

## VARIABILIDADE TEMPORAL DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA A MESORREGIÃO METROPOLITANA DE BELÉM-PA

LILIANE DA SILVA VIANA<sup>1</sup>; MARYJANE DINIZ DE ARAÚJO GOMES<sup>2</sup>; ÉLVIS DA SILVA ALVES<sup>3</sup>; ALEX PAULO MARTINS DO CARMO<sup>4</sup>; VERA QUEIROZ DE SOUZA<sup>5</sup>; LAILSON DA SILVA FREITAS<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Engenheira Agrônoma, Instituto Federal do Pará – Campus Castanhal – PA – BR 316, Km 61, Saudade II, CEP: 68740-970, Castanhal – PA, Brasil, Email: [liliane.agro.viana@gmail.com](mailto:liliane.agro.viana@gmail.com)

<sup>2</sup>Professora, Instituto Federal do Pará – Campus Castanhal – PA – BR 316, Km 61, Saudade II, CEP: 68740-970, Castanhal – PA, Brasil, Email: [gomes-mary@hotmail.com](mailto:gomes-mary@hotmail.com)

<sup>3</sup>Doutor em Engenharia Agrícola, Brasil, Email: [elvisty@gmail.com](mailto:elvisty@gmail.com)

<sup>4</sup>Doutorando em Produção Vegetal, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – Campos dos Goytacazes – RJ, Av. Alberto Lamego, 2000, Parque Califórnia, CEP: 28013-602, Campos dos Goytacazes – RJ, Brasil, Email: [alex.taa97@gmail.com](mailto:alex.taa97@gmail.com)

<sup>5</sup>Graduanda em Agronomia, Instituto Federal do Pará – Campus Castanhal – PA – BR 316, Km 61, Saudade II, CEP: 68740-970, Castanhal – PA, Brasil, Email: [veraqueirozsouza95@gmail.com](mailto:veraqueirozsouza95@gmail.com)

<sup>6</sup>Mestrando em Produção Vegetal, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro – Campos dos Goytacazes – RJ, Av. Alberto Lamego, 2000, Parque Califórnia, CEP: 28013-602, Campos dos Goytacazes – RJ, Brasil, Email: [lailsonfreitas222@gmail.com](mailto:lailsonfreitas222@gmail.com)

### 1 RESUMO

A evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) é diretamente influenciada por variáveis climatológicas e seu estudo é importante para a agricultura irrigada, pois evidencia a quantidade de água que se desloca para a atmosfera, possibilitando compreender a demanda hídrica das culturas. Neste sentido, o objetivo do trabalho foi estimar, através de análise geoestatística, a variabilidade temporal da ET<sub>o</sub> para a região metropolitana de Belém, PA. O estudo foi realizado com base em dados climatológicos da estação convencional de Belém em um período de 12 anos, obtidos do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A ET<sub>o</sub> foi calculada pelo *software* REF-ET 4.1.22, a estatística descritiva por meio de uma planilha eletrônica e a análise geoestatística pelo *software* GS<sup>+</sup><sup>®</sup>. A ET<sub>o</sub> na região metropolitana de Belém, aumentou gradativamente a partir de 2007, sendo influenciada pelas mudanças climáticas que ocorrem nessa região. Constatou-se, nos doze anos avaliados, que apenas três apresentaram moderado índice de dependência temporal (IDT) e os demais, forte IDT. Analisando os mapas de distribuição temporal, foi possível constatar que os meses de maior demanda evapotranspirativa foram agosto, setembro, outubro e novembro e que houve um incremento anual de 1,0 mm dia<sup>-1</sup> da ET<sub>o</sub>.

**Palavras-chave:** Geoestatística, irrigação, agroclimatologia, temperatura.

VIANA, L. S.; GOMES, M. D. A.; ALVES, E. S.; CARMO, A. P. M.; SOUZA, V. Q.; FREITAS, L. S.

TEMPORAL VARIABILITY OF REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION FOR THE METROPOLITAN MESORREGIÃO OF BELÉM-PA

## 2 ABSTRACT

The reference evapotranspiration (ET<sub>o</sub>) is directly influenced by climatological variables and its study is important for irrigated agriculture since it shows the amount of water that moves into the atmosphere, making it possible to understand crop water demand. In this sense, this work aimed to estimate, through geostatistical analysis, the temporal variability of ET<sub>o</sub> for the metropolitan region of Belém, PA. The study was conducted based on climatological data from the conventional station of Belém for 12 years, obtained from the Meteorological Database for Teaching and Research (BDMEP) of the National Institute of Meteorology (INMET). The ET<sub>o</sub> was calculated using the REF-ET 4.1.22 software, descriptive statistics through an electronic spreadsheet, and geostatistical analysis by the GS + ® software. The ET<sub>o</sub> in the metropolitan region of Belém, PA, increased gradually from 2007, being influenced by the climatic changes that occur in this region. In the twelve years evaluated, it was found that only three had a moderate temporal dependency index (IDT) and the others had a strong IDT. Analyzing the temporal distribution maps, it was possible to verify that the months of greatest evapotranspirative demand were August, September, October, and November and that there was an annual increase of 1.0 mm day<sup>-1</sup> of ET<sub>o</sub>.

**Keywords:** Geostatistics, irrigation, agroclimatology, temperature.

## 3 INTRODUÇÃO

Estudos climatológicos fazem-se necessários devido às mudanças climáticas que vêm ocorrendo com o passar dos anos, evidenciadas pelo aumento da temperatura média global em função dos acréscimos na concentração de gases do efeito estufa, sobretudo, de dióxido de carbono [CO<sub>2</sub>] (RENATO *et al.*, 2018). São levantamentos que merecem atenção frequente no que diz respeito à conservação e preservação do meio ambiente, levando-se em consideração que as mudanças climáticas afetam toda a biota existente.

A evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) é uma importante variável climática e sua estimativa é fundamental para a compreensão do ciclo hidrológico de uma região, uma vez que a ET<sub>o</sub> afeta diretamente o equilíbrio de água na superfície da Terra (CABRAL JÚNIOR; BEZERRA, 2018; ARAÚJO; MEDEIROS; FRANÇA, 2020). Para Araújo, Medeiros e França (2020), estudos adicionais sobre a evapotranspiração e registros em diferentes regiões dos países tropicais são úteis para fornecer mais

evidências e auxiliar na compreensão da variabilidade e tendência da evapotranspiração global.

Na produção agrícola de alimentos, a água e a energia representam os maiores insumos consumidos, sobretudo na agricultura irrigada (AHMAD; KHAN, 2016). Nesse contexto, a ET<sub>o</sub> evidencia a quantidade de água que se desloca para o meio, possibilitando o cálculo da quantidade de água que deve ser reposta para que as culturas possam atender suas necessidades hídricas, também pode contribuir com estudos que visem o gerenciamento do uso racional desse recurso natural.

Para o planejamento de irrigação e modelagens hidrológicas e ambientais são necessárias as aplicações práticas dos dados de ET<sub>o</sub>, os quais podem ser avaliados de forma distribuída e temporalmente (VILANOVA; SIMÕES; TRANNIN, 2012). O estudo das características espaciais e temporais da ET<sub>o</sub> além de ser uma ferramenta importante como indicador climático, é extremamente fundamental para o uso eficiente dos recursos hídricos, sejam eles destinados ao uso nos setores de

produção agrícola, produção de energia, consumo humano, dentre outros (CABRAL JÚNIOR; BEZERRA, 2018).

A estimativa da ETo pode ser realizada por meio do uso de diversas equações, tendo como mais difundida, a equação de Penman-Monteith, considerada como o método padrão pela FAO – *Food and Agriculture Organization of the United Nations*, por envolver um maior número de variáveis climáticas, produzindo valores satisfatórios para as condições climáticas de uma determinada região (ALLEN *et al.*, 1998; SARAIVA; BONOMO; SOUZA, 2017; BOEIRA *et al.*, 2020).

Com o uso da geoestatística é possível inferir com segurança sobre a evolução de atributos climáticos, como observado por Pereira, Santos e Neves (2020), que estudaram a variabilidade espacial e temporal da precipitação durante um período de 19 anos para o estado do Mato Grosso, Brasil, utilizando técnicas geoestatísticas. Conde *et al.* (2016) afirmaram que a ETo exprimiu forte índice de dependência temporal na comparação de estudos realizados entre regiões de Cuba e do Brasil.

Os estudos da variabilidade espacial e temporal de atributos edafoclimáticos estão sendo realizados por meio da geoestatística, ferramenta eficiente de suporte à decisão de manejo com base na estrutura da variabilidade obtidas em mapas (GUEDES, 2009).

Para Conde *et al.* (2016), a interpretação das variações de ETo é facilitada quando essas variáveis são

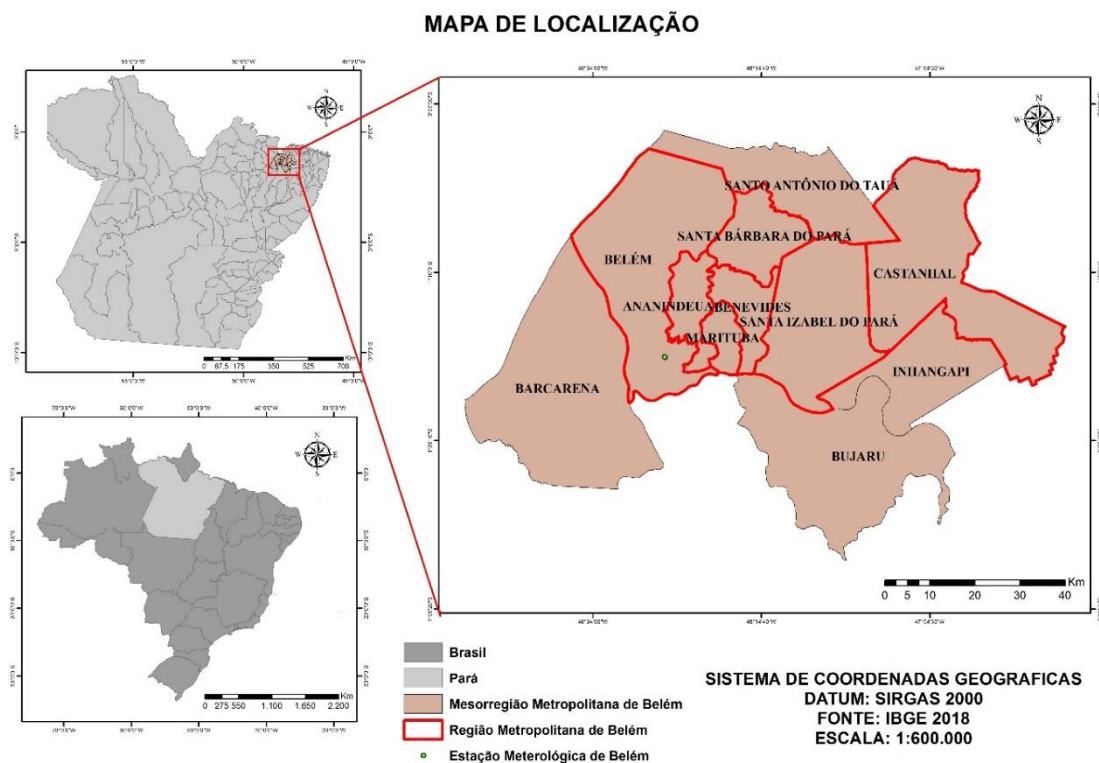
apresentadas como mapas temáticos, permitindo tomadas de decisões ágeis no zoneamento agrícola e manejo adequado da irrigação.

Neste sentido, é importante o desenvolvimento de estudos que analisem a existência da dependência temporal na evapotranspiração de referência, estimando também o grau dessa dependência por meio da geoestatística a fim de identificar a influência das variáveis climáticas na evapotranspiração. Assim, objetivou-se com este trabalho analisar a variabilidade temporal da evapotranspiração de referência para a região metropolitana de Belém, PA, durante 12 anos.

## 4 METODOLOGIA

### 4.1 Caracterização da região de estudo

O estudo foi realizado tomando como base dados climatológicos da estação convencional de Belém, PA (código OMM 82191), que faz parte da região Metropolitana de Belém, capital do estado do Pará. Os dados selecionados foram referentes a um período de 12 anos (2007 a 2018), obtidos do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). As coordenadas geográficas da localização da estação meteorológica são: latitude  $-1,43^{\circ}$  e longitude  $-48.43^{\circ}$ , com altitude de 10 metros.

**Figura 1.** Mapa de localização da Região Metropolitana de Belém. **Fonte:** Elaborado pelos autores.

A região Metropolitana de Belém é formada por sete municípios: Ananindeua, Belém, Benevides, Castanhal, Marituba, Santa Bárbara do Pará e Santa Izabel do Pará. Esses municípios compreendem uma área territorial de 3.566,203 km<sup>2</sup>, com uma população estimada em 2.275.032 habitantes e uma densidade demográfica de 637,9 hab/km<sup>2</sup> (IBGE, 2010). Segundo a classificação climática de Köppen (1931), a região possui um clima tropical úmido definido como Afi, caracterizado por chuvas abundantes durante o ano todo com precipitação média anual acima de 2000 mm, onde independentemente do mês, a precipitação mensal na região é superior a 60 mm, além da ausência de um período seco definido.

#### 4.2 Determinação da variável do estudo

O método escolhido para analisar a evapotranspiração de referência foi o de Penman-Monteith (ALLEN *et al.*, 1998),

que segundo a FAO, é o método que estima melhor a ETo, utilizando para tal, a grama como vegetação padrão e a descrição matemática de processos físicos junto a parâmetros fisiológicos e aerodinâmicos (ALENCAR; SEDIYAMA; MANTOVANI, 2015).

A ETo pelo método de Penman-Monteith FAO 56 é expressa pela Equação 1.

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

Em que: ETo é a evapotranspiração de referência (mm d<sup>-1</sup>); Rn é o saldo de radiação à superfície da cultura (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>); G é a densidade do fluxo de calor do solo (MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>); T é a temperatura do ar a 2 m de altura (°C); U<sub>2</sub> é a velocidade do vento a 2 m de altura (m s<sup>-1</sup>); e<sub>s</sub> é a pressão de vapor de saturação (kPa); e<sub>a</sub> é a pressão parcial de vapor (kPa); Δ é a declividade da curva de

pressão de vapor de saturação ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ), e  $\gamma$  é o coeficiente psicrométrico ( $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$ ).

Após a tabulação e tratamento dos dados, foi realizado o cálculo da ETo com o auxílio do *software* REF-ET 4.1.22 (ALLEN, 2016).

### 4.3 Organização dos dados e análises estatísticas

Os dados de ETo, da série estudada, foram submetidos ao teste de normalidade

### 4.4 Análise geoestatística

A análise geoestatística foi realizada por meio de Krigagem com o propósito de constatar a existência e estimar o grau de dependência temporal entre as observações, com base na pressuposição de estacionariedade da hipótese intrínseca, a qual é estimada pela Equação 2.

$$y^*(h) = \frac{1}{2N(h)_0} \sum_{i=1}^{N(K)} (Z(x_i) - Z(x_i + h))^2 \quad (2)$$

Em que:  $y^*(h)$  é a semivariância estimada a partes dos dados experimentais;  $N(h)$  é o número de pares de valores medidos  $Z(x_i)$ ,  $Z(x_i+h)$  separados por um vetor  $h$ , em que  $N(h)$  é o número de amostras separadas por uma distância  $h$ , e  $Z$  representa os valores medidos; portanto, depende de ambos, magnitude e direção (VIEIRA *et al.*, 1983).

A estimativa foi realizada utilizando o programa geoestatístico GS+7 (ROBERTSON, 2009). Os variogramas foram ajustados e obtidos os valores referentes ao alcance ( $a$ ), efeito pepita ( $C_0$ ) e patamar ( $C_0 + C$ ).

Para os modelos teóricos são encontrados, basicamente, quatro funções teóricas que se ajustam aos modelos de variograma: a) linear; b) esférico; c) exponencial; e d) gaussiano (STURANO, 2015).

Foi analisado o grau de dependência temporal, utilizando o índice de dependência temporal (IDT) proposto por Zimback (2001), segundo a Equação 3.

de Shapiro-Wilk e posteriormente foram organizados com o auxílio de planilhas eletrônicas do *software* Microsoft Excel®, nas quais foram calculados o desvio padrão (S) e o coeficiente de variação (CV). O desvio padrão é uma medida que expressa o grau de dispersão de um conjunto de dados, e o CV é uma medida de dispersão que quantifica, de maneira relativa (%), quanto os valores estão se distanciando da média.

$$\text{IDT} = \frac{C}{C_0 + C} \times 100 \quad (3)$$

Em que: IDT é o Índice de dependência temporal;  $C$  é a componente estrutural; e  $C_0$  é o efeito pepita.

Os valores de  $\text{IDT} \leq 25\%$  indicam fraca dependência temporal; no intervalo  $25\% < \text{IDT} < 75\%$  moderada dependência temporal; e  $\text{IDT} \geq 75\%$  forte dependência temporal.

Também foi determinado o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para explicar cada modelo em todos os anos estudados.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

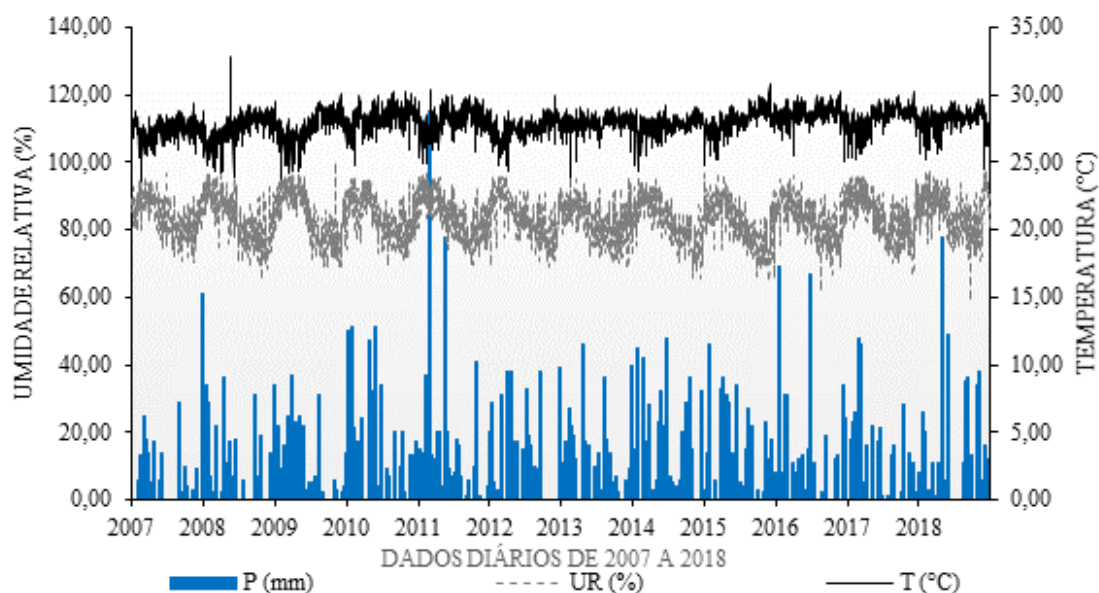
### 5.1 Descrição das características climáticas durante um período de 12 anos de estudo

A temperatura média anual ao longo dos 12 anos (2007 – 2018) variou entre 27,46 a 28,40°C, percebendo-se um incremento a partir do ano de 2010 (Figura 2). Nesse

mesmo ano percebe-se a redução gradativa da umidade relativa do ar, o que pode ser explicado pela redução das precipitações em 2010, pois segundo os dados coletados nesta

estação, o ano de 2010 teve uma precipitação anual de 3.065,30 mm, o que resultou em uma diferença do ano anterior de 398,3 mm.

**Figura 2.** Precipitação pluviométrica (P), umidade relativa do ar (UR) e temperatura (T) medidas diariamente na Estação Meteorológica da região metropolitana de Belém, PA



Fonte: Elaborado pelos autores

O aumento significativo da temperatura em todos os meses nos últimos 40 anos na cidade de Belém, PA, sendo setembro o mês com maior tendência, pode estar influenciado pela urbanização, a qual altera o microclima local da cidade (DIAS; VALENTE; FERNANDES, 2020). Os autores constatam ainda que os fenômenos El Niño e La Niña influenciam no regime de precipitação na cidade de Belém, em que os extremos das cheias coincidem com a La Niña e de seca com o fenômeno El Niño.

Os dados climatológicos influenciam na ETo, podendo contribuir com o aumento dessa variável. Os resultados observados por esta pesquisa corroboram com os resultados encontrados por Santos (2017), que ao avaliar a precipitação climática na região Metropolitana de Belém, utilizando um banco de dados de 10 anos, constatou que em 2010 houve uma redução da

precipitação pluviométrica e um aumento da exposição do solo devido à redução de cobertura vegetal.

Neste sentido, pode-se inferir que a perda de água para a atmosfera por evaporação da água na superfície do solo teve um aumento devido à redução da cobertura vegetal, podendo assim, ter contribuído para o aumento significativo da ETo, tendo em vista que essa variável representa a perda de água para a atmosfera por meio da transpiração das plantas e da evaporação da água presente na superfície do solo (JOSÉ *et al.*, 2020).

A alteração das variáveis climáticas, ao longo dos anos, ocorre devido a vários fatores associados e interfere na ETo de uma determinada localidade. Segundo Bolwerk e Ertzogue (2021), o aumento da temperatura na Amazônia Legal pode estar correlacionado diretamente ao desmatamento progressivo, à razão de

densidade populacional por área, à concentração de CO<sub>2</sub> e principalmente à ocorrência de queimadas. Os mesmos autores encontraram resultados que indicam uma forte correlação inversa do desmatamento com a quantidade de precipitação pluviométrica.

A tendência na elevação da temperatura em conjunto com a diminuição da precipitação pluviométrica pode interferir no processo de evapotranspiração e consequentemente no ciclo hídrico (BOLWERK; ERTZOGUE, 2021). Essa afirmação corrobora com os resultados desta pesquisa, na qual foi possível perceber

ao longo da série de dados, o aumento da temperatura e a redução da precipitação pluviométrica.

## 5.2 Evapotranspiração de referência

Baseando-se na média e mediana, para a maior parte do período analisado, é possível afirmar que há um aumento da ETo com o passar dos anos (Tabela 1). Este fato pode ser explicado por conta do desmatamento, resultante principalmente da urbanização crescente e pelo incremento da pecuária na Mesorregião Metropolitana de Belém e áreas circunvizinhas.

**Tabela 1.** Parâmetros estatísticos para a ETo determinada na Mesorregião Metropolitana de Belém, PA entre os anos 2007 e 2018.

Ano	n	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	s	CV	W
2007	365	4,11	4,08	2,18	5,42	0,44	10,77	0,99
2008	366	4,20	4,18	2,00	5,60	0,62	14,67	0,99
2009	365	4,22	4,19	2,21	5,94	0,68	16,22	0,98
2010	365	4,30	4,28	2,72	5,48	0,45	10,57	0,99
2011	365	4,32	4,32	2,81	5,32	0,45	10,38	0,98
2012	366	4,32	4,29	2,40	5,46	0,46	10,69	0,98
2013	365	4,41	4,41	3,00	5,55	0,37	8,29	0,98
2014	365	4,36	4,33	2,43	5,75	0,57	13,07	0,99
2015	365	4,50	4,45	3,00	5,84	0,51	11,30	0,99
2016	366	4,35	4,32	2,34	5,66	0,48	10,93	0,98
2017	365	4,40	4,40	2,90	5,92	0,53	12,05	0,99
2018	365	4,39	4,41	2,26	6,00	0,52	11,77	0,99

n: dados utilizados; s: desvio padrão; CV: Coeficiente de Variação; W: estatística teste de Shapiro-Wilk

Fonte: Elaborado pelos autores

Os estudos realizados pelo PRODES (Projeto de Estimativa do Desflorestamento da Amazônia) apontam que o Pará é o estado, dentro da Amazônia Legal Brasileira, que possui as maiores taxas de desmatamento anual, representando 34% do desmatamento realizado nessa região (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS, 2019). Sendo assim, o aumento gradativo da evapotranspiração pode estar associado, principalmente, às altas taxas de desmatamento, pois à medida em que se aumenta a parcela evaporativa do solo,

devido à falta de cobertura vegetal, ocorre um incremento significativo na evapotranspiração local. Porém, é necessária a condução de um estudo correlacionado a taxa de desmatamento desta área com a evapotranspiração encontrada nessa região.

A exposição do solo pode ocasionar um aumento da evapotranspiração, visto que a parcela evaporativa do solo terá uma maior contribuição nessa variável. Neste sentido, o aumento da evapotranspiração evidenciado principalmente a partir do ano de 2010, corrobora com os resultados que mostram que a cobertura vegetal em municípios da

Mesorregião Metropolitana de Belém vem diminuindo gradativamente (AZEVEDO; SOARES; TORRES, 2021). Santos (2017) constatou a perda de cobertura vegetal na Mesorregião Metropolitana de Belém, evidenciada por meio da análise do Índice de Vegetação Normalizado (NDVI), calculado por meio do uso de imagens do satélite Landsat 7, foi observado um desmatamento crescente entre os anos 2000 e 2010, o que ocasionou o aumento gradativo da exposição do solo.

Em relação à distribuição dos dados, a média e a mediana apresentaram valores próximos, indicando uma distribuição normal, que foi comprovada pelo teste de Shapiro-Wilk (Tabela 1). Assim, na análise da distribuição dos valores de ETo, feita com base na análise exploratória dos dados considerados nos períodos estudados, confirmou-se a hipótese de normalidade dos dados.

Os resultados da estimativa da ETo apresentaram, de acordo com a análise

estatística, uma baixa dispersão no período de estudo (2007-2018), isto é verificado em virtude de o desvio padrão estar entorno da média, ou seja, são valores que se encontram muito próximos da média, logo, mais homogêneas são as amostras. Como os dados utilizados são da mesma estação (Belém, PA), a análise estatística dos resultados que estimam a ETo possui dispersão semelhante, não havendo uma extrapolação nos resultados computados para o desvio padrão e o CV.

Para os anos de 2007, 2010, 2011, 2012, 2013, 2015, 2016 e 2018, o CV apresentou baixa variabilidade (CV < 12%). Nos demais anos, o CV apresentou média variabilidade.

Mesmo com o valor de CV para os anos que apresentaram baixa variabilidade, o ano de 2012 foi o que apresentou maior alcance (11,72 m, Tabela 2), assim, verifica-se uma menor variabilidade temporal.

**Tabela 2.** Parâmetros dos modelos ajustados dos semivariogramas escalonados para evapotranspiração de referência determinada em Belém, PA entre os anos 2007 e 2018.

Ano	Modelo	R <sup>2</sup>	Efeito pepita (Co)	Patamar (Co + C)	Alcance (A)	Aleatoriedade E = (Co/C)	IDT (%)
2007	Exponencial	0,90	0,05	0,23	9,75	1,29	77,3
2008	Esférico	0,96	0,08	0,43	10,00	1,23	81,1
2009	Esférico	0,99	0,05	0,50	7,74	1,12	89,2
2010	Exponencial	0,99	0,02	0,21	5,73	1,12	89,7
2011	Exponencial	0,97	0,06	0,24	10,00	1,34	75,0
2012	Esférico	0,98	0,07	0,26	11,72	1,37	73,0
2013	Exponencial	0,93	0,02	0,14	5,22	1,21	82,9
2014	Esférico	0,99	0,05	0,40	11,03	1,14	87,5
2015	Esférico	0,98	0,04	0,28	5,93	1,18	84,7
2016	Esférico	0,98	0,10	0,25	10,70	1,61	62,2
2017	Esférico	0,98	0,08	0,34	10,95	1,32	76,0
2018	Esférico	0,93	0,14	0,29	10,19	1,99	50,2

Regressão Linear; IDT: Grau de Dependência Temporal; Alcance: distância dentro da qual as amostras apresentam-se correlacionadas (m).

**Fonte:** Elaborado pelos autores



Na geoestatística, mais importante que a normalidade dos dados, é a ocorrência do efeito proporcional em que a média e a variância dos dados não sejam constantes na área de estudo, fato que não foi observado nesta pesquisa, uma vez que os semivariogramas apontaram respostas bem estabelecidas.

Para a variável climática ETo de referência, a maior parte dos anos estudados ajustaram-se ao modelo esférico, exceto os anos de 2007, 2010, 2011 e 2013 que se ajustaram ao modelo exponencial.

A ETo apresentou o maior valor de alcance nos anos 2012 e 2014 (11 dias) e o menor alcance foi encontrado nos anos 2010, 2013 e 2015 (cinco dias). A partir desses dados é possível verificar que aqueles que tiveram maiores alcances e, conseqüentemente, uma distância (h) maior, são representados por semivariogramas que tendem a uma constância de valores. O alcance para ETo foi maior em 2012 e 2014, implicando dizer que houve uma maior dependência temporal dos dados observados dentro da ETo nesse período.

Percebe-se um pequeno valor de efeito pepita, o que indica que os dados não apresentaram erros significativos de medição, uma vez que esse parâmetro representa o componente da variabilidade temporal que não pode ser relacionado com uma causa específica (variabilidade ao acaso). Os valores encontrados variaram de 0,02 a 0,14, aproximando-se do valor ideal que seria nulo. Segundo Valente (1989), esse efeito reflete a variação de pequena escala não detectada pela amostragem devido à presença de erros de medida. Sendo assim, os dados não apresentaram erros significativos de medição, já que em todos os anos nota-se valores com tendência próxima ao zero.

Os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) das ETo de 2007 a 2018 (Tabela 2) superiores a 0,90 demonstram que as ETo calculadas durante todos esses anos variaram de forma proporcional ano a ano, o que

representa de maneira satisfatória a variabilidade temporal do parâmetro meteorológico utilizado nos cálculos. Esses dados favorecem os critérios da estação para a aplicação da krigagem.

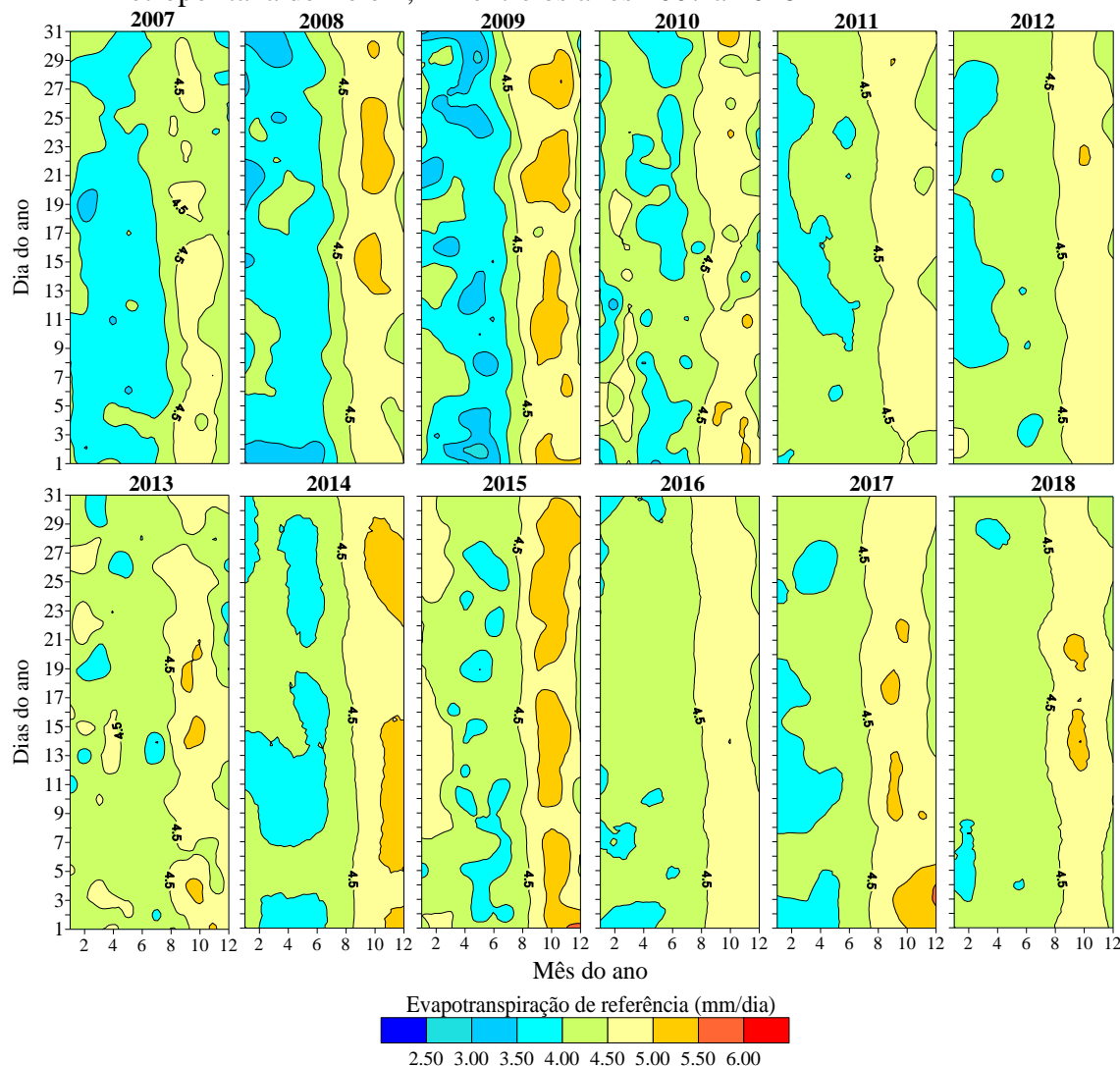
Os resultados da interpolação por krigagem a partir dos critérios da estação, atingiram os objetivos almejados, notando-se uma ótima relação da evapotranspiração calculada da estação de referência (Tabela 2), indicando que a krigagem é uma técnica geoestatística válida para a espacialização da ETo, o que condiz com o trabalho de Sartori *et al.* (2010). Estes conjuntos de métodos e procedimentos produziram resultados contundentes no decorrer da espacialização da ETo ao longo do tempo.

Observou-se que a ETo nos anos de 2012, 2016 e 2018 apresentou moderada dependência temporal ( $IDT < 75\%$ ) e nos demais anos, uma forte dependência temporal ( $IDT \geq 75\%$ ). Assim, os modelos geoestatísticos construídos possibilitaram incorporar a dependência temporal, sendo adequados aos dados de ETo analisados ( $R^2 \geq 0,90$ ). Isso mostra que o número de pontos amostrados foi suficiente para a realização de estimativas por meio da interpolação.

A ausência do efeito pepita puro aponta a existência de variabilidade temporal nos dados observados, possibilitando o ajuste dos semivariogramas para cada modelo específico demonstrado anteriormente na Tabela 2, em cada ano, verificando-se a existência de um padrão temporal.

Nos mapas temáticos (Figura 2) percebe-se que, em todos os anos, os meses com as maiores taxas evapotranspirativa foram: agosto, setembro, outubro, novembro e dezembro, estando essa relacionada aos meses mais quentes do ano. Esse resultado pode ser explicado pelas características climáticas da região, pois a temperatura e a radiação solar global são mais intensas nos meses citados, chegando a atingir em média  $28,5^\circ\text{C}$  e  $39,85 \text{ MJ m}^2 \text{ d}^{-1}$ , respectivamente.

**Figura 2.** Mapas da distribuição temporal da evapotranspiração de referência para Mesorregião Metropolitana de Belém, PA entre os anos 2007 a 2018



**Fonte:** Elaborado pelos autores

Quanto maior o valor da temperatura, maior será a demanda atmosférica por água. Durante o verão, tem-se menores horas de insolação devido à presença de nebulosidade atmosférica, com menores velocidades do vento, porém com altas temperaturas e altas umidades relativas (CONDE *et al.*, 2016).

Percebe-se na Figura 2, que ao longo do período avaliado (2007 a 2018), a  $ETo$  teve um incremento médio de  $1,00 \text{ mm dia}^{-1}$  ao ano. Um aumento significativo em se tratando da perda de água para atmosfera, refletindo, por consequência, em um aumento na quantidade de água necessária para uso na irrigação de sistemas de cultivo.

A krigagem é um método de interpolação eficiente dentro da geoestatística, pois no presente trabalho, ela nos permite verificar a dependência temporal da  $ETo$ , que se manifesta nos semivariogramas mediante as amostras adjacentes com o intuito de estimar a valoração em qualquer posição dentro do campo, sem tendência e com variância mínima. De acordo Vilanova, Simões e Trannin (2012), a krigagem possibilita, em regiões com poucas estações meteorológicas, a geração de mapas de  $ETo$  produzindo bons resultados de espacialização. Contudo, é necessário o uso

dessa ferramenta de forma criteriosa para validação dos resultados, podendo ser utilizada uma estação meteorológica base.

Este método de interpolação gera valores muito próximos da variável de evapotranspiração de referência. A krigagem representou com boa exatidão as variações da ETo no decorrer dos doze anos (2007-2018) conforme os resultados expressos na Tabela 2 e na Figura 2, evidenciando que há um aumento dessa ano a ano, ficando ainda mais acentuado a partir de 2010. Refletindo assim, na existência de uma perda hídrica considerável para a atmosfera na região que abrange a estação meteorológica de Belém, PA.

## 6 CONCLUSÕES

A geostatística possibilitou a análise da variabilidade temporal da ETo para a região metropolitana de Belém, PA, identificando a influência das variáveis climáticas.

A ETo na Mesorregião Metropolitana de Belém, PA aumentou gradativamente a partir do ano de 2007, sendo influenciada pelas mudanças climáticas. As temperaturas médias da região metropolitana de Belém estão cada vez mais elevadas e os regimes pluviométricos modificados a cada ano, com redução das precipitações médias anuais.

Por meio dos mapas de distribuição temporal da evapotranspiração de referência, ALLEN, R. G. **REF-ET**: Reference evapotranspiration calculator. Version 4.1.22. Moscow: University Idaho, 2016.

ARAÚJO, W. R.; MEDEIROS, R. M.; FRANÇA, M. V.; Espacialização da evapotranspiração na bacia hidrográfica do rio Ipojuca-PE, Brasil. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, Gurupi, v. 8, n. 3, p. 205-218, 2020.

foi possível constatar que os meses de maior demanda evapotranspirativa na Mesorregião Metropolitana de Belém foram: agosto, setembro, outubro e novembro. Geralmente, nesses meses, verificam-se maiores temperaturas e menores precipitações pluviométricas.

## 7 REFERÊNCIAS

- AHMAD, A.; KHAN, S. Water and energy scarcity for agriculture: is irrigation modernization the answer? **Irrigation and Drainage - Wiley Online Library**, v. 66, p. 34-44, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1002/ird.2021>. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ird.2021>. Acesso em: 15 jan. 2019.
- ALENCAR, L. P.; SEDIYAMA, G. C.; MANTOVANI, E. C. Estimativa da evapotranspiração de referência (ETo padrão FAO), para Minas Gerais, na ausência de alguns dados climáticos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 35, n. 1, p. 39-50, 2015.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. (Irrigation and Drainage Paper, 56).
- AZEVEDO, S. D.; SOARES, L. F. A.; TORRES, L. M. Temperatura de superfície e uso e cobertura do solo em municípios da região metropolitana de Belém/PA. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, Aracajú, v. 12, n. 1, p. 214-222, 2021.
- BOLWERK, D. A.; ERTZOGUE, M. H. Mudanças climáticas e/ou mudanças socioculturais na Amazônia Legal. **Revista Ibero-Americana de Ciências**

**Ambientais**, Aracajú, v. 12, n. 1, p. 203-2013, 2021.

BOEIRA, L. S.; BARBARA NETO, M.; NEVES, L. A.; TERRA, V. S. S.; COLLARES, G. L. Evapotranspiração de referência pelo método de penman-monteith em anos de enos para microrregião de Pelotas-RS. **Irriga**, Botucatu, v. 25, n. 3, p. 537-548, 2020.

CABRAL JÚNIOR, J. B.; BEZERRA, B. G. Análises da evapotranspiração de referência e do índice de aridez para o Nordeste do Brasil. **Revista de Geociências do Nordeste**, Caicó, v. 4, n. 1, p. 71-89, 2018.

CONDE, E. C.; BRITO, R. R.; MONTENEGRO, R. J. V.; ROMÁN, R. M. S. Comportamento temporal da evapotranspiração de referência em municípios de São Paulo e províncias de cuba. **Irriga**, Botucatu, v. 21, n. 2, p. 365-383, maio/jun. 2016.

DIAS, L. C.; VALENTE, A. M. C.; FERNANDES, L. L. Análise e correlação de variáveis climatológicas com os fenômenos climáticos e a urbanização na Cidade de Belém, no Estado do Pará, região Norte do Brasil. **Research, Society and Development**, Vargem Grande Paulista, v. 9, n. 8, p. e972986790, 2020.

GUEDES, O. F. **Variabilidade espacial e temporal de mapas de colheita e atributos do solo em um sistema de semeadura direta**. 2009. Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Agricultura Tropical e Subtropical Área de Concentração em Gestão dos Recursos Agroambientais no Instituto Agrônomo de Pós-Graduação - IAC. Campinas, 2009. 97 p.

IBGE. **Censo demográfico**. Brasília, DF: IBGE, 2010. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/al/belem/p-anorama>. Acesso em: 28 fev. 2019.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Projeto Prodes Digital: Mapeamento do desmatamento da Amazônia com Imagens de Satélite**. São José dos Campos: INPE, 2019. Disponível em: [http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes/pdfs/Metodologia\\_Prodes\\_Deter\\_revisada.pdf](http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes/pdfs/Metodologia_Prodes_Deter_revisada.pdf). Acesso em: 15 jan. 2019.

JOSÉ, J. V.; PEREIRA, L. B.; LEITE, H. M. F.; SANTOS, L. C.; BARROS, T. H. S.; LEITE, K. N. Métodos empíricos de estimativa da evapotranspiração em clima tropical equatorial. **Research, Society and Development**, , Vargem Grande Paulista, v. 9, n. 10, p. e4099108563, 2020.

KÖPPEN, W. **Climatologia**. Cidade do México: Fundo de Cultura Econômica, 1931.

PEREIRA, T. D.; SANTOS, B. C.; NEVES, G. Z. F. Variabilidade pluviométrica do estado do Mato Grosso na série temporal de 1998 a 2017. **Revista Geonorte**, Manaus – AM, v.11, n.37, p.39-56, 2020.

RENATO, N. S.; SEDIYAMA, G. C.; SILVA, J. B.; PEREIRA, E. G. Modelo fotossintético para simulação da produtividade do milho em condições de temperatura e CO<sub>2</sub> elevados. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 41, n. 4, p. 1067-1074, 2018.

ROBERTSON, G. P. **GS + Geostatistics for the environmental sciences**. Plainwell: Gamma Desing Software, 2009.

SANTOS, M. R. S. **A precipitação climática na mesorregião metropolitana de Belém e suas implicações socioambientais**. 2017. Dissertação

(Mestrado em Ciências Ambientais) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2017.

SARAIVA, G. S.; BONOMO, R.; SOUZA, J. M. Avaliação de interpoladores geostatísticos e determinísticos da evapotranspiração de referência diária para o estado do Espírito Santo. **Revista Agro@mbiente On-line**, Boa Vista, v. 11, n. 1, p. 21-30, 2017.

SARTORI, A. A. C.; SILVA, A. F.; RAMOS, C. M. C.; ZIMBACK, C. R. L. Variabilidade temporal e mapeamento dos dados climáticos de Botucatu-SP. **Irriga**, Botucatu, v. 15, n. 2, p. 131-139, abr./jun. 2010.

STURANO, J. R. **Apostila de geostatística básica**. Rio Claro: Unesp, 2015.

VALENTE, J. M. G. P. **Geomatématica: lições de geostatísticas**. Ouro Preto: Fundação Gorceix, 1989. v. 8.

VIEIRA, S. R.; HATFIELD, T. L.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Califórnia, v. 51, n. 3, p. 1-75, 1983.

VILANOVA, M. R. N.; SIMÕES, S. J. C.; TRANNIN, I. C. B. Interpolação geoespacial da evapotranspiração de referência (ET<sub>o</sub>) em regiões com escassez de dados: estudo de caso no Sul de Minas Gerais. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v.7, n. 2, p. 179-194, 2012.

ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade**. 2001. Tese de Livre-Docência (Livre-Docência em Levantamento do solo e fotopedologia) – Faculdade Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.