10	161,46	128,40	95,66	145,45	203,96
DEZEMBRO	127,49	158,41	130,22	97,08	148,08	196,21
MÉDIA	112,72	136,91	117,37	88,52	133,79	163,90
TOTAL	1352,66	1642,93	1408,40	1062,23	1605,43	1966,85

Fonte: Autoria própria (2025).

Tabela 7: Continuação.

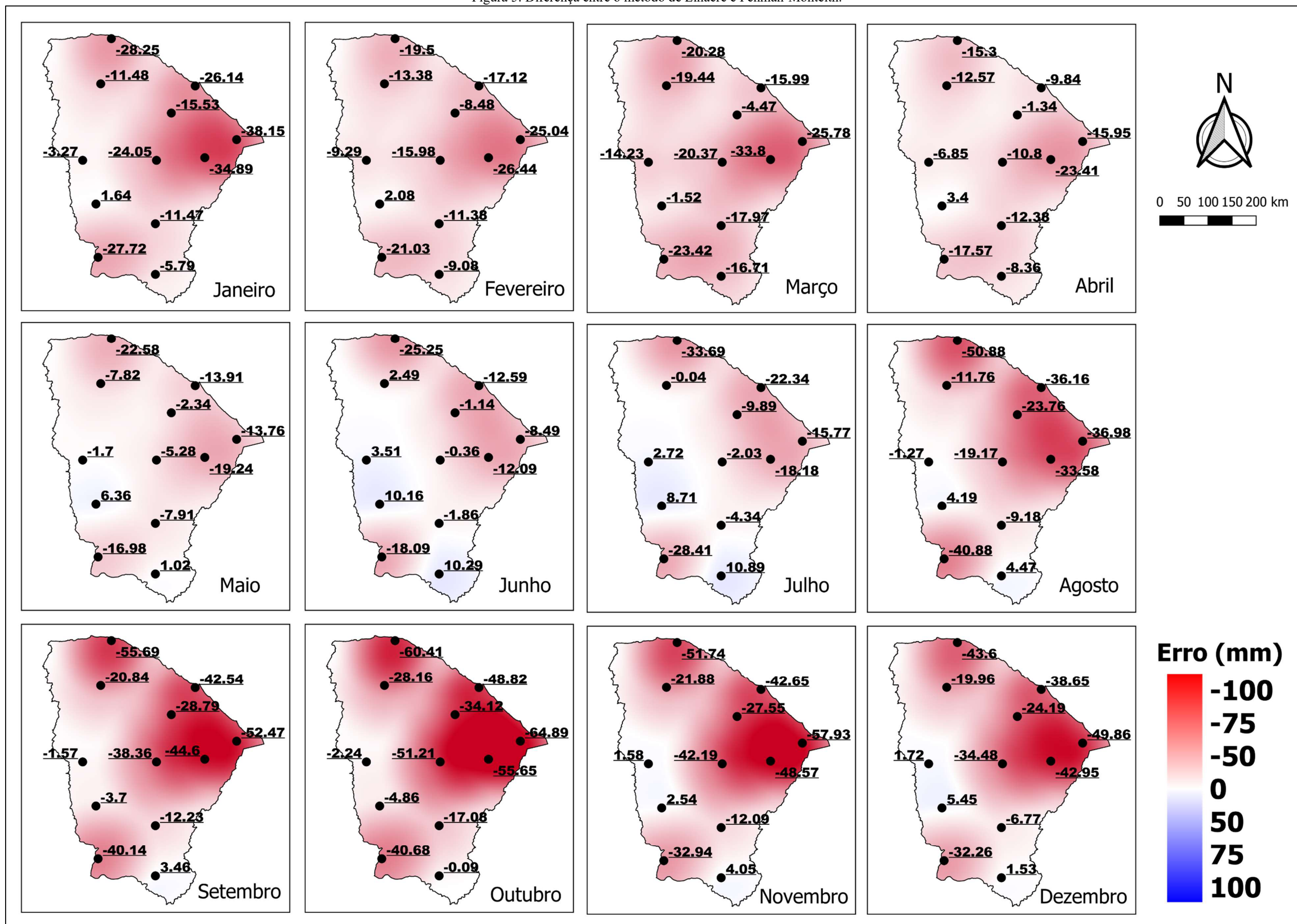
MESES	MUNICÍPIOS					
	QUIXERAMOBIM	MORADA NOVA	TAUÁ	IGUATU	CAMPOS SALES	BARBALHA
JANEIRO	158,96	142,90	165,13	160,73	143,18	142,97
FEVEREIRO	131,08	117,66	136,01	127,17	113,64	113,97
MARÇO	129,15	113,93	137,55	127,81	115,11	117,34
ABRIL	118,81	107,32	126,20	118,46	111,22	112,98
MAIO	125,24	114,07	136,32	126,51	122,92	121,72
JUNHO	126,68	115,58	141,96	132,71	126,79	125,92
JULHO	145,54	133,06	161,17	153,33	143,15	141,30
AGOSTO	167,33	145,73	184,00	180,74	161,38	162,28
SETEMBRO	170,00	148,29	187,72	188,58	174,78	173,21
OUTUBRO	177,10	155,94	199,69	200,07	187,03	181,94
NOVEMBRO	171,90	151,18	193,69	193,72	174,24	171,20
DEZEMBRO	173,61	153,37	191,64	192,78	166,36	165,11
MÉDIA	149,62	133,25	163,42	158,55	144,98	144,16
TOTAL	1795,39	1599,03	1961,08	1902,62	1739,80	1729,94

Fonte: Autoria própria (2025).

A Figura 5 ilustra as diferenças entre os valores para a  $ET_o$  com relação ao método de Penman-Monteith.



Figura 5: Diferença entre o método de Linacre e Penman-Monteith.



Fonte: Autoria própria (2025).

Na Tabela 8 são expostos os resultados para os índices e coeficientes estatísticos.

Tabela 8: Análise comparativa entre o método de Linacre e Penman-Monteith.

MUNICÍPIOS	PARÂMETROS			Classificação do índice de confiança ( <i>c</i> )
	<i>r</i>	<i>d</i>	<i>c</i>	
CRATEÚS	0,99	0,99	0,99	Ótimo
TAUÁ	0,99	0,99	0,98	Ótimo
IGUATU	0,99	0,97	0,96	Ótimo
BARBALHA	0,95	0,97	0,92	Ótimo
SOBRAL	0,97	0,91	0,88	Ótimo
CAMPOS SALES	0,99	0,81	0,80	Muito Bom
QUIXERAMOBIM	0,97	0,80	0,78	Muito Bom
GUARAMIRANGA	0,98	0,69	0,68	Bom
MORADA NOVA	0,96	0,69	0,66	Bom
FORTALEZA	0,99	0,66	0,65	Mediano
JAGUARUANA	0,97	0,65	0,63	Mediano
ACARAÚ	0,97	0,61	0,59	Sofrível

Fonte: Autoria própria (2025).

Embora o método de Linacre apresente valores para o índice de correlação *r* quase perfeitos para todos os municípios analisados, em alguns deles há uma discrepância considerável em relação aos valores de referência evidenciados pela Figura 5.

Linacre utiliza variáveis como temperatura média do ar, altitude, umidade relativa e pressão atmosférica, porém, ao ser aplicado no contexto cearense, pode apresentar limitações significativas. Isso ocorre porque o método não considera fatores como a velocidade dos ventos e, principalmente, a radiação solar, que é uma das variáveis climáticas mais influentes no semiárido cearense. Sabendo disso, pressupõe-se que os resultados devem, em sua maioria, subestimar os resultados de referência.

Apesar dessas limitações, os municípios de Crateús, Tauá e Iguatu, que apresentam as menores taxas de umidade relativa, obtiveram resultados mais satisfatórios. Isso indica que o método de Linacre se mostrou mais adequado para localidades com baixa umidade relativa, sugerindo que essa característica pode favorecer sua aplicação no contexto desta região. Os valores mais baixos de umidade relativa provavelmente ajudam a compensar a ausência da consideração dos efeitos da radiação solar no método.

Municípios como Acaraú, Fortaleza e Jaguaruana, que apresentam altos índices de umidade relativa, obtiveram os piores resultados, corroborando a ideia de que o método de Linacre apresenta desempenho inferior em localidades com maior umidade.

#### 4.5 Método de Priestley & Taylor

Na Tabela 9 são apresentados os resultados para a evapotranspiração de referência utilizando o método de Priestley & Taylor.

Tabela 9: Evapotranspiração de referência usando Priestley & Taylor.

MESES	MUNICÍPIOS					
	ACARAÚ	SOBRAL	FORTALEZA	GUARAMIRANGA	JAGUARUANA	CRATEÚS
JANEIRO	159,49	151,71	162,29	123,46	169,82	148,75
FEVEREIRO	135,43	134,17	136,81	102,94	145,38	133,32
MARÇO	144,70	147,27	144,60	106,56	160,15	146,77
ABRIL	132,08	134,72	130,28	99,35	143,47	131,92
MAIO	141,89	137,49	140,03	103,96	144,52	132,15
JUNHO	135,12	124,23	129,85	96,61	127,48	118,61
JULHO	148,20	136,45	144,24	109,46	137,83	128,36
AGOSTO	169,45	156,32	164,06	129,63	159,97	146,39
SETEMBRO	175,25	161,41	170,66	132,81	170,51	154,79
OUTUBRO	191,91	176,97	187,36	144,48	190,80	170,04
NOVEMBRO	177,90	162,20	176,10	133,40	178,87	155,90
DEZEMBRO	173,99	161,57	175,03	132,88	177,63	155,09
MÉDIA	157,12	148,71	155,11	117,96	158,87	143,51
TOTAL	1885,43	1784,50	1861,32	1415,53	1906,44	1722,10

Fonte: Autoria própria (2025).

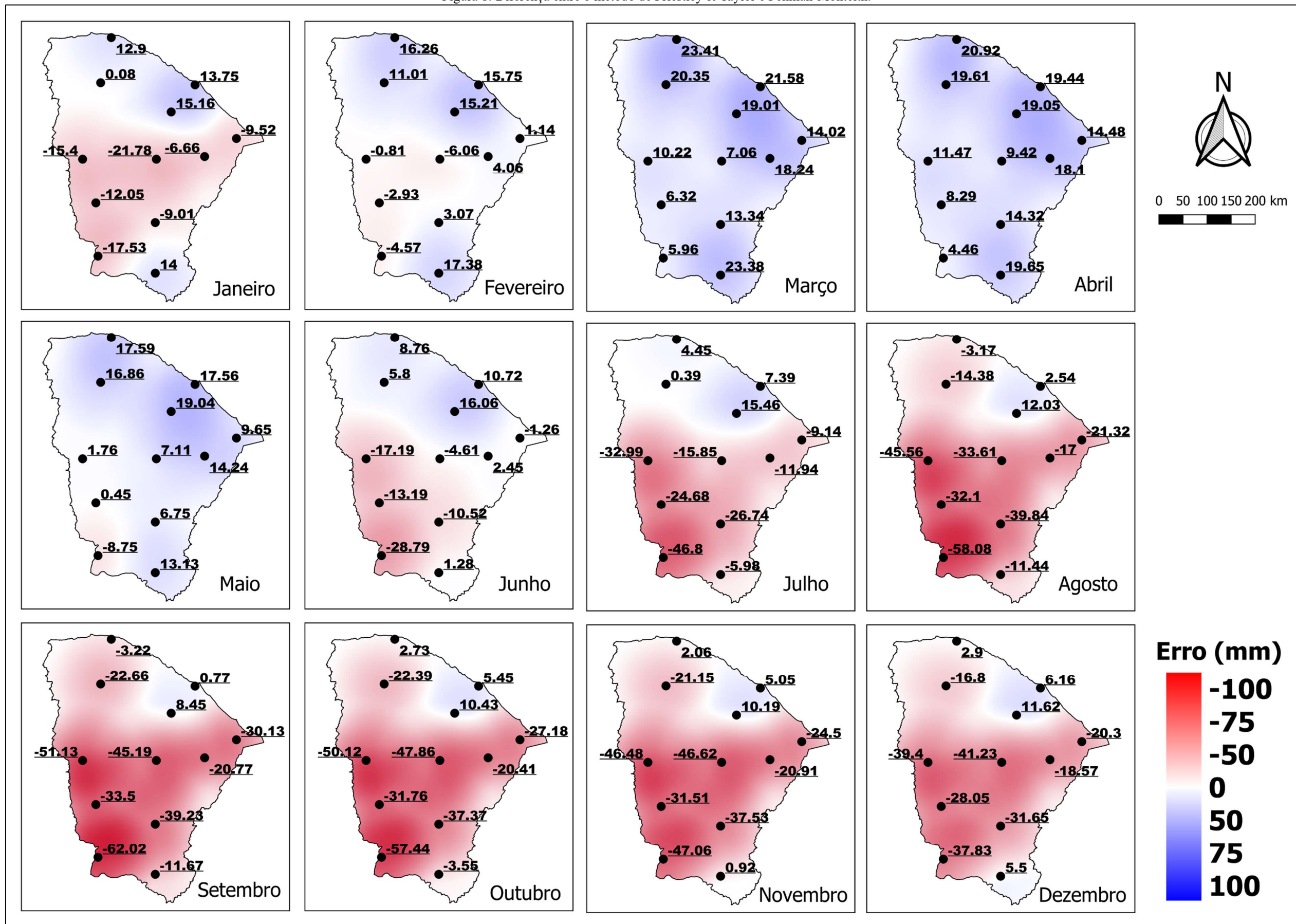
Tabela 9: Continuação.

MESES	MUNICÍPIOS					
	QUIXERAMOBIM	MORADA NOVA	TAUÁ	IGUATU	CAMPOS SALES	BARBALHA
JANEIRO	161,23	171,13	151,44	163,20	153,37	162,77
FEVEREIRO	140,99	148,16	131,00	141,62	130,10	140,43
MARÇO	156,58	165,97	145,39	159,11	144,48	157,43
ABRIL	139,03	148,83	131,09	145,16	133,24	140,99
MAIO	137,63	147,55	130,41	141,17	131,14	133,83
JUNHO	122,43	130,13	118,61	124,05	116,09	116,90
JULHO	131,72	139,29	127,78	130,93	124,76	124,43
AGOSTO	152,90	162,32	147,72	150,08	144,19	146,37
SETEMBRO	163,17	172,12	157,92	161,58	152,90	158,08
OUTUBRO	180,45	191,19	172,79	179,77	170,28	178,48
NOVEMBRO	167,47	178,84	159,64	168,28	160,12	168,06
DEZEMBRO	166,86	177,75	158,14	167,89	160,79	169,09
MÉDIA	151,71	161,11	144,33	152,74	143,45	149,74
TOTAL	1820,46	1933,28	1731,93	1832,84	1721,45	1796,85

Fonte: Autoria própria (2025).

A Figura 6 ilustra as diferenças entre os valores para a  $ET_o$  com relação ao método de Penman-Monteith.

Figura 6: Diferença entre o método de Priestley & Taylor e Penman-Monteith.



Fonte: Autoria própria (2025).



Na Tabela 10 são expostos os resultados para os índices e coeficientes estatísticos.

Tabela 10: Análise comparativa entre o método de Priestley & Taylor e Penman-Monteith.

MUNICÍPIOS	PARÂMETROS			Classificação do índice de confiança ( <i>c</i> )
	<i>r</i>	<i>d</i>	<i>c</i>	
ACARAÚ	0,98	0,93	0,91	Ótimo
FORTALEZA	0,98	0,92	0,90	Ótimo
GUARAMIRANGA	1,00	0,85	0,85	Muito Bom
SOBRAL	0,95	0,86	0,82	Muito Bom
JAGUARUANA	0,93	0,87	0,81	Muito Bom
MORADA NOVA	0,90	0,88	0,80	Muito Bom
BARBALHA	0,85	0,90	0,76	Muito Bom
TAUÁ	0,90	0,78	0,70	Bom
QUIXERAMOBIM	0,91	0,74	0,68	Bom
IGUATU	0,80	0,72	0,58	Sufrível
CRATEÚS	0,83	0,67	0,55	Sufrível
CAMPOS SALES	0,77	0,63	0,49	Mau

Fonte: Autoria própria (2025).

Comparado ao método de Penman-Monteith, o método de Priestley & Taylor apresentou resultados otimistas para o coeficiente de correlação  $r$ , evidenciando sua eficácia na captura das variações temporais da evapotranspiração. No entanto, apesar da forte correlação entre os dados, ainda foram observados erros consideráveis, especialmente em municípios com menor umidade relativa, onde a  $ET_o$  foi subestimada em relação a Penman-Monteith. Essas discrepâncias se tornam mais acentuadas no segundo semestre do ano, período caracterizado pela escassez de chuvas e consequente redução da umidade relativa.

Quando a umidade é baixa, a evapotranspiração é intensificada devido ao maior déficit de pressão de vapor e à influência da resistência aerodinâmica, favorecendo o processo de evapotranspiração (EMBRAPA, 2010). No entanto, esses fatores não são plenamente considerados na formulação de Priestley & Taylor. Como resultado, o método subestima a  $ET_o$  no território cearense, composto predominantemente por municípios com essas características.

O método de Priestley & Taylor baseia-se no balanço de energia, considerando a radiação solar como a principal variável para estimar a  $ET_o$ . Assim, em municípios com maior umidade relativa, onde o déficit de pressão de vapor é menor e os efeitos aerodinâmicos são menos expressivos, o método apresentou resultados mais satisfatórios. Nessas condições, a evapotranspiração é predominantemente controlada pela energia disponível, o que contribui para uma maior proximidade entre as estimativas de Priestley & Taylor e Penman-Monteith.

#### 4.6 Método de Benavides & Lopez

Na Tabela 11 são apresentados os resultados para a evapotranspiração de referência utilizando o método de Benavides & Lopez.

Tabela 11: Evapotranspiração de referência usando Benavides & Lopez.

MESES	MUNICÍPIOS					
	ACARAÚ	SOBRAL	FORTALEZA	GUARAMIRANGA	JAGUARUANA	CRATEÚS
JANEIRO	168,27	198,03	173,27	100,40	199,64	218,80
FEVEREIRO	140,50	153,95	146,18	83,37	168,13	169,21
MARÇO	140,28	148,33	148,96	84,66	168,46	163,80
ABRIL	132,66	141,20	139,96	79,53	157,70	151,15
MAIO	141,66	156,85	151,52	83,72	169,67	173,11
JUNHO	141,65	169,37	149,08	79,81	168,61	187,50
JULHO	155,34	190,88	160,83	85,37	184,18	219,30
AGOSTO	173,46	221,80	177,33	100,66	202,77	251,93
SETEMBRO	175,49	227,53	180,70	105,16	208,48	268,10
OUTUBRO	184,31	238,95	189,20	111,04	215,92	286,31
NOVEMBRO	177,61	226,44	182,63	106,16	205,48	270,15
DEZEMBRO	182,40	223,44	185,13	107,13	209,37	262,92
MÉDIA	159,47	191,40	165,40	93,92	188,20	218,52
TOTAL	1913,63	2296,77	1984,79	1127,00	2258,39	2622,28

Fonte: Autoria própria (2025).

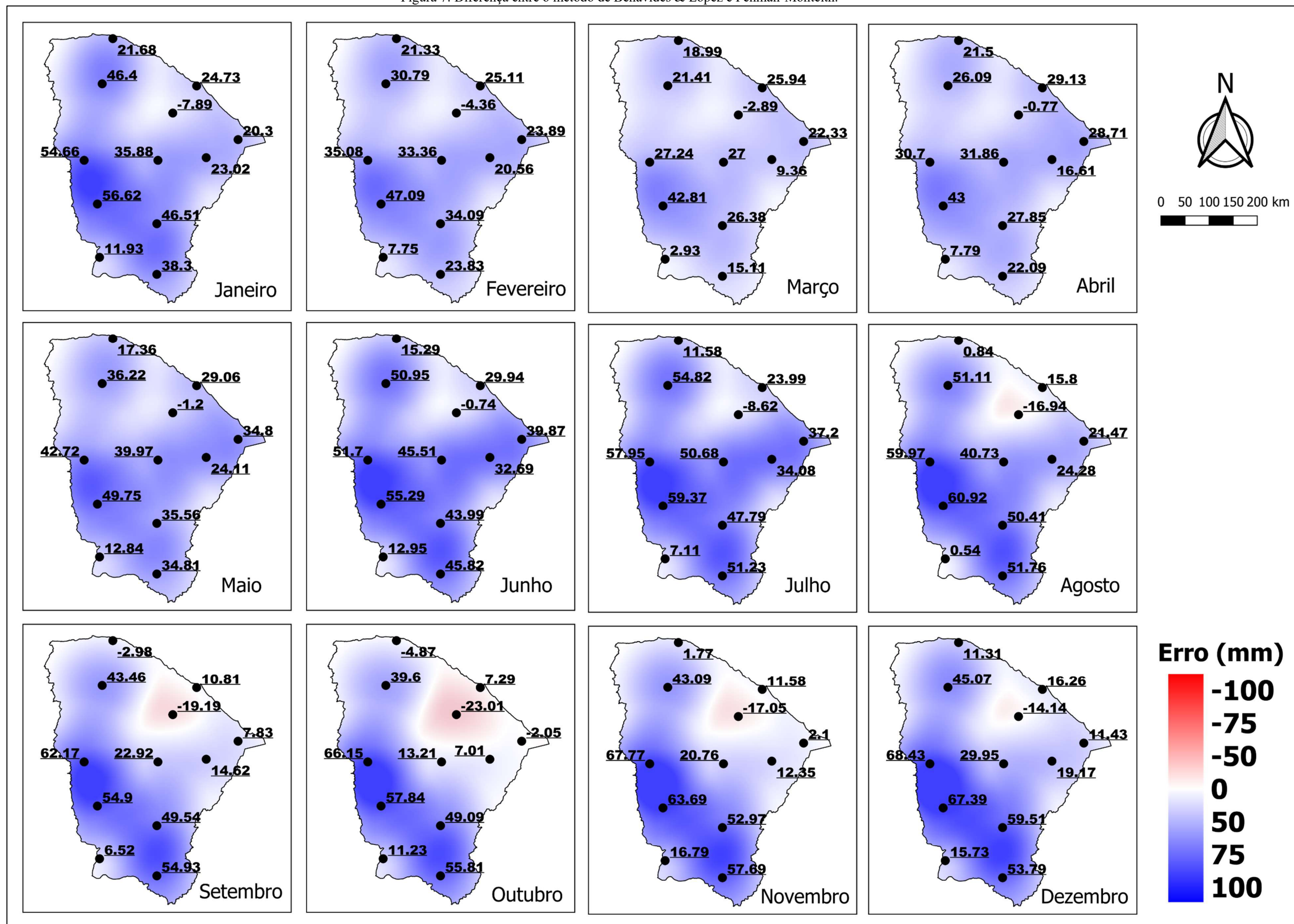
Tabela 11: Continuação.

MESES	MUNICÍPIOS					
	QUIXERAMOBIM	MORADA NOVA	TAUÁ	IGUATU	CAMPOS SALES	BARBALHA
JANEIRO	218,89	200,81	220,11	218,72	182,83	187,07
FEVEREIRO	180,42	164,66	181,01	172,65	142,42	146,88
MARÇO	176,52	157,09	181,87	172,15	141,45	149,15
ABRIL	161,47	147,34	165,80	158,69	136,58	143,43
MAIO	170,49	157,42	179,71	169,98	152,73	155,51
JUNHO	172,55	160,36	187,09	178,57	157,83	161,44
JULHO	198,25	185,32	211,83	205,46	178,66	181,64
AGOSTO	227,24	203,59	240,73	240,33	202,80	209,57
SETEMBRO	231,28	207,51	246,31	250,35	221,44	224,69
OUTUBRO	241,52	218,61	262,40	266,23	238,95	237,83
NOVEMBRO	234,85	212,10	254,84	258,79	223,97	224,83
DEZEMBRO	238,05	215,49	253,59	259,05	214,35	217,38
MÉDIA	204,29	185,86	215,44	212,58	182,84	186,62
TOTAL	2451,50	2230,30	2585,30	2550,96	2194,02	2239,43

Fonte: Autoria própria (2025).

A Figura 7 ilustra as diferenças entre os valores para a  $ET_o$  com relação ao método de Penman-Monteith.

Figura 7: Diferença entre o método de Benavides & Lopez e Penman-Monteith.



Fonte: Autoria própria (2025).

Na Tabela 12 são expostos os resultados para os índices e coeficientes estatísticos.

Tabela 12: Análise comparativa entre o método de Benavides & Lopez e Penman-Monteith.

MUNICÍPIOS	PARÂMETROS			Classificação do índice de confiança ( <i>c</i> )
	<i>r</i>	<i>d</i>	<i>c</i>	
CAMPOS SALES	0,99	0,98	0,97	Ótimo
ACARAÚ	0,97	0,90	0,88	Ótimo
GUARAMIRANGA	0,99	0,85	0,84	Muito Bom
MORADA NOVA	0,96	0,87	0,83	Muito Bom
JAGUARUANA	0,97	0,81	0,78	Muito Bom
FORTALEZA	0,99	0,79	0,78	Muito Bom
QUIXERAMOBIM	0,97	0,79	0,76	Muito Bom
IGUATU	0,99	0,72	0,71	Bom
SOBRAL	0,96	0,71	0,69	Bom
CRATEÚS	0,99	0,69	0,69	Bom
TAUÁ	0,99	0,61	0,60	Sofrível
BARBALHA	0,95	0,62	0,59	Sofrível

Fonte: Autoria própria (2025).

Embora o método de Benavides & Lopez tenha apresentado valores satisfatórios de correlação para todos os municípios analisados, observou-se através da Figura 7 uma tendência à superestimação dos valores de evapotranspiração em relação ao método de Penman-Monteith. Em regiões semiáridas, como o sertão cearense, a combinação de altas temperaturas e baixa umidade relativa pode amplificar as estimativas de  $ET_o$ , especialmente em métodos empíricos como Benavides & Lopez, que não consideram de forma detalhada o balanço energético.

Por outro lado, municípios com maior umidade relativa, como Acaraú e Guaramiranga, apresentaram resultados mais satisfatórios. Nesse sentido, em condições de temperaturas mais amenas e maior umidade relativa, onde os processos de evapotranspiração são menos intensos, o método de Benavides & Lopez tende a se ajustar melhor.

Entre os municípios analisados, Campos Sales obteve os melhores resultados, possivelmente devido às condições climáticas locais, onde a evapotranspiração é fortemente influenciada pela temperatura e umidade relativa, variáveis consideradas no método.

Em contraste, Barbalha, apesar de ter condições climáticas semelhantes às de Campos Sales, apresentou o pior desempenho. Isso sugere que sua evapotranspiração é influenciada por outras variáveis não contempladas pelo método, como a baixa velocidade do vento, que reduz o transporte de vapor d'água e desfavorece o processo de evapotranspiração, levando a uma superestimação dos valores esperados (STONE; SILVEIRA, 1995).



#### 4.7 Método de Jensen-Hayse

Na Tabela 13 são apresentados os resultados para a evapotranspiração de referência utilizando o método de Jensen-Hayse.

Tabela 13: Evapotranspiração de referência usando Jensen-Hayse.

MESES	MUNICÍPIOS					
	ACARAÚ	SOBRAL	FORTALEZA	GUARAMIRANGA	JAGUARUANA	CRATEÚS
JANEIRO	195,56	186,17	200,05	125,77	213,74	184,05
FEVEREIRO	161,27	158,65	164,02	101,87	177,83	158,64
MARÇO	169,04	171,25	170,53	104,02	193,48	171,75
ABRIL	155,10	158,64	154,34	98,37	174,67	155,98
MAIO	171,67	168,74	172,40	106,50	182,39	164,91
JUNHO	167,11	158,12	162,79	100,16	164,09	155,75
JULHO	187,20	178,58	184,34	115,68	180,98	177,46
AGOSTO	217,28	210,70	212,49	139,39	212,67	209,23
SETEMBRO	223,02	214,66	219,20	140,28	224,53	221,09
OUTUBRO	244,30	234,39	239,87	152,21	249,22	240,95
NOVEMBRO	226,05	212,31	224,83	139,71	231,60	214,97
DEZEMBRO	220,04	207,69	221,50	138,48	228,59	206,72
MÉDIA	194,80	188,32	193,86	121,87	202,81	188,46
TOTAL	2337,65	2259,89	2326,36	1462,43	2433,77	2261,49

Fonte: Autoria própria (2025).

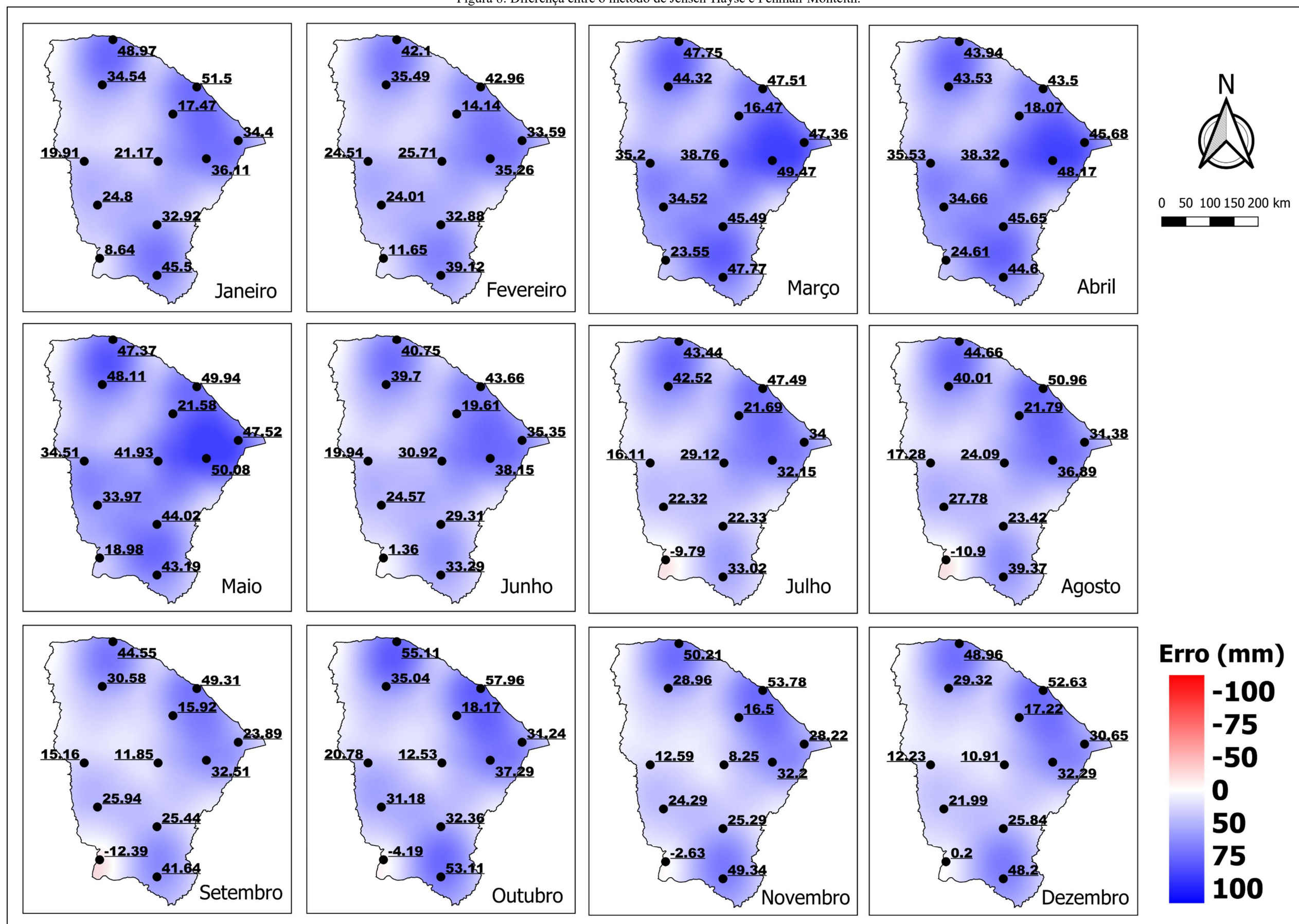
Tabela 13: Continuação.

MESES	MUNICÍPIOS					
	QUIXERAMOBIM	MORADA NOVA	TAUÁ	IGUATU	CAMPOS SALES	BARBALHA
JANEIRO	204,18	213,90	188,29	205,13	179,54	194,26
FEVEREIRO	172,76	179,36	157,94	171,44	146,32	162,17
MARÇO	188,28	197,20	173,58	191,26	162,07	181,82
ABRIL	167,93	178,90	157,46	176,49	153,40	165,94
MAIO	172,45	183,39	163,93	178,44	158,87	163,88
JUNHO	157,95	165,82	156,37	163,88	146,25	148,91
JULHO	176,69	183,39	174,78	180,01	161,76	163,43
AGOSTO	210,60	216,21	207,59	213,34	191,37	197,18
SETEMBRO	220,21	225,40	217,36	226,25	202,52	211,40
OUTUBRO	240,84	248,89	235,73	249,51	223,52	235,14
NOVEMBRO	222,33	231,95	215,44	231,10	204,55	216,48
DEZEMBRO	219,01	228,61	208,18	225,38	198,82	211,78
MÉDIA	196,10	204,42	188,05	201,02	177,42	187,70
TOTAL	2353,24	2453,02	2256,64	2412,22	2128,98	2252,39

Fonte: Autoria própria (2025).

A Figura 8 ilustra as diferenças entre os valores para a  $ET_o$  com relação ao método de Penman-Monteith.

Figura 8: Diferença entre o método de Jensen-Hayse e Penman-Monteith.



Fonte: Autoria própria (2025).

Na Tabela 14 são expostos os resultados para os índices e coeficientes estatísticos.

Tabela 14: Análise comparativa entre o método de Jensen-Hayse e Penman-Monteith.

MUNICÍPIOS	PARÂMETROS			Classificação do índice de confiança ( <i>c</i> )
	<i>r</i>	<i>d</i>	<i>c</i>	
CAMPOS SALES	0,95	0,95	0,91	Ótimo
CRATEÚS	0,98	0,87	0,86	Ótimo
QUIXERAMOBIM	0,98	0,84	0,83	Muito Bom
GUARAMIRANGA	0,99	0,81	0,81	Muito Bom
TAUÁ	0,99	0,80	0,79	Muito Bom
IGUATU	0,97	0,77	0,75	Bom
JAGUARUANA	0,98	0,75	0,73	Bom
SOBRAL	0,99	0,72	0,71	Bom
MORADA NOVA	0,98	0,70	0,69	Bom
ACARAÚ	0,99	0,64	0,64	Mediano
BARBALHA	0,98	0,61	0,60	Sofrível
FORTALEZA	1,00	0,60	0,59	Sofrível

Fonte: Autoria própria (2025).

O coeficiente de correlação  $r$  apresentou valores consistentemente elevados em todos os municípios analisados. No entanto, os resultados ilustrados na Figura 8 mostram uma clara tendência de superestimação.

O método de Jensen-Hayse utiliza uma equação simplificada baseada principalmente na radiação solar e na temperatura média do ar. Dessa forma, em municípios com condições climáticas complexas, que combinam altas temperaturas e umidade relativa, ou vice-versa, os resultados tendem a ser imprecisos.

Fortaleza e Acaraú, apresentaram resultados insatisfatórios, corroborando com essa ideia. Na verdade, embora esses locais tenham alta umidade relativa, eles também têm altas temperaturas. Como o método se baseia apenas na temperatura e radiação solar, ele superestima significativamente a  $ET_o$  nessas condições específicas, demonstrando sua limitação em ambientes com variabilidade climática mais acentuada.

Por outro lado, mesmo apresentando alta umidade relativa, Guaramiranga obteve resultados satisfatórios. Nesse caso, as temperaturas amenas e à menor incidência de radiação solar, reduzem a evapotranspiração (STONE; SILVEIRA, 1995). Por considerar esses fatores, o método de Jensen-Hayse conseguiu estimar valores adequados para a  $ET_o$ .

O bom desempenho observado em Crateús e Campos Sales, retificam também essa ideia, eles são caracterizados por baixa umidade relativa, altas temperaturas e radiação solar.

#### 4.8 Método de Blaney-Criddle

Na Tabela 15 são apresentados os resultados para a evapotranspiração de referência utilizando o método de Blaney-Criddle.

Tabela 15: Evapotranspiração de referência usando Blaney-Criddle.

MESES	MUNICÍPIOS					
	ACARAÚ	SOBRAL	FORTALEZA	GUARAMIRANGA	JAGUARUANA	CRATEÚS
JANEIRO	136,69	136,55	137,64	81,96	157,92	145,75
FEVEREIRO	106,82	106,50	108,21	64,59	125,04	115,67
MARÇO	105,68	107,06	108,38	64,26	128,45	117,49
ABRIL	105,56	108,64	107,21	66,46	126,40	116,07
MAIO	125,61	127,50	129,47	77,20	145,14	139,79
JUNHO	132,72	134,84	132,09	78,07	143,73	151,44
JULHO	152,16	155,44	151,10	89,79	161,55	179,65
AGOSTO	175,78	184,11	171,56	106,59	185,43	205,79
SETEMBRO	174,67	181,64	170,76	103,82	189,26	208,00
OUTUBRO	176,42	183,76	171,30	102,92	192,13	208,73
NOVEMBRO	165,00	167,49	161,23	94,44	178,13	187,18
DEZEMBRO	161,96	162,38	158,63	93,22	175,08	178,13
MÉDIA	143,26	146,33	142,30	85,28	159,02	162,81
TOTAL	1719,07	1755,90	1707,59	1023,32	1908,26	1953,69

Fonte: Autoria própria (2025).

Tabela 15: Continuação.

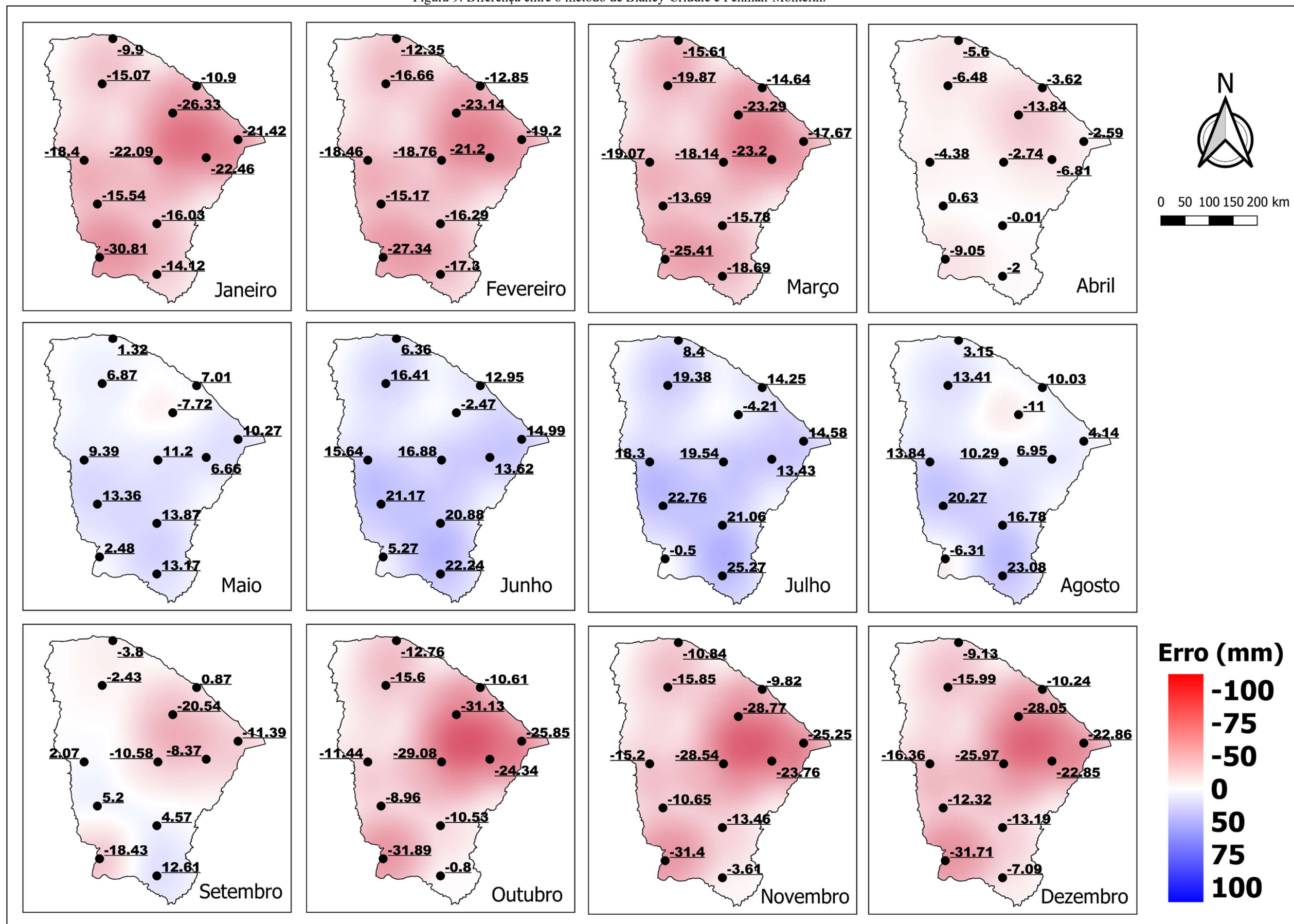
MESES	MUNICÍPIOS					
	QUIXERAMOBIM	MORADA NOVA	TAUÁ	IGUATU	CAMPOS SALES	BARBALHA
JANEIRO	160,92	155,33	147,95	156,18	140,09	134,64
FEVEREIRO	128,30	122,90	118,75	122,26	107,33	105,75
MARÇO	131,38	124,52	125,37	129,99	113,11	115,35
ABRIL	126,87	123,92	123,43	130,83	119,73	119,34
MAIO	141,72	139,97	143,32	148,29	142,38	133,86
JUNHO	143,92	141,29	152,97	155,45	150,16	137,87
JULHO	167,11	164,67	175,22	178,73	171,06	155,68
AGOSTO	196,79	186,26	200,09	206,70	195,95	180,89
SETEMBRO	197,78	184,52	196,62	205,38	196,49	182,37
OUTUBRO	199,23	187,26	195,59	206,61	195,82	181,23
NOVEMBRO	185,54	175,99	180,50	192,35	175,78	163,54
DEZEMBRO	182,13	173,47	173,87	186,35	166,91	156,50
MÉDIA	163,47	156,68	161,14	168,26	156,23	147,25
TOTAL	1961,68	1880,12	1933,69	2019,13	1874,81	1767,02

Fonte: Autoria própria (2025).

A Figura 9 ilustra as diferenças entre os valores para a  $ET_o$  com relação ao método de Penman-Monteith.



Figura 9: Diferença entre o método de Blaney-Criddle e Penman-Monteith.



Fonte: Autoria própria (2025).

Na Tabela 16 são expostos os resultados para os índices e coeficientes estatísticos.

Tabela 16: Análise comparativa entre o método de Blaney-Criddle e Penman-Monteith.

MUNICÍPIOS	PARÂMETROS			Classificação do índice de confiança ( <i>c</i> )
	<i>r</i>	<i>d</i>	<i>c</i>	
ACARAÚ	0,96	0,97	0,93	Ótimo
CRATEÚS	0,92	0,95	0,87	Ótimo
FORTALEZA	0,91	0,95	0,86	Ótimo
IGUATU	0,88	0,94	0,83	Muito Bom
SOBRAL	0,89	0,93	0,83	Muito Bom
CAMPOS SALES	0,91	0,89	0,81	Muito Bom
TAUÁ	0,86	0,93	0,80	Muito Bom
QUIXERAMOBIM	0,88	0,90	0,79	Muito Bom
JAGUARUANA	0,88	0,90	0,79	Muito Bom
MORADA NOVA	0,85	0,89	0,76	Muito Bom
BARBALHA	0,80	0,89	0,71	Bom
GUARAMIRANGA	0,86	0,72	0,63	Mediano

Fonte: Autoria própria (2025).

Os resultados apresentados na Tabela 16 indicam um desempenho satisfatório do método Blaney-Criddle em comparação com Penman-Monteith para os municípios cearenses analisados. Os coeficientes de correlação *r* e concordância *d* demonstraram valores consistentemente elevados e o coeficiente de confiança *c* obteve classificações “Ótimo” e “Muito Bom” para quase toda a amostragem, com exceção dos municípios de Guaramiranga e Barbalha.

Conforme apontado por EMBRAPA (2010), o método de Blaney-Criddle foi originalmente desenvolvido para a região oeste dos Estados Unidos, abrangendo áreas semiáridas dos estados de Novo México e Texas. Em função disso Blaney-Criddle é fundamentado em fatores como a temperatura média e o fotoperíodo, que desempenham um papel significativo em regiões semiáridas, onde a radiação solar é intensa e a temperatura é um dos principais controladores da evapotranspiração.

Nesse contexto, apesar da simplicidade do método, é possível que os bons resultados observados no Ceará estejam relacionados às semelhanças climáticas entre o estado e a região de origem do método, ambas caracterizadas por climas semiáridos, baixa precipitação e alta demanda evaporativa. Por outro lado, o município de Guaramiranga, que apresenta alta umidade, temperaturas amenas e menor incidência solar, obteve os piores resultados, o que pode ser explicado pelas características climáticas distintas.

#### 4.9 Método da Radiação Solar

Na Tabela 17 são apresentados os resultados para a evapotranspiração de referência utilizando o método da Radiação Solar.

Tabela 17: Evapotranspiração de referência usando Radiação Solar.

MESES	MUNICÍPIOS					
	ACARAÚ	SOBRAL	FORTALEZA	GUARAMIRANGA	JAGUARUANA	CRATEÚS
JANEIRO	159,40	153,45	168,12	83,99	204,80	161,42
FEVEREIRO	112,72	115,33	118,01	55,86	148,69	127,15
MARÇO	106,47	115,35	110,75	48,12	153,45	129,99
ABRIL	94,33	105,15	95,21	44,84	131,76	112,87
MAIO	125,54	128,47	129,32	58,21	155,24	139,86
JUNHO	137,03	131,60	130,83	59,08	143,01	148,64
JULHO	175,11	169,70	172,13	84,87	176,97	197,13
AGOSTO	236,61	239,89	227,88	130,12	243,69	261,91
SETEMBRO	244,86	243,45	238,26	130,06	265,79	275,32
OUTUBRO	272,17	271,50	263,03	141,95	302,17	296,70
NOVEMBRO	239,46	225,75	235,73	119,40	264,96	241,04
DEZEMBRO	215,84	202,75	217,24	110,41	244,95	213,57
MÉDIA	176,63	175,20	175,54	88,91	202,96	192,13
TOTAL	2119,54	2102,39	2106,51	1066,90	2435,48	2305,60

Fonte: Autoria própria (2025).

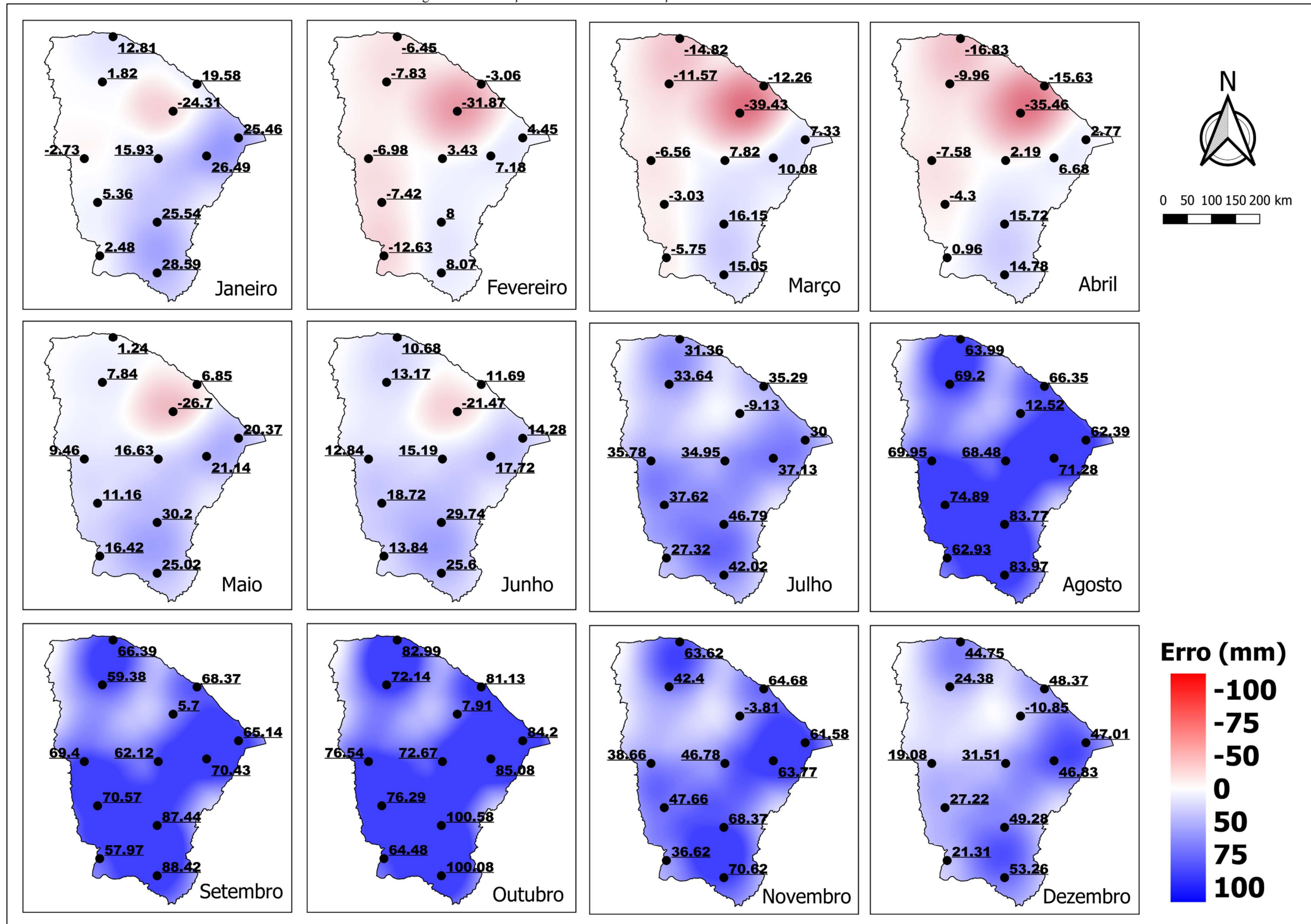
Tabela 17: Continuação.

MESES	MUNICÍPIOS					
	QUIXERAMOBIM	MORADA NOVA	TAUÁ	IGUATU	CAMPOS SALES	BARBALHA
JANEIRO	198,94	204,28	168,85	197,74	173,38	177,35
FEVEREIRO	150,49	151,28	126,50	146,56	122,04	131,12
MARÇO	157,34	157,80	136,04	161,92	132,77	149,10
ABRIL	131,80	137,41	118,51	146,56	129,74	136,12
MAIO	147,14	154,44	141,12	164,62	156,31	145,71
JUNHO	142,23	145,40	150,52	164,31	158,72	141,22
JULHO	182,52	188,37	190,08	204,46	198,87	172,43
AGOSTO	254,98	250,59	254,71	273,69	265,19	241,78
SETEMBRO	270,48	263,32	261,98	288,25	272,88	258,18
OUTUBRO	300,97	296,68	280,84	317,72	292,20	282,10
NOVEMBRO	260,87	263,52	238,81	274,18	243,80	237,77
DEZEMBRO	239,61	243,16	213,41	248,82	219,93	216,84
MÉDIA	203,11	204,69	190,11	215,74	197,15	190,81
TOTAL	2437,37	2456,24	2281,37	2588,83	2365,85	2289,73

Fonte: Autoria própria (2025).

A Figura 10 ilustra as diferenças entre os valores para a  $ET_o$  com relação ao método de Penman-Monteith.

Figura 10: Diferença entre o método da Radiação Solar e Penman-Monteith.



Fonte: Autoria própria (2025).



Na Tabela 18 são expostos os resultados para os índices e coeficientes estatísticos.

Tabela 18: Análise comparativa entre o método da Radiação Solar e Penman-Monteith.

MUNICÍPIOS	PARÂMETROS			Classificação do índice de confiança ( <i>c</i> )
	<i>r</i>	<i>d</i>	<i>c</i>	
CAMPOS SALES	0,98	0,86	0,84	Muito Bom
CRATEÚS	0,96	0,83	0,80	Muito Bom
GUARAMIRANGA	0,96	0,83	0,80	Muito Bom
QUIXERAMOBIM	0,96	0,83	0,80	Muito Bom
SOBRAL	0,96	0,82	0,78	Muito Bom
JAGUARUANA	0,98	0,78	0,76	Muito Bom
ACARAÚ	0,99	0,77	0,76	Muito Bom
TAUÁ	0,95	0,77	0,73	Bom
FORTALEZA	0,98	0,73	0,71	Bom
MORADA NOVA	0,97	0,73	0,71	Bom
IGUATU	0,97	0,70	0,68	Bom
BARBALHA	0,96	0,59	0,57	Sofrível

Fonte: Autoria própria (2025).

O método da Radiação Solar apresentou valores satisfatórios para o coeficiente de correlação  $r$  em todos os municípios analisados, demonstrando forte relação linear para com os valores de Penman-Monteith. Entretanto, a Figura 10 evidencia discrepâncias significativas entre os resultados dos dois métodos. Os baixos valores para o coeficiente de concordância  $d$  refletem a incapacidade do método de acertar a magnitude dos valores.

Não obstante a isso, a Figura 10 indica uma superestimação expressiva dos resultados pelo método da Radiação Solar durante o segundo semestre do ano. Por outro lado, no primeiro semestre, que coincide com o período chuvoso e condições de maior umidade relativa, os resultados dos dois métodos apresentam maior concordância. Logo, infere-se que o método da Radiação Solar seja mais preciso considerando a influência das condições climáticas do primeiro semestre do ano para os municípios analisados.

A umidade relativa mais alta durante o período chuvoso reduz o gradiente de vapor d'água entre a superfície e a atmosfera. Com isso, fatores como vento e temperatura têm menor influência na evapotranspiração, tornando a radiação solar a principal variável que governa o processo, a energia disponível é mais controlada e previsível, tornando o método mais eficiente para estimar a evapotranspiração. Como o método da radiação solar baseia-se primariamente na energia disponível (radiação) para calcular a evapotranspiração, ele funciona de forma mais consistente nessas condições.

#### 4.10 Método de Romaneko

Na Tabela 19 são apresentados os resultados para a evapotranspiração de referência utilizando o método de Romaneko.

Tabela 19: Evapotranspiração de referência usando Romaneko.

MESES	MUNICÍPIOS					
	ACARAÚ	SOBRAL	FORTALEZA	GUARAMIRANGA	JAGUARUANA	CRATEÚS
JANEIRO	101,34	152,38	112,23	55,78	150,32	187,94
FEVEREIRO	83,75	113,30	95,76	44,15	130,81	143,82
MARÇO	62,82	81,22	77,89	32,60	105,74	110,05
ABRIL	59,07	78,95	72,20	28,99	98,33	99,81
MAIO	67,67	97,15	84,11	33,93	111,57	127,56
JUNHO	79,13	128,93	92,54	37,98	123,80	164,17
JULHO	94,41	152,99	106,03	45,96	141,32	203,65
AGOSTO	119,24	198,01	129,10	67,18	167,52	248,38
SETEMBRO	127,27	213,88	139,79	75,51	181,65	279,32
OUTUBRO	128,02	216,85	139,42	75,39	178,65	288,26
NOVEMBRO	125,53	207,02	136,62	71,24	171,21	276,19
DEZEMBRO	121,80	188,42	129,10	66,19	165,31	251,58
MÉDIA	97,50	152,42	109,57	52,91	143,85	198,40
TOTAL	1170,05	1829,10	1314,78	634,91	1726,23	2380,75

Fonte: Autoria própria (2025).

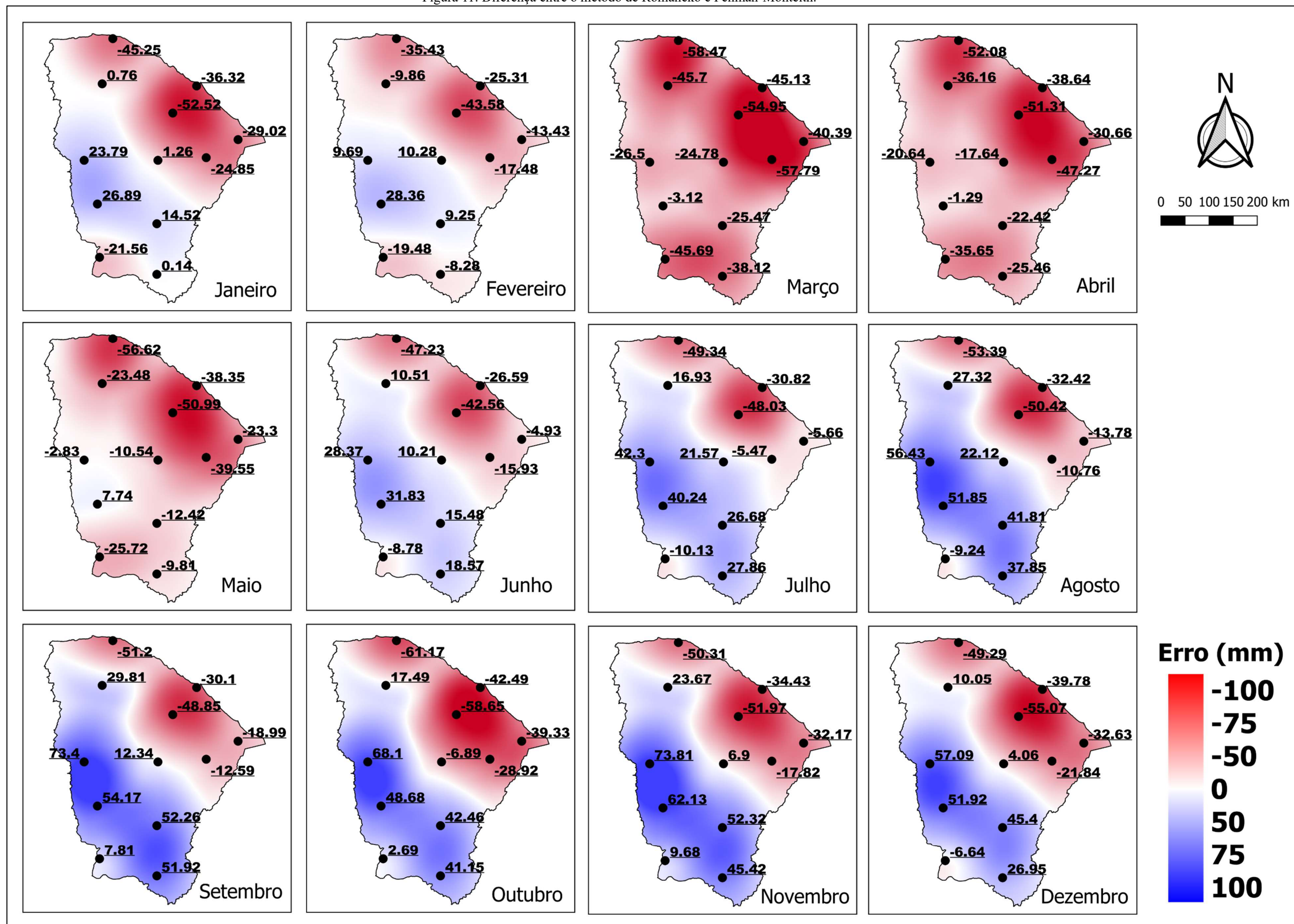
Tabela 19: Continuação.

MESES	MUNICÍPIOS					
	QUIXERAMOBIM	MORADA NOVA	TAUÁ	IGUATU	CAMPOS SALES	BARBALHA
JANEIRO	184,26	152,94	190,38	186,73	149,34	148,91
FEVEREIRO	157,33	126,62	162,28	147,80	115,19	114,77
MARÇO	124,74	89,94	135,95	120,30	92,83	95,92
ABRIL	111,97	83,46	121,51	108,42	93,14	95,88
MAIO	119,98	93,76	137,70	122,00	114,17	110,88
JUNHO	137,24	111,74	163,63	150,06	136,11	134,19
JULHO	169,14	145,77	192,70	184,35	161,43	158,27
AGOSTO	208,63	168,56	231,66	231,73	193,02	195,66
SETEMBRO	220,70	180,30	245,59	253,07	222,72	221,68
OUTUBRO	221,42	182,68	253,23	259,60	230,40	223,18
NOVEMBRO	220,98	181,93	253,28	258,14	216,86	212,57
DEZEMBRO	212,15	174,49	238,11	244,94	191,98	190,54
MÉDIA	174,05	141,02	193,83	188,93	159,77	158,54
TOTAL	2088,55	1692,18	2326,01	2267,12	1917,20	1902,44

Fonte: Autoria própria (2025).

A Figura 11 ilustra as diferenças entre os valores para a  $ET_o$  com relação ao método de Penman-Monteith.

Figura 11: Diferença entre o método de Romaneko e Penman-Monteith.



Fonte: Autoria própria (2025).

Na Tabela 20 são expostos os resultados para os índices e coeficientes estatísticos.

Tabela 20: Análise comparativa entre o método de Romanenko e Penman-Monteith.

MUNICÍPIOS	PARÂMETROS			Classificação do índice de confiança (c)
	<i>r</i>	<i>d</i>	<i>c</i>	
CAMPOS SALES	0,98	0,94	0,92	Ótimo
QUIXERAMOBIM	0,94	0,96	0,91	Ótimo
SOBRAL	0,94	0,90	0,85	Ótimo
IGUATU	0,97	0,86	0,83	Muito Bom
CRATEÚS	0,98	0,80	0,78	Muito Bom
JAGUARUANA	0,93	0,83	0,77	Muito Bom
MORADA NOVA	0,92	0,82	0,76	Muito Bom
TAUÁ	0,97	0,77	0,75	Bom
BARBALHA	0,91	0,79	0,72	Bom
FORTALEZA	0,97	0,68	0,66	Bom
ACARAÚ	0,97	0,59	0,57	Sofrível
GUARAMIRANGA	0,98	0,48	0,47	Mau

Fonte: Autoria própria (2025).

Apesar de Romanenko apresentar uma excelente correlação com os resultados obtidos pelo método de Penman-Monteith, os valores observados para as demais métricas evidenciam uma imprecisão do método em estimar a magnitude dos valores esperados.

O cálculo de evapotranspiração de Romanenko baseia-se exclusivamente na temperatura do ar e na umidade relativa. Essa abordagem limitada, que não contempla a interação dinâmica de todos os fatores climáticos, tende a superestimar a evapotranspiração em períodos secos, caracterizados por temperaturas elevadas e baixa umidade relativa, e a subestimar em períodos chuvosos, quando a umidade do ar é mais elevada.

Essa análise é reforçada ao observar que os resultados menos precisos foram registrados nos municípios de Crateús, Guaramiranga e Acaraú. Em Crateús, a baixa umidade relativa e as altas temperaturas resultaram em uma superestimação do método em condições áridas, enquanto em Guaramiranga e Acaraú, caracterizados por maior umidade e temperaturas amenas, observou-se uma subestimação da evapotranspiração.

Por outro lado, em Sobral, embora as temperaturas tenham sido elevadas, os valores de umidade relativa acima da média podem ter atenuado os efeitos da alta demanda evaporativa. Já em Campos Sales, as temperaturas e umidade relativa são mais amenas, nesse caso a menor disponibilidade hídrica pode ter compensado a influência térmica. Esse equilíbrio entre temperatura e umidade relativa pode ter contribuído para melhores resultados.

#### 4.11 Método de Penman

Na Tabela 21 são apresentados os resultados para a evapotranspiração de referência utilizando o método de Penman.

Tabela 21: Evapotranspiração de referência usando Penman.

MESES	MUNICÍPIOS					
	ACARAÚ	SOBRAL	FORTALEZA	GUARAMIRANGA	JAGUARUANA	CRATEÚS
JANEIRO	105,57	126,01	100,96	66,87	160,24	158,60
FEVEREIRO	75,06	84,31	74,24	49,73	115,84	112,12
MARÇO	61,94	68,73	63,92	41,56	95,90	95,56
ABRIL	56,82	60,97	57,36	35,15	81,37	80,79
MAIO	74,88	72,87	71,31	40,54	95,39	106,43
JUNHO	93,37	94,67	82,07	44,70	109,42	141,24
JULHO	117,46	118,91	103,20	58,25	136,50	185,05
AGOSTO	157,63	166,72	133,54	84,04	181,09	225,81
SETEMBRO	166,07	185,80	144,37	94,53	209,25	242,32
OUTUBRO	166,38	195,97	146,07	98,50	219,71	251,00
NOVEMBRO	153,65	181,36	136,28	89,05	203,53	231,98
DEZEMBRO	145,80	170,55	131,27	84,43	191,69	216,36
MÉDIA	114,55	127,24	103,72	65,61	149,99	170,60
TOTAL	1374,63	1526,86	1244,59	787,37	1799,92	2047,26

Fonte: Autoria própria (2025).

Tabela 21: Continuação.

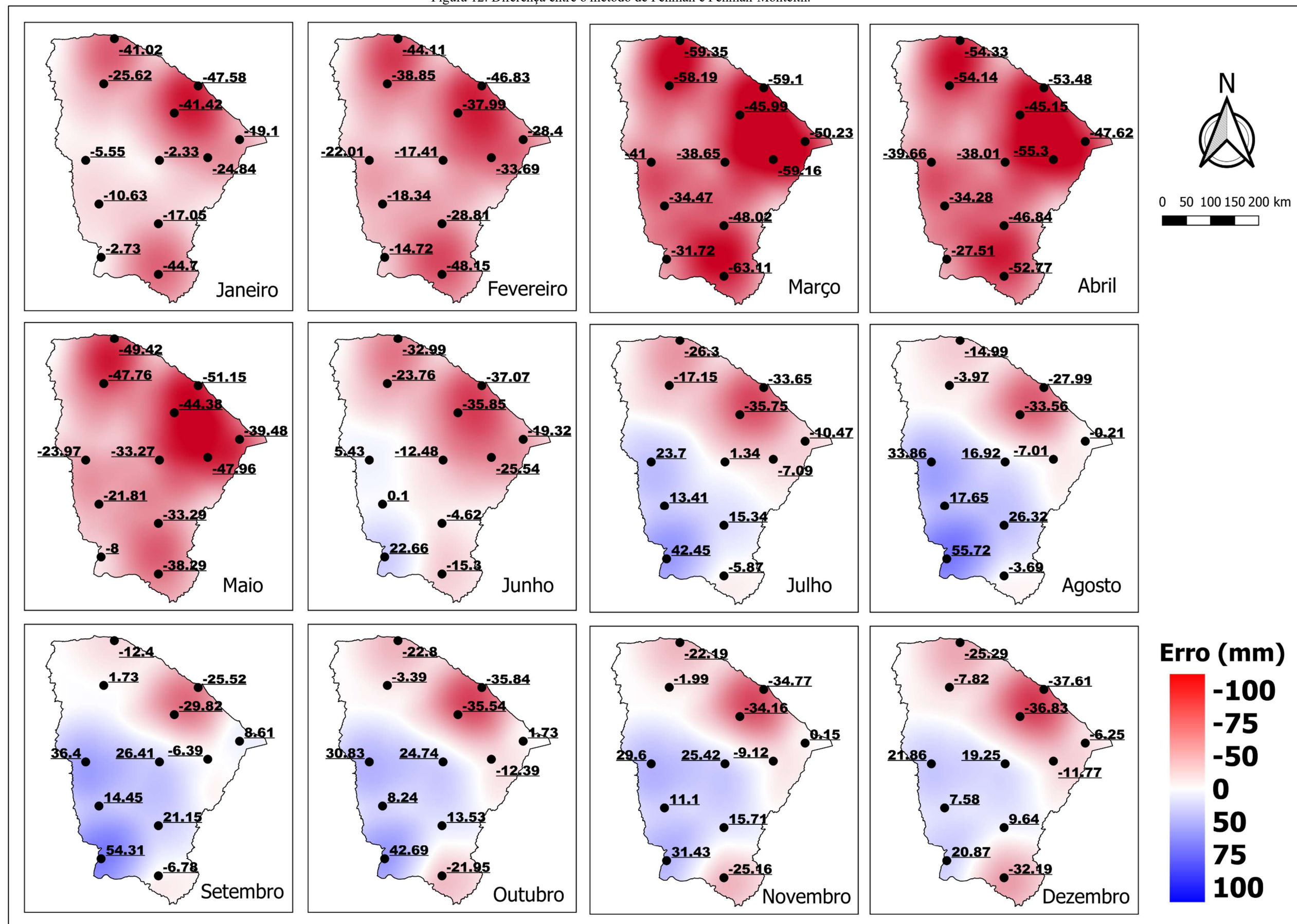
MESES	MUNICÍPIOS					
	QUIXERAMOBIM	MORADA NOVA	TAUÁ	IGUATU	CAMPOS SALES	BARBALHA
JANEIRO	180,68	152,95	152,85	155,15	168,17	104,07
FEVEREIRO	129,64	110,41	115,59	109,74	119,95	74,90
MARÇO	110,87	88,57	104,60	97,76	106,80	70,94
ABRIL	91,61	75,43	88,52	83,99	101,27	68,57
MAIO	97,25	85,35	108,15	101,13	131,90	82,40
JUNHO	114,55	102,13	131,91	129,95	167,54	100,32
JULHO	148,91	144,15	165,88	173,01	214,00	124,53
AGOSTO	203,42	172,31	197,46	216,24	257,98	154,12
SETEMBRO	234,76	186,50	205,87	221,97	269,23	162,97
OUTUBRO	253,04	199,21	212,79	230,68	270,40	160,08
NOVEMBRO	239,51	190,63	202,25	221,52	238,61	141,98
DEZEMBRO	227,34	184,56	193,77	209,18	219,50	131,39
MÉDIA	169,30	141,01	156,64	162,53	188,78	114,69
TOTAL	2031,59	1692,18	1879,63	1950,32	2265,36	1376,28

Fonte: Autoria própria (2025).

A Figura 12 ilustra as diferenças entre os valores para a  $ET_o$  com relação ao método de Penman-Monteith.



Figura 12: Diferença entre o método de Penman e Penman-Monteith.



Fonte: Autoria própria (2025).

Na Tabela 22 são expostos os resultados para os índices e coeficientes estatísticos.

Tabela 22: Análise comparativa entre o método de Penman e Penman-Monteith.

MUNICÍPIOS	PARÂMETROS			Classificação do índice de confiança ( <i>c</i> )
	<i>r</i>	<i>d</i>	<i>c</i>	
QUIXERAMOBIM	0,98	0,93	0,91	Ótimo
TAUÁ	0,96	0,93	0,90	Ótimo
CRATEÚS	0,97	0,91	0,88	Ótimo
JAGUARUANA	0,97	0,90	0,87	Ótimo
IGUATU	0,95	0,90	0,86	Ótimo
CAMPOS SALES	0,96	0,88	0,84	Muito Bom
SOBRAL	0,98	0,85	0,83	Muito Bom
MORADA NOVA	0,95	0,83	0,80	Muito Bom
ACARAÚ	0,98	0,76	0,74	Bom
FORTALEZA	0,97	0,65	0,63	Mediano
BARBALHA	0,86	0,69	0,59	Sofrível
GUARAMIRANGA	0,99	0,59	0,59	Sofrível

Fonte: Autoria própria (2025).

O método de Penman, embora simplificado e com algumas limitações, apresentou bons resultados para o índice de correlação  $r$ , sendo capaz de representar a influência das variações climáticas ao longo do tempo no processo de evapotranspiração. No entanto, as demais métricas evidenciam uma imprecisão em estimar os valores da  $ET_o$ .

Os resultados indicam que o método de Penman funciona melhor em condições climáticas mais secas e estáveis, como nos municípios de Tauá, Quixeramobim, Crateús, Jaguaruana e Iguatu. Nessas regiões, a umidade relativa é geralmente baixa e apresenta pouca variação ao longo do tempo, tornando sua influência no processo de evapotranspiração menos significativa, logo a evapotranspiração é principalmente controlada pela radiação solar e pela temperatura do ar, variáveis que são diretamente consideradas no modelo.

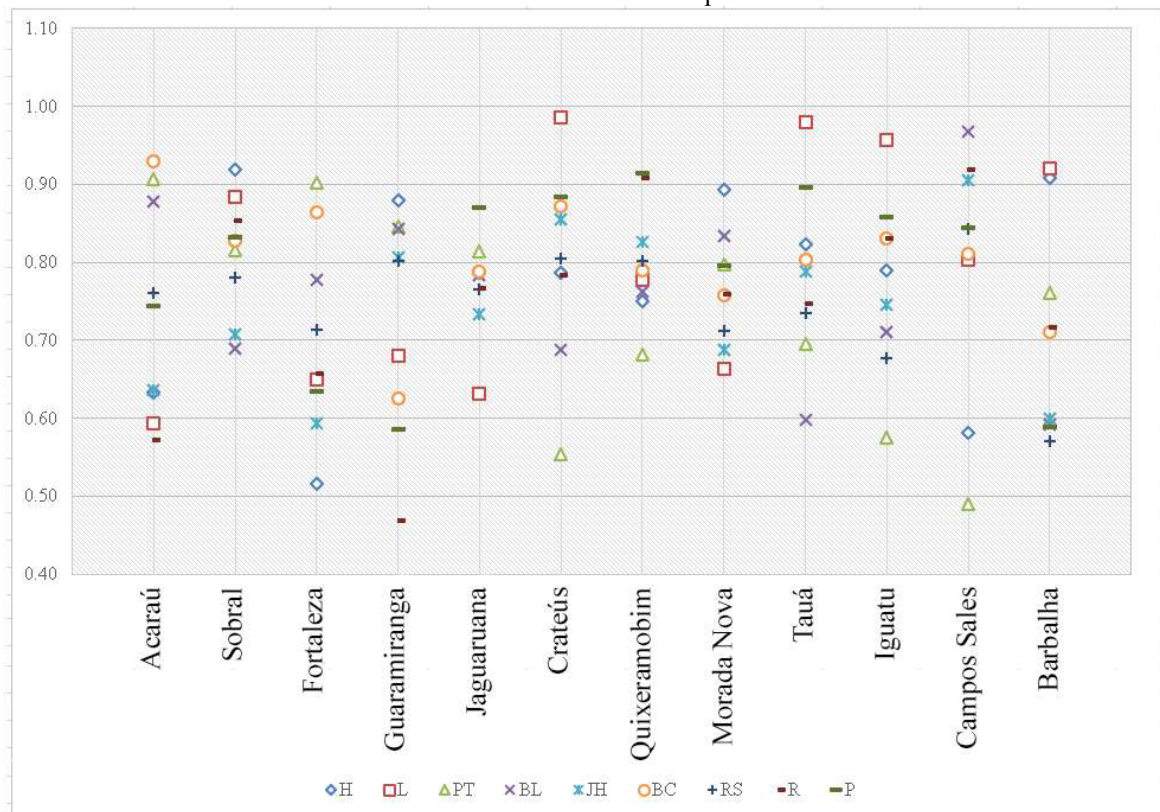
Entretanto, em regiões com maior umidade e variações climáticas acentuadas, como Guaramiranga, Fortaleza e Acaraú, o método de Penman enfrenta dificuldades. O modelo de Penman, em sua formulação original, não considera diretamente a umidade relativa. Em vez disso, ele utiliza uma aproximação baseada na radiação solar e na temperatura do ar, incorporando a umidade do ar de forma indireta. Esse processo, ao considerar temperaturas mais amenas e menor incidência solar, tende a superestimar a umidade relativa, o que resulta em uma subestimação da evapotranspiração estimada. Além disso, é notória sua imprecisão em climas complexos como Acaraú e Fortaleza, em que há alta umidade e altas temperaturas.

#### 4.12 Avaliação geral dos métodos

Das 17 metodologias apresentadas inicialmente, os resultados para o índice de confiança  $c$  apresentados pelo Gráfico 1, permitiu identificar quais delas tiveram desempenhos insatisfatórios e refinar as análises posteriores, garantindo que apenas os métodos com melhores desempenho fossem avaliados. Essa primeira triagem evidenciou resultados consistentemente ruins para o coeficiente de confiança  $c$  dos métodos de Turc, Camargo, Kharrufa e Hamon, indicando baixa confiabilidade na estimativa da evapotranspiração. Os métodos do Tanque Classe A, Balanço de Energia, Thornthwaite e Makkink, apesar de melhores resultados, apresentaram mediana menor ou igual a 0,7, sendo por isso desconsiderados.

O Gráfico 2 e a Tabela 23 resumem o desempenho das metodologias avaliadas considerando o valor do coeficiente de confiança  $c$ . O Gráfico 2 permite avaliar os resultados de forma isolada para cada município, enquanto a Tabela 23 expressa esses resultados em valores numéricos e traz o valor médio e o desvio padrão para cada método, isso servirá para avaliar em termos gerais o desempenho de cada metodologia e definir os melhores métodos considerando toda a amostragem que compõe esse estudo.

Gráfico 2: Gráfico de desempenho.



Fonte: Autoria própria (2025).



Tabela 23: Matriz de desempenho.

Municípios	Métodos								
	H	L	PT	BL	JH	BC	RS	R	P
Acaraú	0.63	0.59	0.91	0.88	0.64	0.93	0.76	0.57	0.74
Sobral	0.92	0.88	0.82	0.69	0.71	0.83	0.78	0.85	0.83
Fortaleza	0.52	0.65	0.90	0.78	0.59	0.86	0.71	0.66	0.63
Guaramiranga	0.88	0.68	0.85	0.84	0.81	0.63	0.80	0.47	0.59
Jaguaruana	0.79	0.63	0.81	0.78	0.73	0.79	0.76	0.77	0.87
Crateús	0.79	0.99	0.55	0.69	0.86	0.87	0.80	0.78	0.88
Quixeramobim	0.75	0.78	0.68	0.76	0.83	0.79	0.80	0.91	0.91
Morada Nova	0.89	0.66	0.80	0.83	0.69	0.76	0.71	0.76	0.80
Tauá	0.82	0.98	0.70	0.60	0.79	0.80	0.73	0.75	0.90
Iguatu	0.79	0.96	0.58	0.71	0.75	0.83	0.68	0.83	0.86
Campos Sales	0.58	0.80	0.49	0.97	0.91	0.81	0.84	0.92	0.84
Barbalha	0.91	0.92	0.76	0.59	0.60	0.71	0.57	0.72	0.59
Média	<b>0.77</b>	<b>0.79</b>	<b>0.74</b>	<b>0.76</b>	<b>0.74</b>	<b>0.80</b>	<b>0.75</b>	<b>0.75</b>	<b>0.79</b>
Desvio padrão	<b>0.13</b>	<b>0.15</b>	<b>0.14</b>	<b>0.11</b>	<b>0.10</b>	<b>0.08</b>	<b>0.07</b>	<b>0.13</b>	<b>0.12</b>

Fonte: Autoria própria (2025).

Onde:

- H – Hargreaves;
- L – Linacre;
- PT – Priestley & Taylor;
- BL – Benavides & Lopez;
- JH – Jensen-Hayse;
- BC – Blaney-Criddle;
- RS – Radiação Solar;
- R – Romaneko;
- P – Penman.

Em termos gerais, considerando a média dos resultados para o índice de confiança  $c$ , os melhores métodos foram Blaney-Criddle, Linacre e Penman. Além de obter maior pontuação, Blaney-Criddle também apresentou segundo menor desvio padrão, indicando uma boa adaptação para o contexto cearense em função da sua baixa variabilidade. Em contrapartida, Linacre teve o maior desvio padrão e Penman o quinto maior.

O desempenho de Blaney-Criddle se deve principalmente à semelhança climática entre a região em que esse método foi originado e os municípios analisados. Apresentou uma tendência a subestimar os valores de  $ET_0$  nos três primeiros e últimos meses do ano, enquanto nos demais meses teve resultados bem equilibrados.

O método de Linacre teve resultados equilibrados entre janeiro e julho, com uma leve tendência a subestimar os valores esperados, mas com poucas discrepâncias. Já entre agosto e dezembro essa tendência é amplificada, principalmente nos municípios mais úmidos. Não obstante a isso, Linacre se destacou por alcançar os maiores valores individuais para o coeficiente de confiança  $c$ , com 0,99 para Crateús, 0,98 para Tauá e 0,96 em Iguatu, mostrando-se a melhor alternativa para estimar a evapotranspiração nesses municípios.

Apesar de não considerar diretamente a influência da umidade relativa na sua formulação, em termos gerais o método de Penman teve o terceiro melhor resultado. No primeiro semestre do ano, período com maior umidade relativa em função das chuvas, apresentou forte tendência a subestimar os valores de Penman-Monteith, especialmente nos municípios mais úmidos. Já no segundo semestre, continuou a subestimar a  $ET_o$  nos municípios úmidos, mas teve resultados equilibrados nos outros municípios.

De modo específico, considerando as condições climáticas locais de cada município, a Tabela 26 traz um ranking considerando os resultados de cada método para o coeficiente de confiança  $c$ .

Tabela 24: Ranking dos métodos por município.

Municípios	1ª Opção	2ª Opção	3ª Opção
Acaraú	BC	PT	BL
Sobral	H	L	BC / P
Fortaleza	PT	BC	BL
Guaramiranga	H	PT	BL
Jaguaruana	P	PT	H / BC
Crateús	L	P	BC
Quixeramobim	R / P	R / P	JH
Morada Nova	H	BL	PT / P
Tauá	L	P	H
Iguatu	L	P	BC / R
Campos Sales	BL	R	JH
Barbalha	L	H	PT

Fonte: Autoria própria (2025).

O método de Hargreaves, embora simples e baseado unicamente na temperatura do ar, apresentou o quarto melhor desempenho considerando o valor das medianas para o coeficiente de confiança  $c$ . Isso se deve, principalmente, ao seu desempenho equilibrado no primeiro semestre do ano. Apesar disso, no segundo semestre apresentou forte tendência a subestimar os valores da  $ET_o$  na maioria dos municípios, piorando o seu desempenho geral. Hargreaves teve desempenho quase perfeito para os municípios de Guaramiranga e Barbalha, apresentando resultados consistentes ao longo de todo o ano.

Embora em termos gerais não figure entre o pódio dos melhores métodos

considerando, Priestley & Taylor apresentou a melhor adequação às condições de maior umidade relativa, mesmo em climas complexos como os de Fortaleza e Acaraú, que combinam alta umidade com temperaturas elevadas. Nos municípios mais úmidos, esse método obteve bons resultados ao longo de todo o ano. Já nos municípios mais secos, seu desempenho foi satisfatório apenas no primeiro semestre, enquanto no segundo semestre apresentou uma tendência à subestimação excessiva. Essa variação de desempenho pode estar relacionada ao regime de chuvas, pois o primeiro semestre é caracterizado por maiores precipitações, o que aumenta a umidade relativa e favorece a precisão das estimativas de evapotranspiração pelo método.

O método de Benavides & Lopez apresentou uma forte tendência a superestimação dos valores esperados para a evapotranspiração. Por depender exclusivamente da temperatura e umidade relativa média do ar, em regiões semiáridas, a combinação de altas temperaturas e baixa umidade relativa podem estar relacionadas com isso. Apesar disso, o método teve bons valores para o coeficiente de correlação  $r$ , indicando que ele é capaz de representar bem a influência das variações climáticas no processo de evapotranspiração ao longo do tempo. Isso contribuiu para melhores resultados considerando o índice de confiança  $c$ , favorecendo o seu desempenho geral.

O método de Jensen-Hayse, assim como Benavides & Lopez apresentou valores consistentemente elevados para o coeficiente de correlação  $r$  e uma forte tendência a superestimação dos valores de evapotranspiração se comparados com Penman-Monteith. Apesar de não refletir diretamente os efeitos da umidade relativa na sua formulação, ele depende unicamente da temperatura média do ar e radiação solar, que também são fatores preponderantes considerando o contexto cearense. Considerando o desempenho médio geral em função da mediana para o coeficiente  $c$ , Jensen-Hayse foi pior, demonstrando uma limitação em ambientes com variabilidade climática mais acentuada em municípios como Acaraú e Fortaleza. A combinação de altas umidade e temperatura, pode ter prejudicado a eficiência desse método.

O método da Radiação Solar embora tenha demonstrado uma forte tendência a superestimar os valores de evapotranspiração, especialmente no segundo semestre do ano, assim como Blaney-Criddle também apresentou uma baixa variabilidade para o coeficiente de confiança  $c$ . A umidade relativa mais alta no primeiro semestre do ano ameniza os efeitos da temperatura e vento no processo de evapotranspiração, tornando a radiação solar a principal condicionante dessa atividade, o que favorece o desempenho do método.

O método de Romanenko apresentou variações significativas de desempenho ao

longo do ano, refletindo a influência da sazonalidade climática. No primeiro semestre do ano, caracterizado por períodos chuvosos e maior umidade relativa, ele apresentou uma tendência à subestimação dos valores de referência para a evapotranspiração, enquanto no segundo semestre, marcado por clima seco, houve uma tendência à superestimação. Essas inconsistências indicam uma imprecisão do método na estimativa da magnitude dos valores esperados. No entanto, o método obteve bons valores para o coeficiente de correlação  $r$ , demonstrando uma boa capacidade de capturar a influência das variações climáticas no processo de evapotranspiração. Essa característica favoreceu seu desempenho geral, apesar das discrepâncias observadas.

## 5 CONCLUSÃO

Os valores de evapotranspiração de referência calculados apresentaram diferenças expressivas em relação aos estimados pelo método de Penman-Monteith. O uso dos mapas evidenciou essas discrepâncias e permitiram visualizar de forma clara as variações entre os modelos de previsão e os valores observados no Ceará.

A análise espacial proporcionada pelos mapas revelou uma tendência à superestimação dos valores da  $ET_o$ , especialmente entre os métodos que não consideram a umidade relativa na sua formulação. Esse efeito foi mais evidente no primeiro semestre do ano, período em que a umidade aumenta devido à estação chuvosa, mas não é devidamente incorporada por esses modelos. Além disso, os métodos baseados em fatores térmicos e radiação solar também apresentaram superestimação, uma vez que essas variáveis são predominantes no contexto climático do Ceará. Por outro lado, os métodos dependentes exclusivamente de fatores térmicos e/ou umidade relativa apresentaram tendências à subestimação dos valores da  $ET_o$ , principalmente no primeiro semestre do ano devido a temperaturas mais amenas e maior umidade relativa.

Nas análises comparativas, as métricas estatísticas sintetizaram numericamente o desempenho das metodologias empíricas como modelos de previsão. A partir desses resultados, foi possível determinar o desempenho dos métodos de duas formas: em termos gerais, identificando aqueles com melhor adaptabilidade ao conjunto de municípios cearenses, e de forma individualizada, considerando as particularidades climáticas de cada localidade.

Em termos gerais, considerando os resultados das métricas estatísticas para todos os municípios estudados, os métodos de Blaney-Criddle, Linacre e Penman tiveram os melhores resultados. O bom desempenho do método Blaney-Criddle pode ser atribuído à semelhança climática entre sua região de origem e a maioria das cidades analisadas neste estudo. Já o método de Linacre, apesar de não incluir a radiação solar em sua formulação, teve essa limitação compensada pela baixa umidade relativa dos municípios cearenses, o que garantiu estimativas equilibradas ao longo do ano, especialmente nas regiões mais secas. Por fim, o método de Penman, que é semelhante ao de Penman-Monteith, se diferencia por não considerar diretamente a umidade relativa em sua equação. No entanto, devido à predominância de baixa umidade relativa na maioria dos municípios analisados, ele ainda apresentou bons resultados.

De forma isolada, os resultados são distintos, o que reforça a ideia de conhecer bem as condições climáticas locais e a forma como cada metodologia considera a influência das variáveis climáticas no processo de evapotranspiração. Levando em conta de forma

simplificada o clima dos municípios cearenses, os melhores métodos para estimar a evapotranspiração foram o de Priestley & Taylor, que se adapta bem aos climas mais úmidos, e o de Linacre, que se destacou em áreas mais secas. Ambos mostraram boa precisão conforme as condições climáticas locais.

## REFERÊNCIAS

- AB'SÁBER, A. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidade paisagística**. 4. ed. São Paulo: Ateliê Editorial, 144 p., 2003. Disponível em: [https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7993715/mod\\_resource/content/1/AB%20SABER-Os%20dom%C3%ADnios%20de%20natureza.pdf](https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7993715/mod_resource/content/1/AB%20SABER-Os%20dom%C3%ADnios%20de%20natureza.pdf). Acesso em: 21 jan. 2025.
- ALENCAR, L. P. *et al.* **Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para três localidades no norte de Minas Gerais**. Revista Engenharia na Agricultura, v. 19, n. 5, p. 437-449, 28 out. 2011. <http://dx.doi.org/10.13083/reveng.v19i5.260>. Disponível em: <https://periodicos.ufv.br/reveng/article/view/233>. Acesso em: 09 jan. 2025.
- ALLEN, R. G. *et al.* **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 300 p. 300p. (FAO Irrigation and drainage paper, 56), 1998. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/235704197\\_Crop\\_evapotranspiration-Guidelines\\_for\\_computing\\_crop\\_water\\_requirements-FAO\\_Irrigation\\_and\\_drainage\\_paper\\_56](https://www.researchgate.net/publication/235704197_Crop_evapotranspiration-Guidelines_for_computing_crop_water_requirements-FAO_Irrigation_and_drainage_paper_56). Acesso em: 08 jan. 2025.
- ALMEIDA, B. M. *et al.* **Comparação de métodos de estimativa da ETo na escala mensal em Fortaleza-CE**. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, v. 4, n. 2, p. 93-98, 30 jun. 2010. INOVAGRI. <http://dx.doi.org/10.7127/rbai.v4n200610>. Disponível em: <https://www.inovagri.org.br/revista/index.php/rbai/article/view/39>. Acesso em: 06 jan. 2025
- CAMARGO, Â. P.; SENTELHAS, P. C. **Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil**. Santa Maria: Revista Brasileira de Agrometeorologia, v. 5, n. 1, p. 89-97, 13 maio 1997. Disponível em: [https://www.esalq.usp.br/departamentos/leb/agmfacil/artigos/artigos\\_sentelhas\\_1997/1997\\_R\\_BAgro\\_5\(1\)\\_89-97\\_ETPM%E9todosSP.pdf](https://www.esalq.usp.br/departamentos/leb/agmfacil/artigos/artigos_sentelhas_1997/1997_R_BAgro_5(1)_89-97_ETPM%E9todosSP.pdf). Acesso em: 25 jan. 2025.
- CAMARGO, Â. P.; CAMARGO, M. B. P. **Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial**. Campinas: Bragantia, v. 59, n. 2, p. 125-137, 2 jul. 2000. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0006-87052000000200002>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/brag/a/94MFPNhYKGRds4cMKFBBt/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 17 jan. 2025.
- COELHO FILHO, M. A. *et al.* “O processo de evapotranspiração”. In: SOUSA, V. F. *et al.* **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, Cap. 2, p. 93-113., 2011. Disponível em: [https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/915609/1/IRRIGACAOeFERTIRRI\\_GACAOcap2.pdf](https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/915609/1/IRRIGACAOeFERTIRRI_GACAOcap2.pdf). Acesso em: 16 dez. 2024.
- Companhia de desenvolvimento dos valores do São Francisco e do Parnaíba - CODEVASF. **Caderno de caracterização: Estado do Ceará**. Brasília, 146 p., 2022. Disponível em: <https://www.codevasf.gov.br/aceso-a-informacao/institucional/biblioteca-geral-rocha/publicacoes/outras-publicacoes/caderno-de-caracterizacao-estado-do-ceara.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2025.
- COHEN, J. **Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences**. 2. ed. New York: Lawrence Erlbaum Associates, 567 p., 1988. Disponível em: <https://www.utstat.toronto.edu/brunner/oldclass/378f16/readings/CohenPower.pdf>. Acesso em:

28 jan. 2025.

COUTINHO, E. R. *et al.* **Avaliação de Métodos de Estimativa da Evapotranspiração de Referência (ET<sub>o</sub>) Diária Para Regiões dos Estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo.** Revista Brasileira de Meteorologia, v. 35, n. 4, p. 649-657, dez. 2020. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863540069>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/CLFhtSbsKFdbBcTNKbbzDmH/?lang=pt>. Acesso em: 09 jan. 2025.

DEVORE, J. L. **Probabilidade e estatística: para engenharia e ciências.** 6. ed. São Paulo: Cengage Learning, 708 p., 2005. Disponível em: <https://wp.ufpel.edu.br/claude/files/2020/09/Probalidade-e-Estatistica-para-Engenharia-e-Ciencias-Devore.pdf>. Acesso em: 04 jan. 2025.

EMBRAPA. **Evapotranspiração: uma revisão sobre os métodos empíricos.** Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 44 p., 2010. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/879913/1/doc263.pdf>. Acesso em: 16 dez. 2024.

FERNANDES, L. C.; PAIVA, C. M.; ROTUNNO FILHO, O. C. **Evaluation of six empirical evapotranspiration equations - case study: campos dos goytacazes/rj.** São José dos Campos: Revista Brasileira de Meteorologia, v. 27, n. 3, p. 272-280, fev. 2012. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0102-77862012000300002>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/MTX9xkqg48Wgf7psZxw77qb/?lang=en>. Acesso em: 17 jan. 2025.

FIGUEIREDO FILHO, D. B.; SILVA JÚNIOR, J. A. **Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r).** Política Hoje, v. 18, n. 1, p. 115-146, dez. 2009. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/politica hoje/article/view/3852>. Acesso em: 27 jan. 2025.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. **Reference Crop Evapotranspiration from Temperature.** Applied Engineering In Agriculture, v. 1, n. 2, p. 96-99, 1985. American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE). <http://dx.doi.org/10.13031/2013.26773>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/247373660\\_Reference\\_Crop\\_Evapotranspiration\\_From\\_Temperature](https://www.researchgate.net/publication/247373660_Reference_Crop_Evapotranspiration_From_Temperature). Acesso em: 02 mar. 2025.

HARTMANN, D. L. "Atmospheric Radiative Transfer and Climate". *Global Physical Climatology*, Cap. 3, p. 49-94, 2016. Elsevier. <http://dx.doi.org/10.1016/b978-0-12-328531-7.00003-7>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780123285317000037>. Acesso em: 05 jan. 2025.

ISMAEL FILHO, A. *et al.* **Influência das variáveis climáticas sobre a evapotranspiração.** Gaia Scientia, v. 9, n. 1, p. 62-66, fev. 2015. Disponível em: <https://periodicos.ufpb.br/index.php/gaia/article/view/24072>. Acesso em: 13 jan. 2025.

JESUS JÚNIOR, L. A.; LIMA, J. R. F. **Avaliação da influência de variáveis climáticas sobre a evapotranspiração.** Fortaleza: Associação Brasileira de Estatística, p. 13-16, 2011. Disponível em:



<https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/896348/1/101203luciano.alvescpatsa.embrapa.brobra2.pdf>. Acesso em: 14 jan. 2025.

KONCAGÜL, E. *et al.* **Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2024**. Programa Mundial das Nações Unidas para Avaliação do Recurso Hídricos. Gabinete do Programa de Avaliação Global da Água. Divisão de Ciências Hídricas. 2024. Disponível em: [https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000388952\\_por](https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000388952_por). Acesso em: 24 jan. 2025.

MAIA NETO, R. F. **Água para o desenvolvimento sustentável**. Belo Horizonte: A Água em Revista, n.9, p.21-32, 1997. Disponível em: <https://docvirt.com/docreader.net/DocReader.aspx?bib=aguaterra&pagfis=1145>. Acesso em: 24 jan. 2025.

OLIVEIRA, U. C.; OLIVEIRA, P. S. **Mapas de Kernel como Subsídio à Gestão Ambiental: análise dos focos de calor na bacia hidrográfica do rio acaraú, ceará, nos anos 2010 a 2015**. Rio de Janeiro: Espaço Aberto, v. 7, n. 1, p. 87-99, 16 ago. 2017. Revista Espaço Aberto. <http://dx.doi.org/10.36403/espacoaberto.2017.3473>. Disponível em: <https://revistas.ufrj.br/index.php/EspacoAberto/article/view/3473>. Acesso em: 21 jan. 2025.

PAZ, V. P. S.; TEODORO, R. E. F.; MENDONÇA, F. C. **Recursos hídricos, agricultura irrigada e meio ambiente**. Campina Grande: Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 4, n. 3, p. 465-473, dez. 2000. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1415-43662000000300025>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/FWpZyjgrywVwnxN8v4rbq9c/>. Acesso em: 21 jan. 2025.

POSTEL, S. L.; DAILY, G. C.; EHRLICH, P. R. **Human Appropriation of Renewable Fresh Water. Science**. American Association for the Advancement of Science (AAAS), v. 271, n. 5250, p. 785-788, 9 fev. 1996. <http://dx.doi.org/10.1126/science.271.5250.785>. Disponível em: [https://web.mit.edu/12.000/www/m2012/postel\\_science.pdf](https://web.mit.edu/12.000/www/m2012/postel_science.pdf). Acesso em: 02 mar. 2025.

RIBEIRO, S. L. **Considerações iniciais sobre a segurança hídrica do Brasil**. Revista Brasileira de Estudos de Defesa, v. 4, n. 1, p. 155-180, 17 jan. 2018. Associação Brasileira de Estudos de Defesa - ABED. <http://dx.doi.org/10.26792/rbed.v4n1.2017.70306>. Disponível em: <https://rbed.abedef.org/rbed/article/view/70306>. Acesso em: 20 jan. 2025.

RODRIGUES, E. J. **Balanço hídrico climatológico e classificação climática do estado do Ceará**. 2024. 91 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Crateús, 2024. Disponível em: <https://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/78398>. Acesso em: 17 jan. 2025.

SALES, E. S. G. *et al.* **Classificação de áreas semiáridas e subúmidas secas utilizando diferentes índices climáticos**. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 14, n. 2, p. 479-491, 14 abr. 2021. Revista Brasileira de Geografia Física. <http://dx.doi.org/10.26848/rbgf.v14.2.p479-491>. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/article/view/246458>. Acesso em: 12 jan. 2025.

SILVA, M. G. *et al.* **Avaliação da evapotranspiração de referência por Penman-Monteith usando dados climáticos mínimos no sertão do Ceará**. Revista Agro@Mambiente On-Line, v. 7, n. 3, p. 284-293, 31 dez. 2013. Universidade Federal de Roraima.

<http://dx.doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v7i3.1245>. Disponível em: <https://revista.ufr.br/agroambiente/article/view/1245>. Acesso em: 09 jan. 2025.

SILVA, M. G. *et al.* **Estimativa da evapotranspiração de referência pela equação de Hargreaves-Samani no estado do Ceará, Brasil.** Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas, v. 9, n. 2, p. 132-141, 30 jun. 2015. Universidade Estadual Paulista - Campus de Tupa. <http://dx.doi.org/10.18011/bioeng2015v9n2p132-141>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/282054700\\_ESTIMATIVA\\_DA\\_EVAPOTRANSPIRACAO\\_DE\\_REFERENCIA\\_PELA\\_EQUACAO\\_DE\\_HARGREAVES-SAMANI\\_NO\\_ESTADO\\_DO\\_CEARA\\_BRASIL\\_REFERENCE\\_EVAPOTRANSPIRATION\\_ESTIMATED\\_BY\\_HARGREAVES-SAMANI\\_IN\\_THE\\_STATE\\_OF\\_CEARA\\_BRAZIL](https://www.researchgate.net/publication/282054700_ESTIMATIVA_DA_EVAPOTRANSPIRACAO_DE_REFERENCIA_PELA_EQUACAO_DE_HARGREAVES-SAMANI_NO_ESTADO_DO_CEARA_BRASIL_REFERENCE_EVAPOTRANSPIRATION_ESTIMATED_BY_HARGREAVES-SAMANI_IN_THE_STATE_OF_CEARA_BRAZIL). Acesso em: 10 jan. 2025.

SMITH, M. *et al.* **Report on the expert consultation on Revision of FAO methodologies for crop water requirements.** Rome: Fao, 68 p., 1990. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/f55759a3-043a-4b39-beb0-d26dae4b5e06/content>. Acesso em: 10 fev. 2025.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. **Determinação da evapotranspiração para fins de irrigação.** Goiânia: EMBRAPA-CNPAP, 49p., 1995. (EMBRAPA-CNPAP. Documentos, 55). Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/202731/1/doc55.pdf>. Acesso em: 21 jan. 2025.

TANNER, C. B.; PELTON, W. L. **Potential evapotranspiration estimates by the approximate energy balance method of Penman.** Journal Of Geophysical Research, v. 65, n. 10, p. 3391-3413, out. 1960. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/jz065i010p03391>. Disponível em: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/JZ065i010p03391>. Acesso em: 13 jan. 2025.

WILLMOTT, C. J. *et al.* **Statistics for the evaluation and comparison of models.** Journal Of Geophysical Research: Oceans, v. 90, n. 5, p. 8995-9005, 20 set. 1985. American Geophysical Union (AGU). <http://dx.doi.org/10.1029/jc090ic05p08995>. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/259475985\\_Statistics\\_for\\_the\\_Evaluation\\_and\\_Comparison\\_of\\_Models](https://www.researchgate.net/publication/259475985_Statistics_for_the_Evaluation_and_Comparison_of_Models). Acesso em: 10 jan. 2025.