

Análise interdecadal do desempenho de métodos de estimativa de evapotranspiração de referência em Bom Jesus/PI

Interdecadal analysis of the performance of reference evapotranspiration estimation methods in Bom Jesus/PI

Análisis interdecadal del desempeño de los métodos de estimación de evapotranspiración de referencia en Bom Jesus/PI

Recebido: 12/11/2022 | Revisado: 22/11/2022 | Aceitado: 23/11/2022 | Publicado: 30/11/2022

Angelo da Silva Gonçalves Júnior

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1907-5718>
Universidade Federal do Piauí, Brasil
E-mail: angelosgjunior@gmail.com

Gabriel Siqueira Tavares Fernandes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0781-1696>
Universidade Federal Rural da Amazônia, Brasil
E-mail: agrogabrielt@gmail.com

Edivania de Araujo Lima

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9634-9180>
Universidade Federal do Piauí, Brasil
E-mail: edivania@ufpi.edu.br

Araão de Moura Neto

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2867-4934>
Universidade Federal do Piauí, Brasil
E-mail: araoneto@ufpi.edu.br

Raiany de Oliveira Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8141-1025>
Universidade Federal do Piauí, Brasil
E-mail: raianyoliveira95@gmail.com

Laís Samara Rodrigues

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5100-5862>
Universidade Federal do Piauí, Brasil
E-mail: laissamara.lsr@gmail.com

Jéssica Rafaelly Almeida Lopes

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0732-8781>
Universidade Federal Rural do Pernambuco, Brasil
E-mail: jessicarafaellyalmeida@hotmail.com

Laila Lucia Souza e Silva

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6253-2203>
Universidade Federal do Piauí, Brasil
E-mail: agrolaila@gmail.com

Izabelle Maria Barboza de Azevedo

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5681-7456>
Universidade Federal do Piauí, Brasil
E-mail: Izabelleef@ufpi.edu.br

Resumo

A evapotranspiração de referência é uma importante variável cuja estimativa é de grande relevância para a gestão de recursos hídricos de forma sustentável. Objetivou-se avaliar o desempenho de diferentes métodos de estimativas da evapotranspiração de referência, na escala interdecadal, no município de Bom Jesus/PI. Os dados das variáveis meteorológicas foram obtidos através da plataforma NASA-POWER (1981 a 2020) e divididos em intervalo de décadas (I - 1981 a 1990; II - 1991 a 2000; III - 2001 a 2010 e IV - 2011 a 2020). Os métodos analisados foram Andrade Júnior, Benavides-Lopez, Camargo, Hamon, Hargreaves-Samani, Jensen-Haise e Linacre, que foram comparados ao método de Penman-Monteith FAO56, sendo este o método padrão. Realizou-se cálculos dos coeficientes de determinação e correlação, índices de concordância e de desempenho e erro padrão de estimativa. Observou-se que os métodos Camargo e Hamon foram classificados conforme o índice de desempenho como péssimo em todas as décadas analisadas. Os métodos de Linacre, Benavides-Lopez e Andrade Júnior variaram em sua classificação de desempenho de muito bom a ótimo. Sendo, o método de Linacre o que apresentou o melhor

desempenho independente da década análise, sendo, portanto, recomendado para a estimativa da evapotranspiração de referência no município de Bom Jesus, Piauí.

Palavras-chave: Elementos meteorológicos; Penman-monteith; Métodos indiretos.

Abstract

The reference evapotranspiration is an important variable whose estimation is of great relevance for the management of water resources in a sustainable way. The objective was to evaluate the performance of different methods of estimating reference evapotranspiration, on the interdecadal scale, in the municipality of Bom Jesus/PI. Data on meteorological variables were obtained through the NASA-POWER platform (1981 to 2020) and divided into decade intervals (I - 1981 to 1990; II - 1991 to 2000; III - 2001 to 2010 and IV - 2011 to 2020). The methods analyzed were Andrade Júnior, Benavides-Lopez, Camargo, Hamon, Hargreaves-Samani, Jensen-Haise and Linacre, which were compared to the Penman-Monteith FAO56 method, which is the standard method. Determination and correlation coefficients, agreement and performance indices and standard error of estimate were calculated. It was observed that the Camargo and Hamon methods were classified according to the performance index as very bad in all the analyzed decades. Linacre, Benavides-Lopez and Andrade Júnior's methods ranged in their performance rating from very good to excellent. The Linacre method was the one that presented the best independent performance of the analysis decade, being, therefore, recommended for estimating the reference evapotranspiration in the municipality of Bom Jesus, Piauí.

Keywords: Meteorological elements; Penman-monteith; Indirect methods.

Resumen

La evapotranspiración de referencia es una variable importante cuya estimación es de gran relevancia para la gestión de los recursos hídricos de forma sostenible. El objetivo fue evaluar el desempeño de diferentes métodos de estimación de la evapotranspiración de referencia, en escala interdecadal, en el municipio de Bom Jesus/PI. Los datos de las variables meteorológicas se obtuvieron a través de la plataforma NASA-POWER (1981 a 2020) y se dividieron en intervalos de décadas (I - 1981 a 1990; II - 1991 a 2000; III - 2001 a 2010 y IV - 2011 a 2020). Los métodos analizados fueron Andrade Júnior, Benavides-López, Camargo, Hamon, Hargreaves-Samani, Jensen-Haise y Linacre, los cuales fueron comparados con el método Penman-Monteith FAO56, que es el método estándar. Se calcularon los coeficientes de determinación y correlación, los índices de concordancia y rendimiento y el error estándar de estimación. Se observó que los métodos Camargo y Hamon fueron clasificados según el índice de desempeño como muy malos en todas las décadas analizadas. Los métodos de Linacre, Benavides-López y Andrade Júnior variaron en su calificación de desempeño de muy bueno a excelente. El método de Linacre fue el que presentó el mejor desempeño independiente de la década de análisis, siendo, por tanto, recomendado para estimar la evapotranspiración de referencia en el municipio de Bom Jesus, Piauí.

Palabras clave: Elementos meteorológicos; Penman-monteith; Métodos indirectos.

1. Introdução

No sistema solo-planta-atmosfera, o adequado fornecimento de água durante o ciclo das culturas é um dos fatores que afetam em seu desenvolvimento (Chagas et al., 2013). Na agricultura, o aumento da eficiência na utilização da água é uma estratégia importante a fim de atenuar a escassez hídrica e diminuição dos problemas relacionado as questões ambientais. (Miranda et al., 2019).

O uso racional dos recursos hídricos é um aspecto muito relevante, em que é muito importante adotar medidas como a conscientização da população referente a essa temática (Coutinho et al., 2020). É fundamental a realização de estudos em diferentes regiões, buscando obter maiores conhecimentos com o intuito de aplicar com maior racionalidade as informações relacionadas a otimização da gestão dos recursos hídricos (Lima et al., 2019).

A estimativa da evapotranspiração de referência é um aspecto relevante que contribui para que se tenha um melhor aproveitamento do uso de forma racional dos recursos hídricos. Há vários métodos que são utilizados para se estimar esta variável, sendo alguns bem aceitos em certas regiões em razão da boa representatividade dos resultados na localidade, todavia, há outros métodos que não tem boa aceitação, devido não apresentarem de forma satisfatória os valores de evapotranspiração.

Dentre os diversos métodos existentes para a estimativa da ETo, cita-se o método de Penman-Monteith, parametrizado pela Food and Agriculture Organization (FAO), no Boletim nº 56 (Allen et al., 1998), considerado como sendo o método padrão da FAO (Dantas et al. 2016).

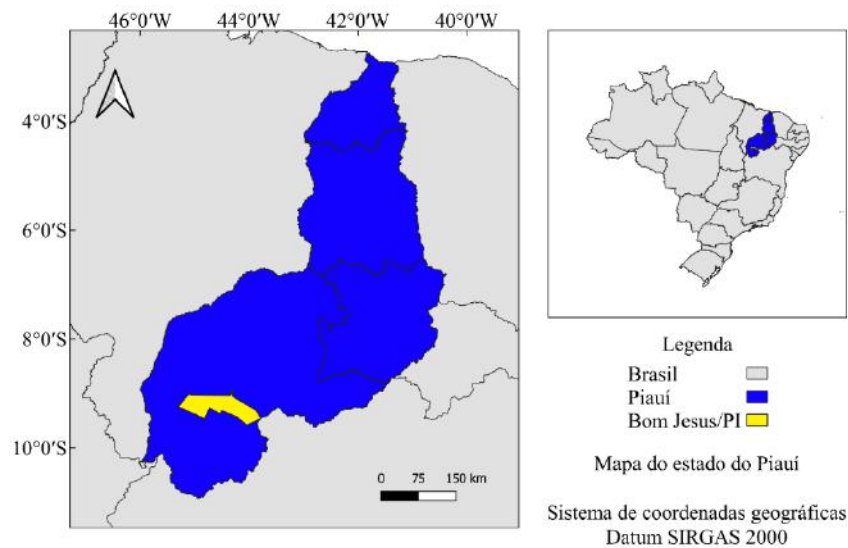
No momento de se escolher um método de estimativa de ETo, deve-se levar em consideração alguns aspectos importantes: como o período de tempo pretendido e os dados das variáveis meteorológicas disponíveis (Andrade Júnior et al., 2003). O método padrão tem-se seu uso limitado em consequência da presença de muitas variáveis meteorológicas, que nem sempre são fáceis de obtê-las, trazendo dificuldades aos produtores, que podem optar por utilizar outros métodos mais fáceis, que não necessitam de muitas variáveis (Santos et al., 2017).

Diante do exposto, a realização do presente estudo teve por objetivo, avaliar o desempenho de métodos de estimativas da evapotranspiração de referência, na escala interdecadal, no município de Bom Jesus/PI.

2. Metodologia

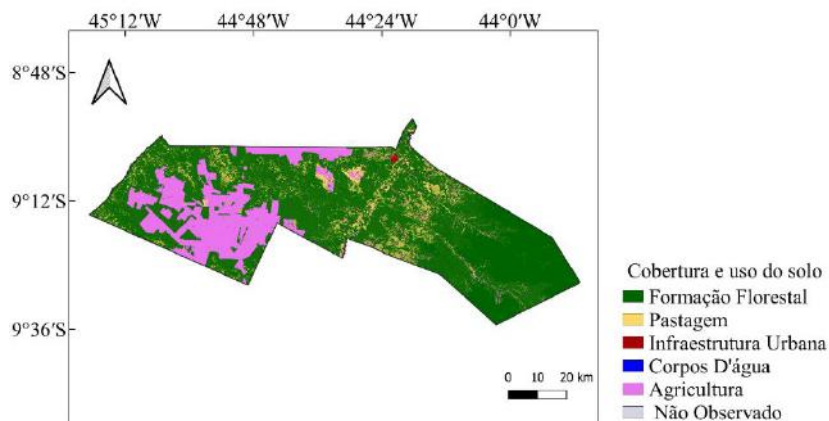
A área selecionada para este estudo foi a cidade de Bom Jesus, localizada na mesorregião sudoeste piauiense, com população estimada para o ano de 2021 de 25.584 pessoas (IBGE, 2021). Está situada nas coordenadas geográficas 9°04'28''S; 44°21'31''W, 277 m (Figura 1). Segundo a classificação climática de Thornthwaite, Bom Jesus é classificada como Semiárido, Megatérmico com excesso de água pequeno ou nulo (DdA'). O município apresenta uma temperatura média de 27,7 °C e precipitação acumulada média de 986,7 mm ano⁻¹ (Fernandes et al., 2020). A cobertura e uso do solo predominante no território desse município é formação florestal, pastagem, agricultura e infraestrutura urbana (Figura 2).

Figura 1 - Localização do município de Bom Jesus/PI.



Fonte: Autores (2021).

Figura 2 - Mapa de cobertura e uso do solo na cidade de Bom Jesus/PI, no ano de 2019.



Fonte: MAPBIOMAS (2021).

Os dados meteorológicos utilizados foram obtidos no site NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources (POWER), <<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>> (Nasa Power, 2021). Utilizou-se as seguintes variáveis: temperatura do ar (máxima, mínima e média), umidade relativa e velocidade do vento (a 2 metros). Todos os dados foram selecionados na escala diária, para o período compreendido entre os anos de 1981 a 2020. Estes foram separados em intervalos de 10 anos, totalizando quatro décadas (Tabela 1), para que se pudesse analisar a variação interdecadal dos mesmos.

Tabela 1 - Indicação das décadas utilizadas nos dados.

DÉCADAS	PERÍODO
I	1981 a 1990
II	1991 a 2000
III	2001 a 2010
IV	2011 a 2020

Fonte: Autores (2021).

Inicialmente foram calculados os valores diários da Evapotranspiração de Referência (ET_o), para diferentes metodologias, seguindo-se do cálculo da média diária para cada década.

Para as estimativas da ET_o, utilizou-se as seguintes metodologias:

Método de Andrade Júnior

O método de Andrade Júnior (2003) foi gerado a partir de análise de regressão linear múltipla, sendo expresso na equação (1).

$$ET_o = 0,0467 T + 1,744 UR + 1,716 \Delta s \quad (1)$$

Onde:

ET_o = evapotranspiração de referência (mm dia⁻¹);

T = temperatura média do ar (°C);

UR = umidade relativa do ar (decimal);

Δs = déficit de saturação de vapor de água ($e_s - e_a$) (kPa).

Método de Benavides-Lopez

Benavides e Lopez (1970) desenvolveram um método que se utiliza poucas variáveis, sendo a umidade relativa e a temperatura média do ar. Ela é apresentada na equação (2).

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

Onde:

T_{med} = temperatura média do ar (°C);

UR = umidade relativa do ar (%).

Método de Camargo

Camargo (1971) propôs um método em que seus resultados apresentam eficiência semelhante a metodologia de Thornthwaite. Para estimá-la, necessita-se das informações de radiação solar global extraterrestre, temperatura média diária, número de dias e um fator de ajuste (Camargo; Camargo, 2000). Ela é dada pela equação (3).

$$ET_o = K * Q_o * T_{med} * ND \quad (3)$$

Onde:

Q_o = radiação solar extraterrestre, expressa em mm de evaporação equivalente por dia;

T_{med} = temperatura média do ar (°C);

ND = Número de dias do período considerado;

T_a = temperatura média anual;

K = fator de ajuste, que varia conforme a temperatura média anual: 0,01 ($T_a < 23,5$ °C); 0,0105 ($23,6 < T_a < 24,5$ °C); 0,011 ($24,6 < T_a < 25,5$ °C); 0,0115 ($25,6 < T_a < 26,5$ °C); 0,012 ($26,6$ °C $< T_a < 27,5$); 0,013 ($T_a > 27,5$ °C) (CAMARGO; CAMARGO, 2000).

Método de Hamon

O método desenvolvido por Hamon (1961) utiliza dados de temperatura média do ar, e também inclui a insolação, introduzindo a duração do dia, baseado na latitude, sendo apresentado conforme a equação (4).

$$ET_o = 0,55 \left(\frac{N}{12}\right)^2 \left(\frac{4,95 \exp^{0,062T}}{100}\right) 25,4 \quad (4)$$

Onde:

N = fotoperíodo (horas);

T = temperatura média do ar (°C).

Método de Hargreaves-Samani

A metodologia de Hargreaves e Samani (1985) foi desenvolvido nas condições semiáridas na Califórnia, em Davis, sendo a partir da evapotranspiração obtida em lisímetros de pesagem. Ela é expressa conforme a equação (5).

$$ETC = 0,0023 \cdot Q_o \cdot (T_{máx} - T_{mín})^{0,5} \cdot (T_{med} + 17,8) \quad (5)$$

Onde:

Q_o = radiação solar extraterrestre, expressa em mm de evaporação equivalente por dia;

T_{máx} = temperatura máxima do ar (°C);

T_{mín} = temperatura mínima do ar (°C);

T_{méd} = temperatura média do ar (°C).

Método de Jensen-Haise

O método de Jensen e Haise (1963) utiliza-se como variáveis a temperatura média do ar e a radiação solar global. Ele foi desenvolvido em regiões áridas e semiáridas. Ele é apresentado conforme a equação (6).

$$ET_o = (0,0252T + 0,078) R_s \quad (6)$$

Onde:

T = temperatura média diária (°C);

R_s = radiação solar global convertida em unidades de água evaporada (mm).

Método de Linacre

No método de Linacre (1977), considerando um albedo de 0,25 é apresentada a Equação 7.

$$ET_o = \frac{\frac{500 (t + 0,006z)}{(100 - \varphi)} + 15(t - t_d)}{80 - t} \quad (7)$$

Em que:

z = altitude do local (metros);

t = temperatura média do ar (°C);

t_d = temperatura do ponto de orvalho (°C);

φ = latitude do local em módulo (graus).

Método de Penman-Monteith

A metodologia de Penman-Monteith, descrito em Allen et al. (1998) é recomendado como o método padrão para o cálculo da ET_o, sendo dada pela equação (8).

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{(T + 273)} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad (8)$$

Onde:

R_n = o saldo radiação a superfície (MJ m⁻² d⁻¹);

G = densidade de fluxo de calor do solo (MJ m⁻² d⁻¹).

T = temperatura média do ar em 2 m de altura (°C);

γ = constante psicrométrica kPa °C⁻¹;

U₂ = velocidade do vento a 2 m de altura (m s⁻¹);

e_s = pressão de saturação de vapor (kPa);

e_a = pressão atual de vapor (kPa);

Δ = declividade da curva de pressão de saturação, em kPa °C⁻¹.

Para a avaliação do desempenho dos métodos testados, foi determinado o coeficiente de determinação (R^2), coeficiente de correlação de Pearson (r), o índice de concordância (d), o índice de confiança ou de desempenho (c) e o erro padrão de estimativa (EPE).

Utilizou-se o coeficiente de determinação (R^2) da regressão linear relacionado aos valores da ETo obtida pelos métodos testados e pelo método Penman-Monteith FAO56, com o intuito de avaliar a precisão dos modelos. O coeficiente de correlação de Pearson (r) foi obtido através da raiz do coeficiente de determinação.

O índice de concordância (d) de Willmott et al. (1985) foi utilizado para avaliar a exatidão das estimativas. Ela quantifica a dispersão dos dados dos métodos propostos comparado ao de Penman-Monteith FAO56. Ele é obtido pela equação (9).

$$d = 1 - \left[\frac{\sum (P_i - O_i)^2}{\sum (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \right] \quad (9)$$

Onde:

P_i = são os valores estimados (pelos métodos propostos);

O_i = são os valores obtidos pelo método padrão (Penman-Monteith FAO56);

O = média dos valores obtidos pelo método padrão.

O índice de desempenho (c), proposto por Camargo e Sentelhas (1997), foi utilizado para se analisar o desempenho dos métodos propostos. Ele é calculado pela multiplicação entre o índice de exatidão (d) e do índice de correlação de Pearson (r), sendo expresso pela equação (10):

$$c = d * r \quad (10)$$

Após a obtenção dos valores referentes ao índice de desempenho, eles foram classificados, conforme apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Critério de interpretação do índice de desempenho “c”, segundo Camargo e Sentelhas (1997).

Índice de desempenho (c)	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito Bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Sofrível
0,41 a 0,50	Mau
< 0,40	Péssimo

Fonte: Camargo e Sentelhas (1997).

O erro padrão de estimativa (EPE) foi utilizado para a quantificação dos erros proporcionados pelas estimativas, sendo apresentado na equação (11):

$$EPE = \sqrt{\frac{\sum(O_i - P_i)^2}{n - 1}} \quad (11)$$

Onde:

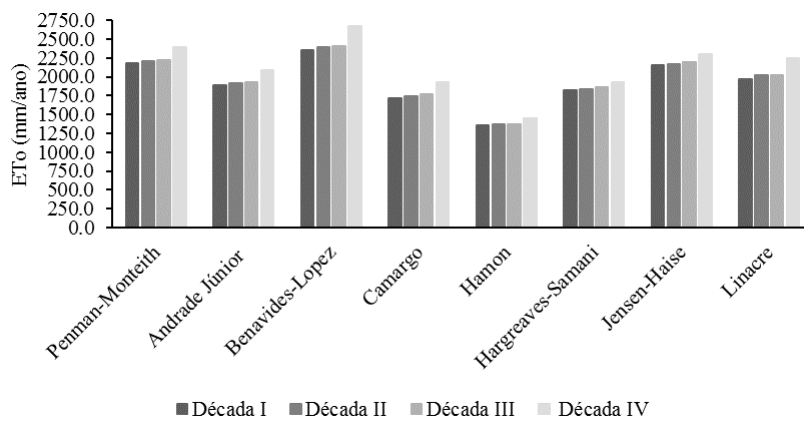
EPE = erro padrão de estimativa (mm dia⁻¹);

n = número de observações.

3. Resultados e Discussão

Nas estimativas da ETo, verifica-se que com o decorrer das décadas todos os métodos analisados apresentaram um aumento gradativo nos valores estimados, independente da metodologia utilizada (Figura 3).

Figura 3 - Acúmulo anual médio de evapotranspiração em diferentes métodos de estimativa.



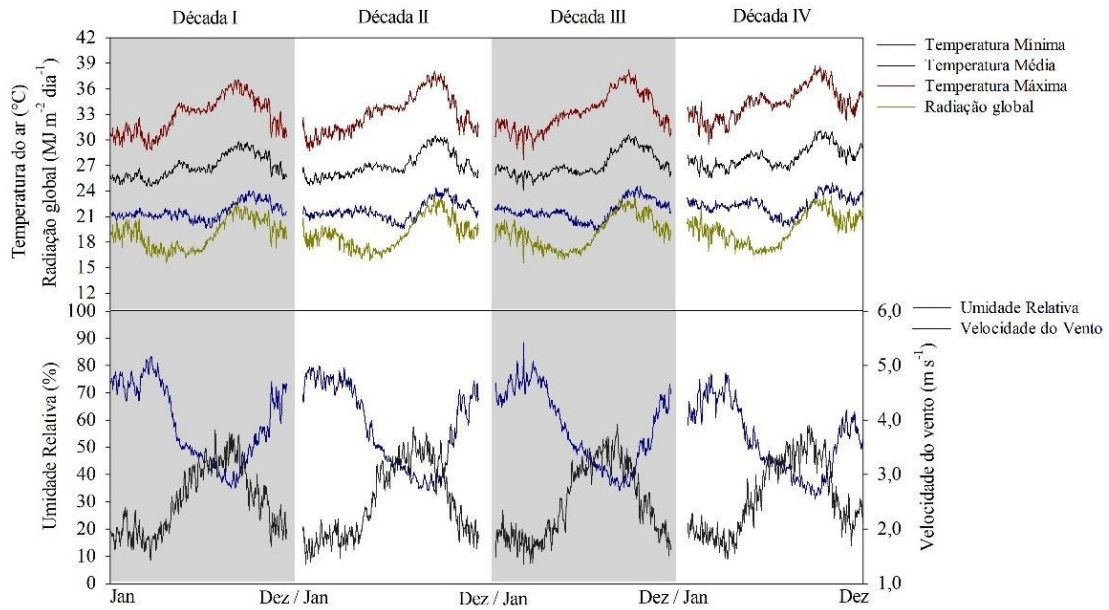
Fonte: Autores (2021).

Verifica-se que no método de Penman-Monteith FAO56 os valores das estimativas de ETo foram crescentes no decorrer de cada década, sendo de 2177,02 mm, 2212,07 mm, 2216,97 mm e 2388,86 mm na Década I, Década II, Década III e Década IV respectivamente. Esse mesmo padrão também foi observado em todos os métodos analisados (Figura 3).

Conforme Rocha Junior et al. (2020), analisando a evapotranspiração no Nordeste Brasileiro, verificaram que no estado do Piauí, na tendência anual da evapotranspiração diária, apresentaram tendências positivas.

Esse padrão de crescimento dos valores estimados de ETo relaciona-se justamente com o comportamento interdecadal dos elementos climáticos, em que se verifica-se na Tabela 3, um aumento nos valores de temperatura do ar, radiação global e uma diminuição da umidade relativa. De acordo com Costa et al. (2020) as tendências de mudanças climáticas apontam para tendências crescentes da temperatura máxima do ar durante o primeiro semestre de maneira mais significativa, com tendência a redução em grandes áreas do setor norte da região Nordeste em meses do segundo semestre.

Figura 4 - Variação diária dos elementos meteorológicos em quatro décadas, na região de Bom Jesus/PI.



Fonte: Autores (2021).

Tabela 3 - Média e desvio padrão de temperatura do ar (média, máxima e mínima), radiação global, velocidade do vento e umidade relativa, em quatro décadas.

Elementos Climáticos	Década I (1981 a 1990)	Década II (1991 a 2000)	Década III (2001 a 2010)	Década IV (2011 a 2020)
Temperatura média	26,84 ± 1,37	27,02 ± 1,44	27,11 ± 1,44	28,01 ± 1,27
Temperatura máxima	32,9 ± 2,14	33,12 ± 2,26	33,26 ± 2,19	34,37 ± 1,87
Temperatura mínima	21,6 ± 0,97	21,72 ± 1,04	21,7 ± 1,18	22,39 ± 1,10
Radiação Global	18,94 ± 1,73	19,02 ± 1,81	19,16 ± 1,90	19,54 ± 1,82
Velocidade do vento	2,51 ± 0,60	2,49 ± 0,68	2,46 ± 0,67	2,58 ± 0,66
Umidade Relativa	58,38 ± 14,20	57,27 ± 14,89	57,16 ± 13,72	52,61 ± 12,46

Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Na Figura 4 é observado a variação diária dos elementos climáticos em quatro décadas, na qual verifica-se que a temperatura do ar (média, máxima e mínima), radiação global, velocidade do vento e umidade relativa apresentaram um padrão de variação semelhante no decorrer do ano em todas as décadas. Os máximos de radiação global coincidem com os máximos de temperatura do ar. A temperatura do ar teve um comportamento inversamente proporcional a umidade. Esse comportamento é semelhante ao observado por Moura Neto et al. (2021), na mesma região, em que verificaram a coincidência entre os maiores valores de radiação e temperatura do ar, e também o comportamento inverso entre a umidade relativa e temperatura.

Na Figura 5, tem-se o comportamento diário durante o ano de metodologias de estimativa de ETo, comparadas ao método de Penman-Monteith FAO56 nas quatro décadas. Observa-se que os maiores valores de ETo ocorrem nos meses de setembro a outubro, em que se relaciona aos períodos de maiores temperaturas e menor umidade relativa, e já os menores valores ocorrem nos meses de janeiro a abril, coincidindo aos períodos de menores temperaturas e maior umidade relativa (Figura 4).

Oliveira (2017) verificou em um ano chuvoso na cidade de Mossoró/RN, que os valores mais elevados de ETo, ocorreram entre agosto e dezembro, e coincidiram com a época que tinha temperatura mais alta e menores valores de umidade

do ar. Moura Neto et al. (2021), para a região de Bom Jesus/PI, identificaram que os maiores valores de evapotranspiração de referência para essa região ocorrem nos meses de setembro e outubro, e os menores entre janeiro a abril, sendo a temperatura máxima do ar e a umidade os elementos meteorológicos que possui maior impacto nessa variável.

Silva et al. (2018), verificaram uma relação entre evapotranspiração e temperatura do ar, em 3 mesorregiões no estado de Alagoas, em que nos meses junho e julho ocorreram os menores valores dessa variável, que se coincidem com os menores valores de temperatura do ar e radiação solar, e maiores valores de umidade relativa.

Na Tabela 3 é evidenciado os valores médios dos elementos meteorológicos no período das quatro décadas, em que se observa que os valores da temperatura média do ar, temperatura máxima e radiação global, aumentaram no decorrer das décadas. Já na umidade relativa, os valores foram decrescentes. Com relação a velocidade do vento observou-se valores decrescentes da década I até a década III, apresentando o maior valor na década IV. A temperatura mínima teve crescente durante a década I até a década II, tendo uma leve redução na década III e os máximos valores foram registrados durante a década IV.

Em síntese, verifica-se que os menores valores da temperatura média do ar, temperatura máxima, temperatura mínima e radiação global foram observados na década I, enquanto que a umidade relativa apresentou maiores valores (Tabela 3), resultando nos menores valores de ETo, obtidos em todos os métodos testados na década I (Figura 3).

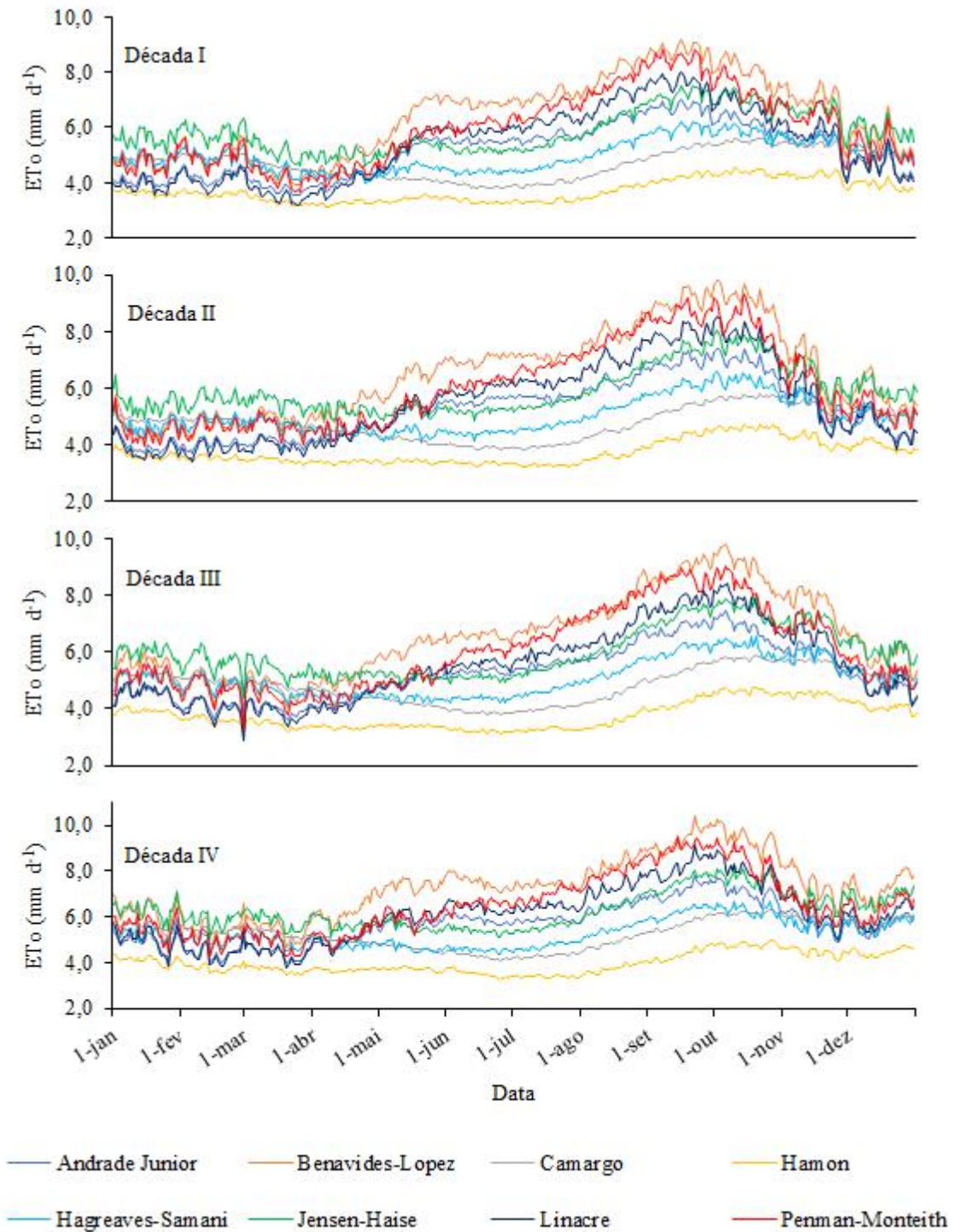
Com relação a década IV, a temperatura média do ar, a máxima e mínima, radiação global e velocidade do vento apresentaram maiores valores, entretanto observou-se menores valores para a umidade relativa (Tabela 3), em que tem como consequência maiores valores de ETo em todos os métodos testados nessa década (Figura 3).

Segundo Carvalho et al. (2020), ao se analisar a região nordeste do Brasil as tendências da temperatura, precipitação pluvial e seus números de dias, observaram uma tendência de aumento na temperatura em um futuro próximo, com exceção a Maceió/AL. Além disso, verificaram uma diminuição na precipitação e nos dias com a presença de chuva predominante tanto no sertão quanto na faixa de 150 a 300 km do litoral, verificando também, na região litorânea diminuição dos números de dias de precipitação.

Fernandes et al. (2020), avaliando a identificação mudanças na classificação climática e aptidão agroclimática na cidade de Bom Jesus/PI, observaram um aumento na temperatura média anual de 1,5°C e um aumento no acúmulo anual de evapotranspiração de 350,7 mm. Em relação à precipitação, houve uma diminuição de 106,7 mm, entre os dois cenários avaliados. Além disso, os autores identificaram uma expansão da estação seca e presença de deficiência hídrica na maior parte do ano.

Referente aos métodos de estimativa de ETo, ao compará-los observa-se um padrão em todas as décadas. Em geral, evidenciou-se uma subestimação nos valores de ETo dos métodos propostos em relação ao método de Penman-Monteith FAO56, exceto o método de Jensen-Haise e o método de Benavides-Lopez, que superestimam em períodos do ano nas décadas I, II, III e IV (Figura 5).

Figura 5 - Evapotranspiração de referência (ET_o) dos métodos de estimativa nas 4 décadas.



Fonte: Autores (2021).

O método de Linacre apresentou um comportamento semelhante ao método Penman-Monteith FAO56, sendo isso constatado nas quatro décadas. Esse comportamento também é observado no método de Andrade Júnior, e no método de Benavides-Lopez, apesar deste último superestimar os valores do método padrão (Figura 5).

O método de Benavides-Lopez superestimou os valores referente ao método de Penman-Monteith FAO56, no qual nas décadas I, II e III superestimaram na maior parte do ano, e na década IV praticamente durante todo o ano (Figura 5).

O método de Jensen-Haise, superestimou entre novembro e maio nas décadas I, II e III, e já na década IV, superestimou apenas entre novembro e abril (Figura 5). O método de Hamon não seguiu nenhum padrão, estando a maioria de seus valores mais afastados. Freitas (2019) obteve que o método de Jensen-Haise superestimou o método padrão, enquanto que o método de Hamon subestimou os valores em praticamente todos os meses do ano, em trabalho desenvolvido em Mossoró/RN.

A metodologia de Hargreaves-Samani subestimou os valores entre abril a novembro nas décadas I, II e III, e entre maio a dezembro na década IV. Já o de Camargo não seguiu nenhum padrão de comportamento, e subestima os valores do método padrão entre o mês de abril até o mês de novembro, estando evidente em todas as quatro décadas (Figura 5).

Dantas et al. (2016) observaram que os valores médios anuais de ETo do método de Jensen-Haise superestimaram o método padrão nas mesorregiões Litoral Paraibano, Borborema e Sertão Paraibano, no estado da Paraíba. Já os métodos de Hargreaves-Samani e Camargo subestimaram os valores do método FAO Penman-Monteith nas quatro mesorregiões, sendo Litoral Paraibano, Agreste Paraibano, Borborema e Sertão Paraibano. Borges Junior et al. (2012), verificaram que o método de Camargo também subestimou os valores, em Garanhuns/PE.

Na Tabela 4, evidencia-se os indicadores de desempenho para todos os métodos propostos no município de Bom Jesus/PI.

Tabela 4 - Coeficientes de determinação (R^2) e correlação de Pearson (r), índice de concordância (d) e desempenho (c), e erro padrão de estimativa (EPE) para valores médios diários de ETo em cada década, em cada método proposto comparados com o método de Penman-Monteith para Bom Jesus/PI.

Método	Coeficiente		Índice		Desempenho	Erro EPE
	R^2	r	d	c		
Década I						
Andrade Júnior	0,96	0,98	0,86	0,84	Muito Bom	0,93
Benavides-Lopez	0,95	0,98	0,96	0,94	Ótimo	0,57
Camargo	0,06	0,24	0,47	0,12	Péssimo	1,82
Hamon	0,36	0,60	0,47	0,28	Péssimo	2,54
Hargreaves-Samani	0,56	0,75	0,63	0,47	Mau	1,38
Jensen-Haise	0,60	0,78	0,81	0,63	Mediano	0,89
Linacre	0,96	0,98	0,95	0,93	Ótimo	0,63
Década II						
Andrade Júnior	0,95	0,98	0,87	0,85	Muito Bom	0,97
Benavides-Lopez	0,95	0,97	0,96	0,93	Ótimo	0,62
Camargo	0,07	0,25	0,47	0,12	Péssimo	1,94
Hamon	0,35	0,59	0,48	0,28	Péssimo	2,65
Hargreaves-Samani	0,60	0,78	0,63	0,49	Mau	1,49
Jensen-Haise	0,63	0,80	0,81	0,65	Mediano	0,98
Linacre	0,96	0,98	0,96	0,94	Ótimo	0,60
Década III						
Andrade Júnior	0,95	0,97	0,86	0,84	Muito Bom	0,96
Benavides-Lopez	0,93	0,97	0,95	0,92	Ótimo	0,65
Camargo	0,08	0,29	0,48	0,14	Péssimo	1,84
Hamon	0,29	0,54	0,47	0,26	Péssimo	2,61
Hargreaves-Samani	0,61	0,78	0,65	0,51	Sofrível	1,41

Jensen-Haise	0,62	0,79	0,83	0,65	Mediano	0,92
Linacre	0,96	0,98	0,95	0,93	Ótimo	0,60
Década IV						
Andrade Júnior	0,92	0,96	0,83	0,80	Muito Bom	0,99
Benavides-Lopez	0,90	0,95	0,90	0,85	Muito Bom	0,88
Camargo	0,04	0,20	0,44	0,09	Péssimo	1,86
Hamon	0,21	0,46	0,43	0,20	Péssimo	2,83
Hargreaves-Samani	0,49	0,70	0,57	0,40	Péssimo	1,62
Jensen-Haise	0,51	0,71	0,77	0,55	Sofrível	0,98
Linacre	0,93	0,97	0,96	0,92	Ótimo	0,54

Fonte: Dados da pesquisa (2021).

Na Tabela 4, referente as quatro décadas, os métodos de Linacre, Andrade Júnior e Benavides-Lopez tiveram os maiores valores do coeficiente de determinação (R^2), mostrando que se ajustaram bem ao modelo linear. Eles também apresentaram maiores valores do coeficiente correlação de Pearson, e dos índices de concordância e desempenho. Entretanto, os métodos de Camargo e Hamon apresentaram menores valores para todos esses coeficientes e índices.

Em todas as décadas analisadas, verifica-se que os de métodos de Andrade Júnior, Camargo, Hamon e Linacre não alteraram seus desempenhos de acordo com o índice de desempenho “c” proposto por Camargo e Sentelhas (1997) (Tabela 2), estando classificados em muito bom, péssimo, péssimo e muito bom respectivamente (Tabela 4).

O método de Benavides-Lopez decaiu um pouco em seu desempenho apenas na década IV, passando de ótimo para muito bom. Essa mesma situação verifica-se no método de Jensen-Haise, que teve uma mudança em seu desempenho passando de mediano para sofrível. O método de Hargreaves-Samani, veio se alterando, estando classificado como péssimo na década IV (Tabela 4).

Observa-se que o método de Linacre foi o que apresentou um melhor desempenho em todas as décadas analisadas, estando classificado com um desempenho ótimo de acordo com o índice “c”. Os bons valores no coeficiente de determinação enfatizam que os dados se ajustaram bem ao modelo linear. Além disso, apresentou ótimos valores referentes ao coeficiente de correlação, índice de concordância e o menor erro padrão de estimativa quando comparado aos outros métodos testados, exceto na década I, em que o método Benavidez-Lopez apresenta menor erro padrão (Tabela 4).

Observa-se que o método de Benavides-Lopez também teve destaque positivo, apesar de sua classificação de desempenho decair um pouco na última década, passando de ótimo para muito bom (Tabela 4).

Referente as metodologias de Linacre e Benavidez-Lopez, Freitas (2019) obteve um desempenho bom e muito bom, respectivamente, em estudo realizado na cidade de Mossoró/RN.

O método de Andrade Júnior teve uma classificação de desempenho muito bom em todas as décadas analisadas (Tabela 4). Esse bom desempenho pode ser explicado devido o desenvolvimento e calibração do método para os municípios de Parnaíba e Teresina/PI, os quais possuem clima semelhante ao de Bom Jesus (Andrade Júnior et al., 2003). Mota et al. (2020) encontraram para esse método uma classificação de desempenho ótima, sendo uma alternativa para estimativa de ETo para a região de Teresina/PI.

Os métodos de Camargo e o de Hamon apresentaram os piores desempenhos, segundo o índice de desempenho (c), tendo um desempenho péssimo em todas as quatro décadas. Os métodos de Hargreaves-Samani e Jensen-Haise também não apresentaram bons resultados, no qual oscilaram em suas classificações de desempenho com o passar das décadas (Tabela 4).

Em estudo realizado em Teresina/PI, Mota et al. (2020) obtiveram os piores desempenhos para os métodos de Hargreaves-Samani e Camargo, sendo, em sequência, classificados em mau e péssimo. Avaliando métodos de

evapotranspiração em Petrolina/PE, Santos et al. (2017), verificaram um desempenho bom para o método de Jensen-Haise, sofrível para a de Hargreaves-Samani e péssimo para a de Hamon.

4. Conclusões

Os elementos meteorológicos apresentaram o mesmo padrão de variação sazonal no decorrer das décadas. Além disso, em todo período analisado, observou-se uma tendência para o aumento da temperatura do ar (média, máxima e mínima) e radiação global, e uma redução da umidade relativa.

Os métodos de Andrade Júnior, Camargo, Hamon e Linacre não alteraram sua classificação de desempenho nas quatro décadas analisadas.

No geral, os métodos de Linacre, Benavides-Lopez e Andrade Júnior apresentaram-se como os melhores métodos, tendo a classificação de desempenho variando de muito bom para ótimo.

Recomenda-se o método de Linacre como sendo o mais adequado para a estimativa da evapotranspiração de referência no município de Bom Jesus/PI, por seu melhor desempenho em comparação aos demais métodos.

Sugerimos a realização de estudos nesta temática em outros municípios e regiões do estado do Piauí, considerando as respectivas características das condições climáticas locais.

Referências

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements*. Rome: FAO.
- Andrade Júnior, A.S., Bastos, E.A., Sentelhas, P.C. & Silva, A.A.G. (2003). Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para Parnaíba e Teresina, Piauí. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, 11(1), 63–68.
- Benavides, J.G. & Lopez, D. J. (1970). Formula para el calculo de la evapotranspiracion potencial adaptada al tropico (15o N - 15o S). *Agronomia tropical*, Maracay, 335–345.
- Borges Júnior, J.C.F., Anjos, R.J., Silva, T.J.A., Lima, J.R.S. & Andrade, C.L.T. (2012). Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária para a microrregião de Garanhuns, PE. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 16(4), 380–390.
- Camargo, A.P. (1971). *Balanço hídrico no Estado de São Paulo*. 3. ed. Campinas: Instituto Agronômico.
- Camargo, Â.P. & Camargo, M.B.P. (2000). Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. *Bragantia*, Campinas, 59(2), 125–137.
- Camargo, A.P. & Sentelhas, P.C. (1997). Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, 5(1), 89–97.
- Carvalho, A.A., Montenegro, A.A. A., Silva, H.P., Lopes, I., Morais, J.E.F. & Silva, T.G.F. (2020). Trends of rainfall and temperature in Northeast Brazil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 24(1), 15–23.
- Chagas, R.M., Faccioli, G.G., Aguiar Netto, A.O.; Sousa, I.F., Vasco, A.N. & Silva, M.G. (2013). Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ETO) no município de Rio Real-BA. *Irriga*, 18(1), 351-363.
- Costa, R. L., Gomes, H.B., Silva, F.D.S., Baptista, G.M.M., Rocha Júnior, R.L., Herdies, D.L. & Silva, V.P.R. (2020). Cenários de mudanças climáticas para a região Nordeste do Brasil por meio da técnica de Downscaling Estatístico. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 35, 785–801.
- Coutinho, E.R., Madeira, J.G.F., Silva, R.M., Oliveira, E.M. & Delgado, A.R.S. (2020). Avaliação de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) diária para regiões dos Estados do Rio de Janeiro e Espírito Santo. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 35(4), 649–657.
- Dantas, G.F., Oliveira, V.M.R., Dalri, A.B., Palaretti, L.F., Santos, M.G. & Faria, R.T. (2016). Desempenho de métodos na estimativa de evapotranspiração de referência para o estado da Paraíba, Brasil. *Irriga*, Botucatu, 21(3), 481–490.
- Fernandes, G.S.T., Lima, E.A., Lopes, P.M.O., Silva, D.A.O., Santos, A. & Silva, T.T.F. (2020). Classificação climática e aptidão agrícola para Bom Jesus-PI em diferentes cenários climáticos. *Journal of Environmental Analysis and Progress*, 5(1), 038–048.
- Freitas, I.A.S. (2019). *Avaliação de desempenho de métodos para estimativa da evapotranspiração de referência (E_{to})*. Dissertação (Mestrado em manejo de solo e água) - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró.
- Hamon, W.R. (1961). Estimating potential evapotranspiration. *Journal of Hydraulics Division ASCE*, New York, 87(3), 107–120.
- Hargreaves, G.H. & Samani, Z.A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96–99.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2021). Cidades e Estados. IBGE.

- Jensen, M.E. & Haise, H.R. (1963). Estimating evapotranspiration from solar radiation. *Journal of the Irrigation and Drainage Division, ASCE*, New York, 89, 15–41.
- Lima, J.G.A., Viana, P.C., Sobrinho, J.E. & Couto, J.P.C. (2019). Comparação de métodos de estimativa de Eto e análise de sensibilidade para diferentes climas brasileiros. *Irriga*, Botucatu, 24(3), 538 – 551.
- Linacre, E.T. (1977). A simple formula for estimating evaporation rates in various climates, using temperature data alone. *Agricultural Meteorology*, 18(6), 409–424.
- MAPBIOMAS. 2021. Coleções MapBiomass. MAPBIOMAS.
- Miranda, F.R., Rocha, A.B.S., Guimarães, V.B., Silva, E.S., Lima, G.C.M. & Santos, M.M.S. (2019). Eficiência do uso da água na irrigação do coqueiro anão. *Irriga*, Botucatu, 24(1), 109–124.
- Mota, P.R.D., Carvalho, M.W.W.L., Santos, L.F.A., Cruz, N.T.M., Setubal, J.W. & Branco, S.B.C. (2020). Evapotranspiração de referência para a região de Teresina, Piauí, Brasil por diferentes metodologias. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, Fortaleza, 14(3), 4047–4057.
- Moura Neto, A., Miranda, A.C.G., Fernandes, G.S.T., Gonçalves Júnior, A.S., Silva, L.L.S., Silva, R.O. & Lima, E.A. (2021). Variação diária da evapotranspiração em Bom Jesus, Piauí. *Journal of Hyperspectral Remote Sensing*, 11(3), 155–160.
- NASA POWER - Nasa Prediction of Worldwide Energy Resources. (2021). Data Access Viewer. NASA POWER.
- Oliveira, A.K.S. (2017). *Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência nos períodos chuvoso e seco em Mossoró-RN*. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró.
- Rocha Junior, R.L., Silva, F.D.S., Costa, R.F., Gomes, H.B., Silva, M.C.L., Pinto, D.D.C., Herdies, D.L., Cabral Júnior, J.B. & Pita-Diaz, O. (2020). Mudança de longo prazo e regionalização da evapotranspiração de referência no Nordeste Brasileiro. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 35, 891-902.
- Santos, R.D.S., Souza, M.H.C., Bispo, R.C., Ventura, K.M. & Bassoi, L.H. (2017). Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para o município de Petrolina, PE. *Irriga*, Edição Especial, 31–39.
- Silva, F.D.S., Costa, R.L., Antonio, M.A.V., Afonso, E.O., Santos, A.M., Mateus, N.P.A. & Antonio, J.F. (2018). Tendências observadas da evapotranspiração potencial no Estado de Alagoas (1961-2016). *Revista Brasileira de Geografia Física*, 11(1), 28-43.
- Willmott, C.J., Ackleson, S.G., Davis, R.E., Feddema, J.J., KlinK, K.M., Legates, D.R., O'Donnell, J. & Rowe, C.M. (1985). Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research*, 90, 8995–9005.