



Modelos geoestatísticos na avaliação da variabilidade temporal da evapotranspiração de referência

Débora Amanda Lima RODRIGUES ¹, Cícero Manoel dos SANTOS *¹,
Vivian Dielly da Silva FARIAS ¹, Maurício Bruno Prado da SILVA ², Érico Tadao TERAMOTO ³,
Geovani da Silva SANTANA ¹

¹ Universidade Federal do Pará, Altamira, PA, Brasil.

² Programa de Pós Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP, Brasil.

³ Universidade Estadual Paulista, Registro, SP, Brasil.

*E-mail: ciceromanoel2007@gmail.com

Submetido em: 06/05/2024; Aceito em 12/11/2024; Publicado em: 03/12/2024.

RESUMO: A Evapotranspiração de Referência (ET_0) é uma variável hidrometeorológica fundamental, utilizada em diversas aplicações, incluindo o gerenciamento integrado de recursos hídricos e o planejamento do uso do solo para projetos agrícolas e florestais. Em grande parte do Brasil, dados de ET_0 não estão prontamente disponíveis, o que exige o uso de métodos e técnicas alternativas para sua estimativa. Este estudo teve como objetivo estimar a ET_0 utilizando o método FAO Penman-Monteith, permitindo a visualização de seu comportamento espacial, análise estatística e avaliação da variação temporal da ET_0 por meio de métodos geoestatísticos, como krigagem e variogramas, em três localidades no Estado do Pará. A modelagem indicou uma forte dependência temporal para a ET_0 , com a maioria dos valores variando entre 3,5 mm e 4,0 mm. A demanda por ET_0 apresentou semelhanças entre as localidades, exibindo padrões sazonais influenciados pelas variáveis de entrada que afetam sua estimativa. O método de krigagem destacou períodos de valores de ET_0 mais altos e/ou mais baixos. Os variogramas ajustados apresentaram um $R^2 > 0,86$ e uma soma dos quadrados dos resíduos (SQR) próxima de zero.

Palavras-chave: estatística descritiva; Transamazônica; modelagem de variogramas.

Geostatistical models in the assessment of temporal variability of reference evapotranspiration

ABSTRACT: Reference Evapotranspiration (ET_0) is a key hydrometeorological variable used in various applications, including integrated water resource management and land-use planning for agricultural and forestry projects. In much of Brazil, ET_0 data is not readily available, necessitating alternative methods and techniques for its estimation. This study aimed to estimate ET_0 using the FAO Penman-Monteith method, enabling visualization of its spatial behavior, statistical analysis, and evaluation of ET_0 's temporal variation using geostatistical methods like kriging and variograms in three locations within the State of Pará. The modeling indicated a strong temporal dependence for ET_0 , with most values ranging between 3.5 mm and 4.0 mm. The demand for ET_0 showed similarities across locations, displaying seasonal patterns influenced by input variables affecting its estimation. The kriging method highlighted periods of both higher and lower ET_0 values. The adjusted variograms showed an $R^2 > 0.86$ and a sum of squares of residuals (SQR) close to zero.

Keywords: descriptive statistics; Trans-Amazonian; variogram modeling.

1. INTRODUÇÃO

Diante dos problemas ambientais e dos avanços territoriais nos diferentes setores, a demanda por água vem sendo uma das maiores preocupações da atualidade para a maximização do uso, pois as atividades de modo geral demandam grande quantidade de água, combinado com desastres ambientais. Todavia estimativas das necessidades hídricas pelas culturas são importantes para o planejamento e implantação de projetos agrícolas e florestais, de modo igual como informações relacionadas à evapotranspiração de referência (ET_0) (KAMALI et al., 2015).

A ET_0 é um complexo processo simultâneo de perda de água para a atmosfera, mediante os processos de evaporação do solo e transpiração das plantas, perfazendo um

componente importante no ciclo hidrológico e de interesse, para projetos e gestão de sistema de irrigação e simulação de produção de culturas agrícolas (SENTELHAS et al., 2010).

Para o planejamento integrado da gestão de recursos é fundamental compreender a dinâmica espaço-temporal de ET_0 . De acordo com Jin et al. (2017), aproximadamente 60% da água precipitada sobre o solo retorna à atmosfera através da evapotranspiração, e essa variação pode afetar o balanço hídrico, influenciando a disponibilidade de água em rios e lagos. Além disso, variações da ET_0 influencia o fluxo de calor latente, o que impacta no calor sensível e na temperatura da superfície e, por consequência, provoca mudanças climáticas significativas (SANTOS et al., 2020). Mudanças em variáveis meteorológicas, como temperatura

do ar, umidade relativa e velocidade do vento, no contexto das mudanças climáticas, impactam diretamente a ET₀, podendo levar ao aumento das condições de seca em todo o mundo, devido ao incremento da ET₀, agravando o processo de desertificação em regiões áridas e semiáridas (JUNG et al., 2010; SILVA et al., 2018).

A ET₀ é um processo de mensuração complexa, cujos métodos de estimativa abrangem os lisímetros, em principal os de pesagem, os métodos micrometeorológicos e, na ausência destas, modelos de estimativas. Dentre os modelos existentes na literatura, a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) preconizam o modelo Penman-Monteith-FAO 56 (PM-FAO 56) como equação padrão para estimativa da ET₀ (ALLEN et al., 1998). Nos locais com a disponibilidade total dos dados de entrada, o modelo PM-FAO56 é preferido. Nos locais em que não é possível utilizar o modelo padrão, a FAO indica o modelo de Hargreaves modificado pela FAO. No entanto, nem sempre é possível aplicá-los devido à indisponibilidade das variáveis de entrada requeridas pelos modelos e as fornecidas por algumas estações agrometeorológicas. Por isso, outros modelos e metodologias foram desenvolvidos para estimativa de ET₀ com poucas variáveis de entrada.

Inúmeros são os relatos na literatura do uso do modelo de PM-FAO56, de modelos empíricos, modelos de regressão, modelos estatísticos, técnicas de inteligência artificial e entre outras metodologias (VILANOVA et al., 2012; FARIAS et al., 2020; SILVA et al., 2022; SILVA et al., 2022b). Uma técnica que está sendo utilizada com frequência na modelagem é, a geoestatística que utiliza o conceito de variáveis regionalizadas na avaliação de variabilidade espaço-temporal por meio da extração e organização espaço-temporal dos dados disponíveis (HOYOS; RUIZ, 2023). A grande diferença da geoestatística, em relação às outras formulações matemáticas de análise de dados é justamente a relação temporal.

Os métodos geoestatísticos obtêm informações espacialmente contínuas a partir da interpolação de medições de estações isoladas. Esse tipo de análise torna-se mais interessante, já que oferece um sentido físico ao estudo e não puramente matemático (SANTOS et al., 2022). O uso da geoestatística torna-se possível analisar o grau de dependência espacial ou temporal de uma variável aleatória, e com isso, decidir qual o melhor interpolador que se deve utilizar para a representação dos parâmetros (Landim et al., 2002; Moreno et al., 2011), facilitando o entendimento de variáveis.

Neste sentido, é necessário o conhecimento da variabilidade temporal de ET₀ para atender às necessidades atuais das atividades agrícolas, do ciclo hidrológico e avaliar as recentes mudanças climáticas e efeito estufa a nível global. Por isso, a estimativa de ET₀ e a aplicação geoestatística são pertinentes para criar ambientes com grande qualidade conjuntos de dados através de métodos de interpolação, permitindo o desenho de modelos regionais aplicáveis para padronizar medições de áreas isoladas. A qualidade dos resultados depende da densidade espacial, agrupamento de pontos amostrais e tipo de superfície, entre outros aspectos (LI; HEAP, 2011). A interpolação consiste em um processo de utilização de pontos amostrados para aproximar superfícies de ajuste, as quais, a partir da representação contínua do fenômeno possibilitam uma manipulação eficiente dos modelos matemáticos (SCOLUM et al., 2005; HOYOS; RUIZ, 2023). Vários métodos foram

desenvolvidos para interpolar dados, das quais pode-se destacar a krigagem. A krigagem assume que a distância ou a diferença entre os pontos de amostragem refletem uma correlação espaço-temporal que pode ser utilizada para explicar sua variação em uma superfície (CHILDS, 2004). A krigagem é um dos métodos de interpolação mais precisos e poderosos da geoestatística, utilizando a abordagem dos mínimos quadrados generalizados para fornecer previsões excepcionalmente imparciais (JAMALY; KLEISSL 2017; CHILÈS; DELFINER, 2012).

O estudo da variabilidade espaço / temporal de ET₀ em uma região é fundamental para a identificação de padrões e conhecer os valores para criação de mapas temáticos de uma determinada região. A importância do mapeamento de ET₀ consiste tanto na busca por melhorias de aspectos metodológicos quanto na geração de mapas de uso e aplicação prática para o planejamento do meio físico em geral.

Dessa forma, na qual a ET₀ assume grande importância nas diferentes áreas ambientais e agrícolas, além da necessidade de conhecer e entender mais sua flutuação no tempo, o presente estudo tem por objetivo avaliar o processo de espacialização de ET₀ por meio de técnicas geoestatística, na qual será utilizado o método de krigagem e modelagem de variograma em locais do Estado do Pará: Medicilândia, Pacajá e Placas, no período de 2008 à 2016.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Local, dados e clima

O estudo foi realizado nos municípios de Medicilândia (03°30'S, 52°57'W e 251,0 m), Placas (03°52'S, 54°14'W e 100,0 m) e Pacajá (03°50'S, 50°38' e 89,0 m). Os locais ficam localizados no Sudoeste do Pará, ao longo da Rodovia Transamazônica (BR-230) (Figura 1). Os dados utilizados foram de temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação solar e velocidade do vento fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) de estações meteorológicas.

Os dados foram obtidos do período de janeiro de 2008 a dezembro de 2016. A qualidade da série de dados foi avaliada com base em regras de validação, visando identificar dados espúrios e lacunas na série temporal. A análise de qualidade seguiu uma metodologia apresentada por diversos autores (RIVINGTON et al., 2006; WMO, 2008; LYRA et al., 2023). Além disso, o critério adotado para a filtragem foi complementado por observações locais. Ou seja, realizou-se a validação temporal, na qual foi verificado se os dados estavam consistentes com a sazonalidade, ou seja, se o clima de cada local seguia um padrão sazonal específico. Por exemplo, as maiores temperaturas do ar são registradas durante o inverno e a primavera (período das secas amazônicas), enquanto as menores temperaturas ocorrem durante o verão e o outono (período das chuvas amazônicas). Dessa forma, foi possível identificar possíveis erros nos valores extremos para as estações.

Segundo a classificação de Köppen-Geiger (1928) os locais de estudo têm clima do tipo Am, caracterizado como clima tropical úmido e ventos alísios clima de monção tropical (ALVARES et al., 2014). Considerado clima intermediário, apresenta temperaturas médias mensais acima de 18°C em todos os meses do ano. É um clima que tende a ter ao longo do ano menos variações na temperatura do ar. Possui meses com baixas precipitações, média menor que 60 mm. Em Medicilândia a média anual de precipitação

acumulada é em torno de 2032 mm, em Pacajá 2165 mm e em Placas 1804 mm (Figura 2). A temperatura do ar (Tar) média anual em Medicilândia, Pacajá e Placas é igual a 26,0°C, 26,4°C e 25,8°C, respectivamente. Em Medicilândia o mês com maior precipitação acumulada (343 mm) é março e o menor (38 mm) agosto. O mês mais quente (28,1°C) é setembro e a menor temperatura média (24,7°C) ocorre em fevereiro e março. Em Pacajá o mês mais chuvoso (410 mm)

é observado em março e a menor precipitação (26 mm) ocorre em agosto. A maior temperatura ocorre em setembro (28,6°C) e a menor (25,0°C) em fevereiro. Em Placas o mais chuvoso (299 mm) é março e o menos chuvoso (34 mm) agosto. Setembro é o mês mais quente (28,0°C) e a temperatura mais baixa do ano (24,6°C) é observado nos meses de fevereiro e março. Observa-se sazonalidade semelhante nos três locais.

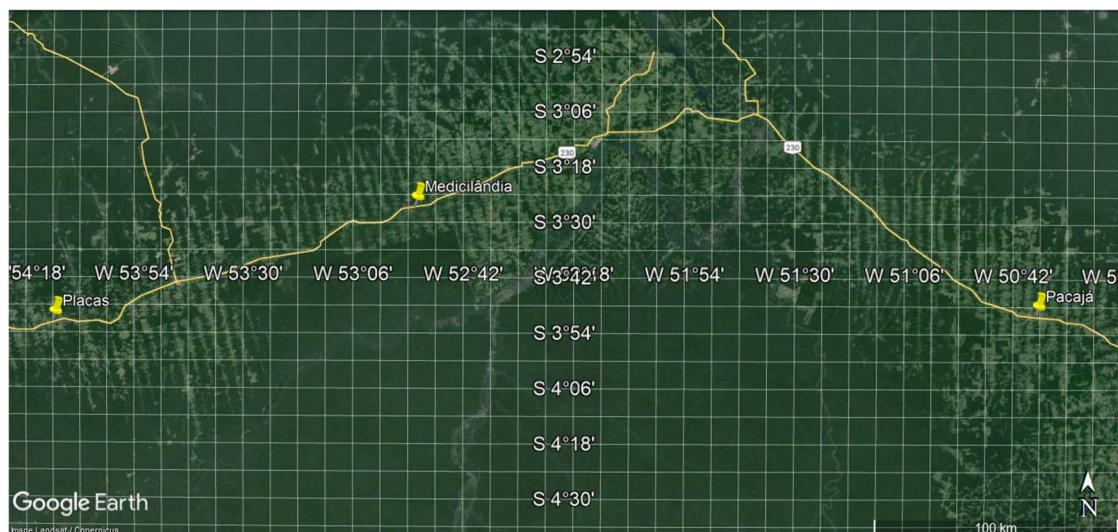


Figura 1. Localização dos Municípios de Medicilândia, Placas e Pacajá.
Figure 1. Location of the Municipalities of Medicilândia, Placas and Pacajá.

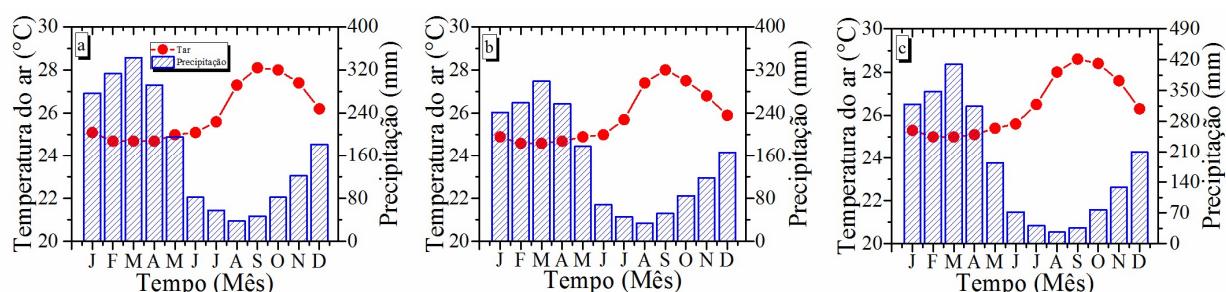


Figura 2. Dados climáticos de temperatura do ar e precipitação em: a) Medicilândia, b) Pacajá e c) Placas.
Figure 2. Climatic data on air temperature and precipitation in: a) Medicilândia, b) Pacajá and c) Placas.

2.2. Determinação da evapotranspiração de referência (ET_0)

Foram utilizados dados de ET_0 obtidos por estimativas utilizando o modelo de PM-FAO56 (Eq. 1), descrita em Allen et al. (1998). Este modelo é aplicado e utilizado mundialmente por ser o método que melhor simula a transferência de água na forma de vapor a partir de uma extensa superfície de grama de porte baixo, cobrindo totalmente o solo e com adequado suprimento de água.

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{(T+273)} u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (01)$$

em que: ET_0 : é a Evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); R_n : é o saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$); G : é o fluxo de calor no solo, o qual é considerado igual à zero em escala diária ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$); u_2 : é a velocidade do vento a 2 m de altura (m s^{-1}); e_s : é a pressão de saturação de vapor atual (kPa); e_a : é a pressão do vapor d'água do ar (kPa); T : é a temperatura do ar média ($^{\circ}\text{C}$); Δ : é a inclinação da curva de pressão de vapor saturado versus temperatura ($\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$); γ : é a constante psicrométrica ($\text{kPa}^{\circ}\text{C}^{-1}$).

O saldo de radiação (R_n) é calculado pela diferença entre o saldo de radiação de onda curta ($R_{n,sw}$, $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$) e o saldo de radiação de ondas longas ($R_{n,lw}$, $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$):

$$R_n = R_{n,sw} - R_{n,lw} \quad (02)$$

O $R_{n,sw}$, pode ser obtido:

$$R_{n,sw} = (1 - \alpha)R_G \quad (03)$$

em que: R_G ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$) é a irradiação solar global e α é o albedo de superfície, igual a 0,23 para a cultura de referência.

O $R_{n,lw}$, pode ser calculado de acordo com a formulação baseada na lei de Stefan-Boltzmann:

$$R_{n,lw} = \sigma T_a^4 (0,34 - 0,14 \sqrt{e_a}) (1,35 \frac{R_G}{R_{so}} - 0,35) \quad (04)$$

em que: T_a é a temperatura do ar em (K) σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($4,903 \times 10^{-9} \text{ MJ m}^{-2} \text{K}^{-4}$) e R_{so} (MJ m^{-2}) é a radiação solar máxima.

A R_G normalmente é medida por piranômetro, caso as medidas não estejam disponíveis, R_G pode ser obtida por equações que dependem de outras variáveis meteorológicas encontradas mais facilmente nas estações. O cálculo de R_{SO} depende da altitude local (z , m) e da radiação solar no topo da atmosfera (R_0):

$$R_{SO} = (0,75 + 2 \times 10^{-5}z)R_0 \quad (05)$$

A R_0 para cada dia do ano e para diferentes latitudes pode ser estimada a partir da constante solar, da declinação solar e do dia do ano:

$$R_0 = \frac{24(60)}{\pi} R_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \cos(\omega_s)] \quad (06)$$

em que: R_{sc} é a constante solar = 0,0820 MJ m⁻² min⁻¹, d_r é a distância relativa inversa entre a Terra-Sol (eq. 7), ω_s ângulo horário solar (eq. 8) [Rad], φ é a latitude [rad], δ é a declinação solar (eq. 9) [rad]. R_0 é expresso em MJ m⁻² dia⁻¹. A evaporação equivalente correspondente em mm dia⁻¹ é obtida pela multiplicação R_0 por 0,408.

$$d_r = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} DJ\right) \quad (07)$$

$$\omega_s = \cos^{-1}[-\tan(\varphi)\tan(\delta)] \quad (08)$$

$$\delta = 0,409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} DJ - 1,39\right) \quad (09)$$

O fotoperíodo (N), utilizado na equação de Ångström, é obtido a partir de ω_s de acordo com:

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (10)$$

Os valores de e_s , Δ e γ pode ser expressos em função da temperatura do ar (T_a , °C) de acordo com as seguintes equações:

$$e_s = \frac{e^0(T_{max}) + e^0(T_{min})}{2} \quad (11)$$

$$e^0(T) = 0,6108 \exp\left[\frac{17,27T}{T+237,3}\right] \quad (12)$$

$$\Delta = 4098 \frac{e_s}{(T_a - 3,7)^2} \quad (13)$$

$$\gamma = 0,0675 \left(\frac{T_a - 0,0065z}{T_a}\right)^{5,256} \quad (14)$$

em que: z (m) é a altitude local. Além disso, uma vez e_s conhecida, a pressão de vapor real (e_a), é dependente da umidade relativa do ar, UR (%):

$$e_a = e_s \frac{UR}{100} \quad (15)$$

No cálculo de ET_0 na partição de tempo horária, o valor de G de uma superfície de grama totalmente coberta pode ser calculada em função de R_n (soma de $R_{n,sw}$ e $R_{n,lw}$), cujo valor difere para as horas na noite ($R_n \leq 0$) e horas no dia ($R_n > 0$), recomendado pela FAO-56 usar para G igual a 0,04* R_n para as horas noturnas e 0,2* R_n para horas no dia (MINACAPILLI et al., 2016).

A partir de ET_0 obtidos pela Eq. 1, para cada local, foi calculado para cada ano (9 anos de dados), médias a cada três anos e em seguida o valor médio total anual entre todos os anos da base de dados (2008 a 2016), ficando assim, uma base de dados médios de 365 dias. Da base total foi analisada a estatística descritiva por meio do gráfico diagrama de caixa. De posse da base média total foram realizadas as seguintes

análises: estatística descritiva, análise geoestatística e estudo da distribuição espaço-temporal. A variação temporal também foi estudada para a média a cada 3 anos.

2.3. Estatística descritiva dos dados e geoestatística

Para a base média total, verificou-se a presença de pontos discrepantes de ET_0 , na sequência, foi aplicada uma análise descritiva / exploratória dos dados por meio da média, desvio padrão, variância, valor mínimo e máximo, coeficiente assimetria (C_a) e curtose (C_k) (BORGES; DIAZ, 2020). Além disso, da estatística descritiva, foi observado à caracterização geral das informações, e verificado a variabilidade presente na base de dados de ET_0 . A variância e o desvio padrão fornece uma ideia de variabilidade de ET_0 em torno da média. Os valores máximos e mínimos permitem visualizar a menor e a maior ocorrência de ET_0 . O C_a mostra o afastamento de ET_0 em relação a um valor central e o C_k é utilizado para caracterizar como e quanto à distribuição de frequência de ET_0 se afasta da simetria (Silva et al., 2011), ou seja, indica o grau de achataamento de uma distribuição em relação com a distribuição normal.

Na modelagem da variabilidade temporal de ET_0 foi considerada a média a cada 3 anos e a média total de cada local. A definição do modelo de variabilidade foi realizada por meio de ajuste de variogramas clássicos de Matheron (Matheron, 1963), tendo como base as pressuposições de estacionariedade da hipótese intrínseca. O variograma é estimado por meio da semivariância, que considera a distância e a variação entre os pontos estimados e medidos. O primeiro passo foi a determinação da dependência temporal através da construção de um semivariograma experimental (Eq. 16):

$$\hat{y}(x_i, x_0) = \hat{y}(h) = \left(\frac{1}{2N(h)}\right) \sum_{i=1}^{N(h)} [(Z(x_i) - Z(x_i + h))^2] \quad (16)$$

em que: $\hat{y}(h)$: é a semivariância (dia), representando metade da soma das variâncias entre o ponto de estimativa e os pontos medidos próximos; $Z(x_i)$: é o valor amostrado em localização x_i ; $Z(x_i + h)$: é o valor amostrado à distância h de x_i ; $N(h)$: é o número de pares de pontos amostrais separados por uma distância h .

A dependência temporal é utilizada para analisar se o conjunto de dados de ET_0 dos locais tem uma relação com o tempo. Essa dependência ocorre quando a ET_0 de um momento está correlacionada com os valores dessa variável em outros momentos. A dependência temporal permite que modelos geoestatísticos façam previsões mais robustas e precisas, capturando as variações temporais, essenciais em fenômenos que mudam ao longo do tempo.

Distâncias curtas resultam em valores baixos de h e em pequenos valores de semivariância. A semivariância tende a aumentar à medida que h aumenta (HOYOS; RUIZ, 2023). A correlação espacial / temporal é empregada para analisar a variação dos dados com base na semivariância, que representa a discrepancia entre as variâncias pontuais medidas e as estimadas (OLIVER; WEBSTER, 1990; OLIVER; WEBSTER, 2015). A média é calculada sobre uma distância entre pares de locais dentro de cada intervalo e é baseada na variância mínima associada a uma correlação entre observações em distâncias curtas (BORGES; DIAZ, 2020).

Uma vez feito o semivariograma experimental a uma distância média, o próximo passo consiste no ajuste de modelos matemáticos que melhor se encaixam no conjunto

de dados, denominado de semivariograma teórico. A eficiência do ajuste aos semivariogramas experimentais foi avaliada pelos modelos linear, o esférico, o exponencial e o gaussiano, definidos pelas equações 17, 18, 19 e 20, respectivamente (SILVA et al., 2011).

$$Y^*(h) = C_0 + h \left(\frac{C}{A_0} \right) \quad 0 \leq h \leq A_0 \quad (17)$$

$$Y^*(h) = C_0 + C \left[\left(\frac{3h}{2A_0} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{A_0} \right)^3 \right] \quad 0 \leq h \leq A_0 \quad (18)$$

$$Y^*(h) = C_0 + C \left\{ 1 - \exp \left[-3 \left(\frac{h}{A_0} \right) \right] \right\} \quad 0 < h < d \quad (19)$$

$$Y^*(h) = C_0 + C \left\{ 1 - \exp \left[-3 \left(\frac{h}{A_0} \right)^2 \right] \right\} \quad 0 \leq h \leq d \quad (20)$$

Do ajuste de um modelo matemático aos valores calculados de $Y^*(h)$, são estimados: o efeito pepita ou “Nugget” (C_0) que representa o valor do semivariograma para distância zero entre as amostras e não pode ser relacionado com uma causa específica; o patamar ou “Sill” ($C+C_0$) que representa o valor de ET_0 no qual a variância é estabilizada, ou seja, a soma entre o efeito pepita (C_0) e a contribuição (C), o alcance (A_0) da dependência corresponde ao intervalo temporal no qual as observações são independentes, ou seja, distância limite de dependência temporal e d é a máxima distância na qual o variograma é definido e h o vetor de distâncias do qual é calculado o semivariograma. Os modelos e os parâmetros foram ajustados considerando a menor soma do quadrado dos resíduos, o maior coeficiente de determinação (R^2) e pelo coeficiente de correlação obtido pelo método de validação cruzada. Os parâmetros foram obtidos para compreender a estrutura temporal do fenômeno modelado. A variância aleatória foi concebida como uma descontinuidade na origem gerada por erros e/ou variabilidades que não foram amostrados.

Os parâmetros auxiliaram na análise correlação dos dados ou Índice de Dependência Temporal (IDT) calculada pela relação entre a semivariância estrutural ou temporal (C) e o patamar ($C+C_0$), por meio da (Eq. 21), proposta por Zimback (2001):

$$IDT = \frac{C}{(C+C_0)} \times 100 \quad (21)$$

Considera-se dependência temporal fraca para os valores menores ou iguais a 25%, entre 25 e 75% dependência temporal moderada e para os resultados maiores ou iguais que 75% dependência temporal forte. Esse parâmetro é expresso como percentagem do patamar, com o objetivo de facilitar a comparação do grau de dependência temporal das variáveis em estudo (TRANGMAR et al., 1985; BORGES; DIAZ, 2020). Neste estudo a dependência temporal está relacionada com os dias do ano. A seleção do melhor modelo é feita com base nos valores mais baixos da Soma de Quadrado Residuais (SQR). O SQR fornece uma medida precisa de quanto bem o modelo se ajusta aos dados do variograma. Em resumo, quanto menores as SQR, melhor o ajuste do modelo.

A qualidade dos ajustes dos modelos foi verificada por meio da validação cruzada, que consiste na relação entre os valores observados e os estimados pelos modelos. Após comprovar a dependência temporal de ET_0 , e com os parâmetros dos modelos ajustados realizou-se a interpolação, pelo método da krigagem ordinária, com intuito de

representar a distribuição temporal de ET_0 . Este procedimento envolve o uso de interpolação espacial para gerar dados espaciais / temporais contínuos sobre a ET_0 . A interpolação espacial / temporal é usada para estimar valores de ET_0 em pontos não amostrados a partir de dados medidos usando informações de variabilidade espacial / temporal (LI; HEAP, 2008).

A técnica da Krigagem produz valores sem viés e com a mínima variância em relação aos valores conhecidos (GREGO; VIEIRA, 2005), sendo o método mais utilizado (BHATTACHARJEE et al. 2019; HOYOS; RUIZ, 2023). O sistema de krigagem ordinária é resolvido minimizando-se a variância do erro. Os resultados da interpolação foram visualizados em mapas bidimensionais representando a distribuição temporal de ET_0 . Convém destacar que o desempenho do método de interpolação espacial / temporal utilizado depende da densidade amostral e da distribuição espacial / temporal dos pontos em que os dados foram coletados, da técnica de amostragem por conglomerados, tipo de superfície e quantidade de variância dos dados, entre outros fatores (LI; HEAP, 2011). Por fim, a interpolação dos dados de ET_0 e os mapas foram construídos utilizando softwares geoestatísticos. A técnica geral de estimativa é representada por:

$$\hat{z}(x_0) = \sum_{i=1}^{\eta} \lambda_i z(x_i) \quad (22)$$

em que: \hat{z} é o valor estimado no ponto x_0 , z é o valor medido no ponto x_i , λ_i é o peso do ponto amostrado e η é o número de pontos amostrados usados para a estimativa.

A equação (22) foi derivada considerando que amostras de estações meteorológicas próximas têm uma probabilidade maior de compartilhar valores e padrões semelhantes em comparação com amostras coletadas em estações meteorológicas distantesumas das outras (LI; HEAP, 2008). A precisão da krigagem depende do variograma utilizado para obter um preditor de variância mínima. Destaca-se que para utilizar a krigagem ordinária, os dados deve ter distribuição normal, caso contrário, a krigagem não linear deve ser usada ou os dados devem ser transformados em uma distribuição normal usando funções conversoras (WEBSTER; OLIVER 2001).

3. RESULTADOS

3.1. Estatística descritiva

A Figura 3 mostra o diagrama de caixa para os valores de ET_0 em Medicilândia, Pacajá e Placas. Observa-se o valor mínimo (traço inferior da caixa maior), o primeiro quartil (base da caixa maior), a mediana (linha central na caixa maior), média (caixa menor), o terceiro quartil (topo da caixa maior) e o máximo (traço superior da caixa) de ET_0 . Os asteriscos nos dois extremos são os outliers indicam possíveis valores discrepantes. Nos três locais os valores de ET_0 são negativamente assimétricos, ou seja, a mediana está próxima do terceiro quartil. Notam-se achataamentos diferentes nas caixas, com valores próximos para mediana e para média entre os locais. Observa-se que a mediana está próximo da média, que indica uma aproximação da distribuição normal dos dados de ET_0 . Este resultado é uma indicação do comportamento similar de ET_0 nos três locais. Este comportamento observado está alinhado com as condições climáticas prevalecentes de cada local.

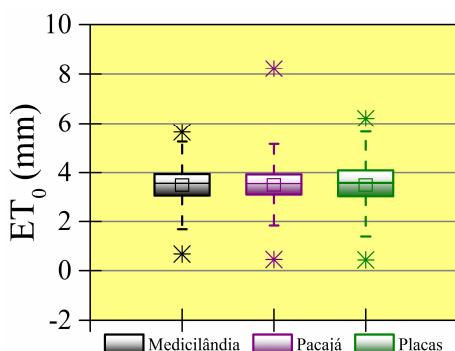


Figura 3. Diagrama de caixa para análise da estatística descritiva dos dados de ET_0 nos locais de estudo.

Figure 3. Box plot for descriptive statistics analysis of ET_0 data at study sites.

Os resultados referentes à estatística descritiva dos valores médios totais, com o número de observações, média, desvio padrão (SD), variância (s^2), valores máximo ($ET_{0\text{Max}}$), mínimo ($ET_{0\text{Min}}$), coeficientes de assimetria (C_a) e curtose (C_k), estão apresentados na Tabela 2. Estes valores foram obtidos a partir da média total de ET_0 . Optou-se por utilizar a média total, uma vez que o diagrama de caixa já mostra a estatística para a base completa. A análise da estatística descritiva é interessante para visualizar o comportamento de ET_0 e identificar possíveis valores discrepantes, igualmente no diagrama de caixa. Além disso, é possível comparar os valores médios total com toda a base de dados. Apesar de não ser necessária a normalidade dos dados para a aplicação de geoestatística, este é um comportamento desejado, pois o ajuste de um modelo matemático ao semivariograma é facilitado (Farias, 2008).

Observou-se que os valores médios foram próximos entre os três locais (variação de 3,413 a 3,487 mm), o SD

variou entre 0,316 a 0,452 mm, a s^2 mostrou valores entre 0,099 e 0,204 mm (Tabela 2). Os valores médios estão de acordo com os observados no diagrama de caixa. O que segundo Little; Hills (1978), quando o valor da média e da mediana é semelhante, os dados apresentam ou se aproximam da distribuição normal. O valor máximo variou de 4,11 a 4,58 mm e o mínimo entre 2,00 e 2,38 mm. Comparando com a base total, têm-se uma diferença nestes valores, que difere dos observados no diagrama de caixa.

Observa-se que Pacajá tem um padrão diferente nos resultados quando comparado com os dois outros locais. É bem provável que o comportamento seja inherente a base de dados de ET_0 e as características de cada local. Considerando a base total de dados, o Coeficiente de Variação (CV) tem valores de 21,79, 23,55 e 24,77 % para Medicilândia, Pacajá e Placas, respectivamente. Enquanto para os valores médios o CV foi de 12,97, 9,26 e 12,96 %, respectivamente em Medicilândia, Pacajá e Placas. Nas duas condições temos a maioria com média variabilidade e Pacajá (CV = 9,26 %) com baixa variabilidade. O CV tem a vantagem de permitir a comparação entre partições diferentes.

O valor de C_a indica que a distribuição de frequência de ET_0 apresenta assimetria positiva para Medicilândia e Placas, enquanto que apresenta simetria negativa para Pacajá. Na condição de assimetria positiva, a média é maior que a mediana e na assimetria negativa, a média é menor que a mediana. Quanto maior o C_k , mais assimétrica é a curva. Os dados de ET_0 indicam assimetria moderada ($0,15 < |C_a| < 1$). Com relação à curtose a ET_0 em Medicilândia e Placas apresentaram um comportamento Platicúrtica, caudas curtas e finas. Pacajá apresentou um comportamento potencialmente mesocúrtica, normal como caudas. No caso que tem comportamento leptocúrtica, é uma tendência de ET_0 apresentar maior dispersão dos dados em torno da média.

Tabela 2. Estatística descritiva para os dados de ET_0 médios totais.

Table 2. Descriptive statistics for total mean ET_0 data.

Local	N	Média (mm)	Mediana (mm)	s^2 (mm)	SD (mm)	Max (mm)	Min (mm)	C_a	C_k
Medicilândia	365	3,477	3,426	0,203	0,451	4,49	2,27	0,15 (0,13)	-0,91
Pacajá	365	3,413	3,457	0,099	0,316	4,11	2,20	-0,46 (0,13)	0,18
Placas	365	3,487	3,482	0,204	0,452	4,58	2,38	0,08 (0,13)	-0,90

N: número de observações; SD: desvio padrão; s^2 : variância; $ET_{0\text{Min}}$: valor mínimo; $ET_{0\text{Max}}$: valor máximo; C_a : coeficiente de assimetria; C_k : coeficiente de curtose.

N: number of observations; SD: standard deviation; s^2 : variance; $ET_{0\text{Min}}$: minimum value; $ET_{0\text{Max}}$: maximum value; C_a : coefficient of skewness; C_k : coefficient of kurtosis.

Os histogramas representando a distribuição de frequências para os dados de ET_0 (Figura 4) mostram uma assimetria negativa, o que significa dizer que a curva teve uma deformidade para à esquerda, ou seja, a média dos valores calculados foi menor que a mediana. O principal uso do histograma da distribuição de frequências é agrupar os valores de ET_0 em classes ou categorias para melhor representação gráfica e permitir uma visualização do comportamento de ET_0 , tais como a tendência, simétrica ou assimétrica (Guimarães, 2004), obtendo informações úteis sobre a população de dados coletados.

O teste de Shapiro-Wilk foi usado para análise da distribuição normal (cauda direita), como a amostra é maior que 50, foi utilizada uma aproximação normal para calcular o valor

p por meio do site:

(<https://www.statskingdom.com/index.html>). O teste de Shapiro-Wilk mostrou para os três locais os resultados: para Medicilândia P-valor = 0,000004264 e $W = 0,9742$; para Pacajá P-valor = 0,0005994 e $W = 0,9845$ e para Placas P-valor = 0,0000642 e $W = 0,9802$. O valor de W para cada local obtido pelo teste de Shapiro-Wilk, utilizado para avaliar estatisticamente se uma amostra aleatória segue uma distribuição normal ou não, os valores de W estão próximo de 1, indicando maior probabilidade dos dados pertencerem a uma distribuição normal. Destacamos que foi verificado o princípio da interpolação por meio da krigagem ordinária, cujo fundamento principal é a necessidade de se ter informações que atendam aos princípios da estacionariedade, apesar da falta de normalidade dos dados.

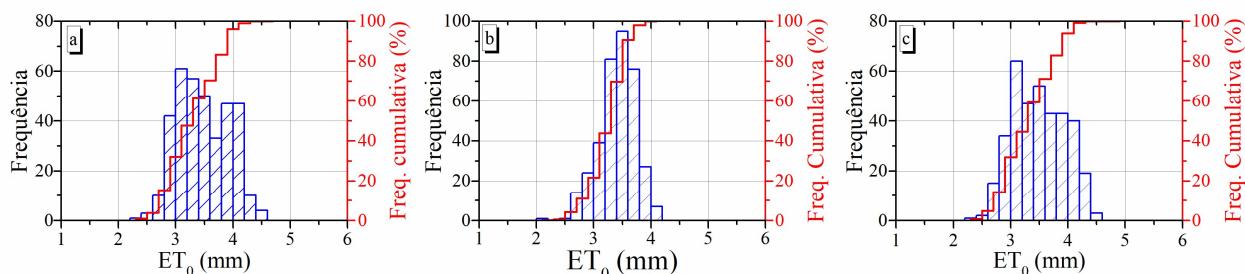


Figura 4. Distribuição de frequência e frequência cumulativa (Freq. Cumulativa (%)) dos valores de ET_0 para: a) Medicilândia, b) Pacajá e c) Placas.

Figure 4. Frequency distribution and cumulative frequency (Cumulative Freq. (%)) of ET_0 values for: a) Medicilândia, b) Pacajá and c) Placas.

3.2. Análise geoestatística

O efeito pepita foi diferente entre os locais, o patamar variou entre 0,1024 e 0,2224, o alcance mostrou maior valor para Medicilândia ($A_0 = 8,29$) (Tabela 3). Esses resultados mostram que a ET_0 tem flutuações entre locais, apesar dos

municípios estarem localizados na mesma região e da utilização da mesma variável para análise. Indicando assim, a necessidade de ajuste local do modelo. O modelo esférico foi o que apresentou melhor ajuste para Medicilândia e Placas, o modelo com melhor ajuste para Pacajá foi o exponencial.

Tabela 3. Parâmetros variográficos das médias totais de ET_0 em Medicilândia, Pacajá e Placas.

Table 3. Variographic parameters of the total ET_0 averages in Medicilândia, Pacajá and Placas.

Local	Modelo	C_0	$C + C_0$	A_0	R^2	SQR	$C / (C + C_0)$	IDT
Medicilândia	Esférico	0,0192	0,2224	8,29	0,953	2,2E-3	0,914	Forte
Pacajá	Exponencial	0,0142	0,1024	4,41	0,864	3,19E-4	0,861	Forte
Placas	Esférico	0,0187	0,2144	6,87	0,951	1,86E-3	0,913	Forte

C_0 : Efeito pepita, ($C+C_0$): Patamar, A_0 : Alcance (dias), R^2 : Coeficiente de Determinação, SQR: Soma dos quadrados dos resíduos, $C/(C+C_0)$: Classe de dependência Temporal, IDT: Índice de dependência Temporal.

C_0 : Nugget effect, ($C+C_0$): Plateau, A_0 : Range (days), R^2 : Coefficient of Determination, SQR: Sum of squared residuals, $C/(C+C_0)$: Time dependence class, TDI: Time dependence index.

Já o patamar é o valor do semivariograma correspondente ao alcance. A SQR foi baixa e o coeficiente de determinação para Medicilândia e Placas foi 0,953 e para Pacajá 0,864. Este parâmetro facilita a comparação do grau de dependência temporal de ET_0 , ou seja, quanto menor for à proporção do efeito pepita para o patamar do variograma, maior a continuidade do fenômeno e consequentemente menor a variância da estimativa e maior a confiança que se pode ter na estimativa de ET_0 . Naturalmente, a relação entre efeito pepita e o patamar, que caracteriza a estrutura de dependência temporal, diminuiu com a redução do número de pontos e o aumento da ET_0 .

Um semivariograma oferece insights sobre a estrutura espacial / temporal de uma variável e sua variação em diversas direções. Foram calculados semivariogramas e explorados diferentes modelos de semivariogramas comuns. Os resultados observados não apresentam efeito pepita puro (Figura 5). Nesse caso, é uma indicação que o

comportamento da ET_0 não é aleatório. Nos casos que ocorre efeito pepita, significa que existem componentes de variabilidade nos modelos de regressão e que os semivariograma não foram capazes de detectá-los. Ou então, o efeito pepita puro é importante e indica variabilidade não explicada, podendo ser decorrente de erros de medidas ou micro variações não detectadas.

Os semivariogramas apresentados na (Figura 5), mostram comportamento da variabilidade temporal. Em linhas gerais podem-se observar semelhanças entre variogramas de Medicilândia e Placas, com ajuste de modelo diferente para Pacajá. Os semivariogramas são omnidirecionais, ou seja, que compreendem pontos em todas as direções possíveis para serem estabelecidos os pares, supondo a ausência de tendências na área e não possuem dispersão nos valores de semivariância. Quando ocorre dispersão na semivariância as adversidades das condições climáticas dos locais, pode ser a explicação mais provável.

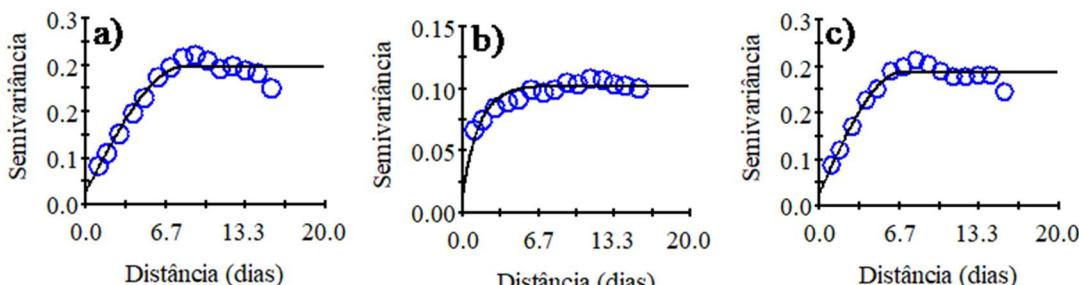


Figura 5. Variograma experimental das Médias Totais de ET_0 para: a) Medicilândia, b) Pacajá e c) Placas.

Figure 5. Experimental variogram of the Total ET_0 Averages for: a) Medicilândia, b) Pacajá and c) Placas.

3.3. Mapas bidimensionais de ET_0

As Figuras (6a, b, c) apresentam a regressão linear e os coeficientes de determinação (R^2) entre os valores de ET_0 médios diários totais obtidos em Medicilândia, Pacajá e Placas. Os de R^2 foram baixos para Medicilândia vs Pacajá e

Pacajá vs Placas, indicando que os valores entre os locais não têm o mesmo padrão de variabilidade. Já para Medicilândia vs Placas o valor de R^2 foi de 0,717. A Figura 7 (a – i) mostra a distribuição temporal de ET_0 , média a cada três anos, para Medicilândia, Pacajá e Placas.

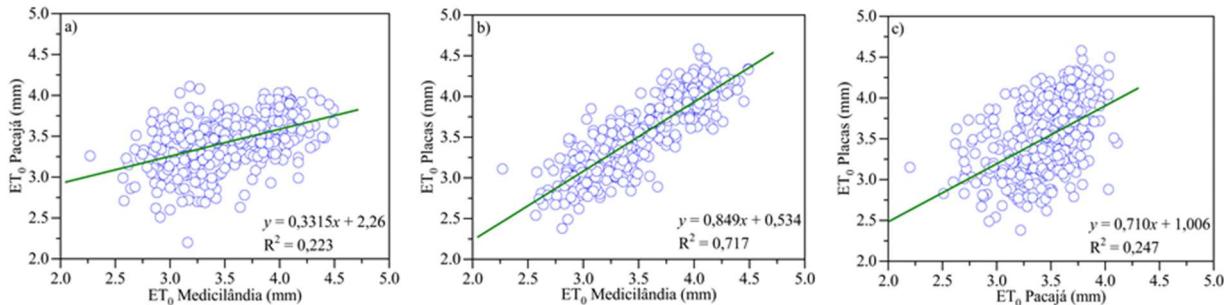


Figura 6. Regressão linear entre os valores de ET_0 médios diários totais: a) Medicilândia vs Pacajá, b) Medicilândia vs Placas e c) Pacajá vs Placas.

Figure 6. Linear regression between the total daily mean ET_0 values: a) Medicilândia vs Pacajá, b) Medicilândia vs Placas and c) Pacajá vs Placas.

A Figura 8 (a - c) permite a visualização da variação temporal de ET_0 em Medicilândia, Placas e Pacajá, respectivamente. Os dados foram interpolados pelo método de krigagem, onde foi possível determinar à estimativa, sem tendenciosidade e com mínima variância, dos locais medidos a partir dos dados. A variação temporal de ET_0 , em Medicilândia (Figura 8a), mostra um elevado gradiente, com maiores valores no período de estiagem (tonalidade mais escura) que está associado ao período de baixas precipitações e os menores valores na estação de cheia ou verão (tonalidade mais clara), que corresponde aos meses de maiores precipitações acumuladas (Figura 2). As observações são resultantes de uma maior demanda atmosférica devido à umidade relativa do ar ser menor entre os meses de maio a novembro, o que resulta na elevação da temperatura do ar, e consequentemente aumenta a demanda evaporativa do ar e implica em maior consumo de água pelas plantas / solos. Já em períodos chuvosos a umidade relativa do ar está maior entre os meses de dezembro a abril, o que resulta num aumento de ET_0 e menor consumo de água através das plantas / solos.

Em Pacajá é possível observar que os valores de ET_0 são menores no período chuvoso e maiores no período de estiagens (Figura 8b). A representação temporal mostra, portanto, que ocorre variação temporal ao longo de cada mês (durante os dias), sendo a variação observada ao longo dos meses (durante o ano). Esta diferença está associada às variações dos elementos climáticos que influenciam a ET_0 . O mapa para Placas segue comportamento similar ao observado em Medicilândia e Pacajá (Figura 8c). Os menores valores de ET_0 ocorrem no período chuvoso e maiores valores de ET_0 no período de estiagem. Em suma, os mapas estão de acordo com o IDT, mostrando ser fortemente dependente com o tempo.

Outro fator que pode ser determinante na variação de ET_0 é o albedo, definido como a fração global da radiação solar refletida pela superfície da Terra. Quanto menor o albedo, maiores são as taxas de ET_0 , o que leva à conclusão de que alterações significativas nos padrões de albedo causadas por mudanças no uso da terra podem alterar os padrões de evaporação e transpiração, como a substituição da vegetação arbórea por áreas agrícolas ou pastagens

(ALVES et al., 2021). O mapa do desvio-padrão mostra uma elevada flutuação anual no comportamento de ET_0 , sem predominância / tendência específica (Figura 9 a - c).

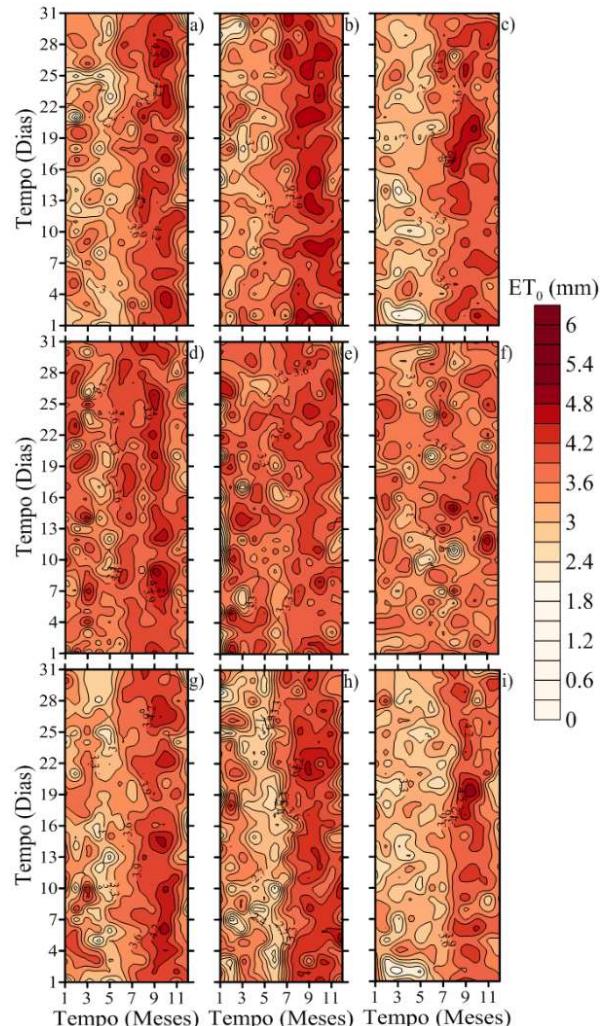


Figura 7. Variação temporal de ET_0 a cada 3 anos (entre 2008 a 2016) para: a – c) Medicilândia, d – f) Pacajá e g – i) Placas.

Figure 7. Temporal variation of ET_0 every 3 years (between 2008 and 2016) for: a – c) Medicilândia, d – f) Pacajá and g – i) Placas.

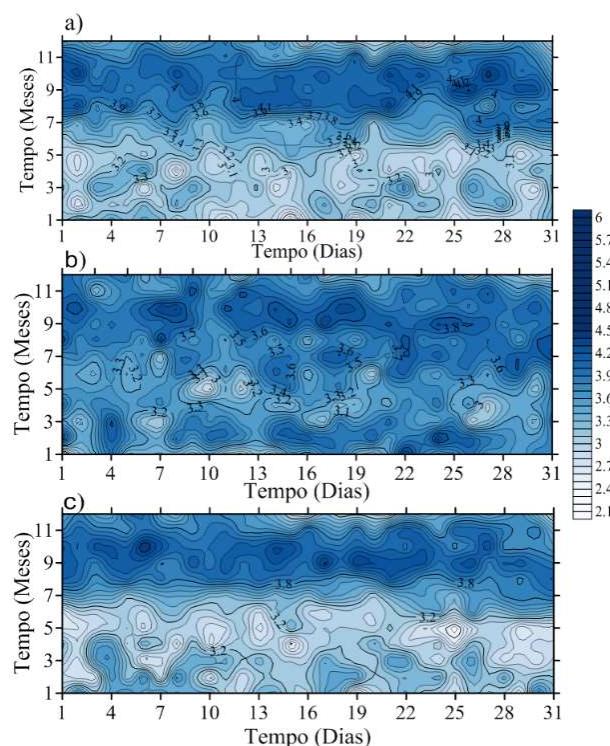


Figura 8. Variação temporal de ET_0 em: a) Medicilândia, b) Pacajá e c) Placas. Valores médios totais entre 2008 a 2016.

Figure 8. Temporal variation of ET_0 in: a) Medicilândia, b) Pacajá and c) Placas. Total average values between 2008 and 2016.

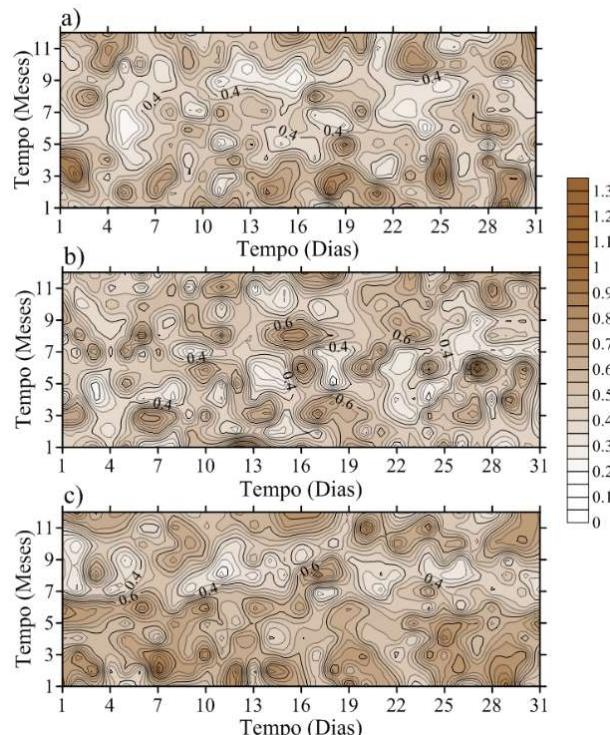


Figura 9. Desvio-Padrão de ET_0 em: a) Medicilândia, b) Pacajá e c) Placas.

Figure 9. Standard Deviation of ET_0 in: a) Medicilândia, b) Pacajá and c) Placas.

4. DISCUSSÃO

Dos histogramas, que representando a distribuição de frequências para os dados de ET_0 (Figura 4), observa-se maior frequência para valores de ET_0 compreendidos entre 3,5 e 4,0 mm. Existe um padrão na distribuição de frequência

para ET_0 entre Medicilândia e Placas, que são característicos do clima local. O comportamento da distribuição de frequência está de acordo com o coeficiente de curtose.

Os resultados da análise geoestatística mostram que os dados de ET_0 apresentam dependência temporal forte ($IDT \geq 75\%$) em todos os locais estudados. Segundo Kravchenko (2003), variogramas com estrutura de dependência temporal forte acima de ($IDT \geq 75\%$) geram dados krigagem mais precisos que aqueles gerados com dependência fraca menor que ($IDT \leq 25\%$), devido à menor contribuição do componente aleatório na variabilidade dos dados. A inclusão de covariáveis pode aumentar a dependência temporal entre os dados, o que implica uma redução na variabilidade e/ou na variação em distâncias curtas.

A partir dos mapas gerados é possível observar que os meses com maiores valores de ET_0 estão entre agosto e novembro para todos os anos e para todos os locais (Figura 7a – i). Observam-se variações desses valores ao longo dos anos para o mesmo tempo. Tais variações possam ser explicadas pelos diferentes fenômenos climáticos que ocorrem periodicamente, causando variabilidade e influenciando o clima local. As variações nos padrões atmosféricos, como por exemplo, a nebulosidade e o nível de precipitação causada por eventos climáticos como El Niño e La Niña, podem causar flutuações de ET_0 . Dadas as diferentes condições climáticas e características intrínsecas da ET_0 nos locais, fica claro que em cada região esses fenômenos atmosféricos afetam de forma diferente. Durante o período de observações foi registrado a ocorrência de El Niño entre 2009 e 2010 com intensidade forte e entre 2015 e 2016 com intensidade moderada. Enquanto que houve ocorrência de La Niña com intensidade moderada entre 2007 – 2008 e 2010 – 2011. Nos anos de ocorrência de El Niño ocorre redução das chuvas no leste e norte da Amazônia. Já nos anos de La Niña ocorre aumento na intensidade da estação chuvosa na região. Mudanças nos padrões de precipitação e temperatura do ar afeta diretamente a variabilidade espaço-temporal de ET_0 . Portanto, os padrões observados na flutuação de ET_0 pode ser uma indicação da influência dos fenômenos meteorológicos. Além disso, tanto a temperatura quanto a velocidade do vento são fatores meteorológicos cruciais para a evapotranspiração, seus padrões afetam tanto o componente térmico quanto o aerodinâmico do cálculo de ET_0 , como destacado por Allen et al. (2006). Portanto, qualquer mudança temporal ou espacial nesses elementos tem um impacto direto na estimativa da ET_0 .

Os resultados podem ser utilizados no planejamento dos recursos hídricos em geral, uma vez que os padrões de distribuição temporal de ET_0 , ao longo do ano, foram apresentados. Com isso, é possível analisar épocas de menor/maior disponibilidade hídrica, auxiliando em estudos e realização do zoneamento agroclimático, bem como para o dimensionamento do sistema de irrigação das culturas, nos projetos e manejos em geral. Por conseguinte, podemos destacar também que para o agricultor/produtor desenvolver suas atividades agrícolas, o conhecimento da variação temporal de ET_0 , é importante para definir o melhor manejo de água no ciclo vegetativo das culturas, através de informações de ET_0 é possível estabelecer o melhor período para o plantio das culturas, e assim evitando perdas. Esses dados são aplicáveis a diversos tipos de planejamento, especialmente no setor agrícola, pois permitem estimar as necessidades hídricas

esperadas, ajustando-se aos coeficientes de cultura, como mencionado por Allen et al. (2006), o que facilita a otimização do uso da água disponível. Além disso, a análise temporal de ET₀, conforme observado nos resultados, confirma a influência significativa das variáveis meteorológicas sobre os valores da ET₀.

A aplicação de modelos inteligentes deve ser realizada de forma criteriosa, utilizando-se ferramentas para a validação dos resultados. As disparidades entre os métodos de interpolação são influenciadas principalmente pela natureza das variáveis analisadas, pela distribuição espacial dos dados, pela quantidade de amostras disponíveis, pelas suposições adotadas e pelos critérios utilizados para a interpolação, mais do que pelo próprio método de interpolação (KAMALI et al., 2015). Vários métodos geoestatísticos demonstram precisão variada.

Por fim, são vários os fatores que influenciam a distribuição temporal de ET₀ em Medicilândia, Pacajá e Placas, principalmente, entre o período de estiagem e o período chuvoso, entre eles pode-se destacar a latitude, longitude a vegetação de cada região. Além da influência do homem como os avanços do desmatamento, as queimadas, abertura de grandes áreas para implantação de monoculturas e pecuária. Portanto, é importante destacar o papel importante do monitoramento da espacialização da ET₀, para que seja possível estabelecer estratégias de mitigação de mudanças climáticas, estresse hídrico e manejo de água no solo.

5. CONCLUSÕES

O índice de dependência temporal foi forte, com dois locais ajustados por modelos geoestatísticos esférico e um exponencial. A ET₀ apresentou sazonalidade, aumentando nos meses secos e diminuindo nos meses chuvosos. A krigagem mostrou-se vantajosa por considerar a autocorrelação temporal na estimativa da ET₀ por variogramas. Os mapas facilitaram a organização e previsão da distribuição temporal da ET₀, contribuindo para melhorar a gestão da irrigação e criar mapas das necessidades hídricas ao longo do tempo.

6. REFERÊNCIAS

- ALLEN, R.; PEREIRA, L.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements**. Roma: FAO, 1998. 328p. (Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Evapotranspiración del cultivo**. Roma: FAO, 2006. p. 1-79.
- ALVES, H. J. P.; DOS SANTOS, L. M.; BATISTA, B. D. O. Geostatística espaço-temporal aplicada ao albedo de superfície: O caso do sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 9, n. 3, p. 48-62, 2021. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5703280>
- ALVARES,C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES,J. L. de M.; SPAROVEK, G. . Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, p. 711-728, 2014. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.
- BHATTACHARJEE, S.; GHOSH, S. K.; CHEN, J. **Semantic Kriging for Spatio-temporal Prediction**. Singapore: Springer, 2019. 127p.
- BORGES, M. I. S.; DÍAZ, N. M. M. Evaluación comparativa y predicción espacial de la evapotranspiración de referencia mediante métodos geoestadísticos. **Bioagro**, v. 32, p. 107-116, 2020.
- CHILDSD, C. **Interpolating surfaces in ArcGIS Spatial Analyst**. ArcUser, Redlands. In: Conference proceeding. [Fredericksburg]: ESRI Education Services, 2004. p. 32-35.
- CHILÈS, J.-P.; DELFINER, P. **Geostatistics: modeling spatial uncertainty**. 2nd Ed. John Wiley e Sons, 2012. 689p. <https://doi.org/10.1002/9781118136188.fmatter>.
- FARIAS, V. D. da S.; COSTA, D. L. P.; PINTO, J. V. de N.; DE SOUZA, P. J. O. P.; DE SOUZA, E. B.; ORTEGA-FARIAS, S. Calibration of reference evapotranspiration models in Pará. **Acta Scientiarum**, v. 42, n. 1, p. 2-10, 2020. <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v42i1.42475>
- FARIAS, N. L. **Variabilidade espacial de atributos físicos-hídricos dos solos da Região Norte Fluminense**. 65f. Dissertação [Mestrado em Agronomia – Ciências do Solo] – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2008.
- GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas de solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 2, p. 169-177, 2005. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000200002>
- GUIMARÃES, E. C. **Geoestatística básica e aplicada**. Uberlândia, UFU, 2004. 78p. v. 1.
- HOYOS, L. S.; RUIZ, B. J. Mapping of solar insolation using air temperature in tropical and mountainous environments. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 135, e12, 2023. <https://doi.org/10.1007/s00703-022-00945-y>
- JAMALY, M.; KLEISL, J. Spatiotemporal interpolation and forecast of irradiance data using Kriging. **Solar Energy**, v. 158, p. 407-423, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.09.057>
- JIN, Z.; LIANG, W.; YANG, Y.; ZHANG, YAN, J.; CHEN, X.; LI, S.; MO, X. Separating vegetation greening and climate change controls on evapotranspiration trend over the Loess Plateau. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 1-15, 2017. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08477-x>
- JUNG, M.; REICHSTEIN, M.; CIAIS, P.; SENEVIRATNE, S.I.; SHEFFIELD, J.; GOULDEN, M. L.; BONAN, G.; CESCATTI, A.; CHEN, J.; DE JEU, R. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. **Nature**, v. 467, n. 7318, p. 951-954, 2010. doi:10.1038/nature09396
- KAMALI, M. I.; NAZARI, R.; FARIDHOSSEINI, A.; ANSARI, H.; ESLAMIAN, S. The determination of reference evapotranspiration for spatial distribution mapping using geostatistics. **Water Resour Manage**, v. 29, p. 3929-3940, 2015. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1037-4>
- KÖPPEN, W., GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha: Verlag Justus Perthes. Wall-map 150 cm x 200 cm, 1928.
- LANDIM, P. M. B.; STURARO, J. R.; MONTEIRO, R. C. **Krigagem ordinária para situações com tendência regionalizada**. Rio Claro: DGA, IGCE, UNESP, 2002. 12p. (Geomatemática - Texto Didático, 06)
- LI, J.; HEAP, A. D. **A Review of spatial interpolation methods for environmental scientists**. Geoscience Australia, 2008. 137p. Disponível em: https://d28rz98at9flks.cloudfront.net/68229/Rec2008_023.pdf

- LI, J.; HEAP, A. D. A review of comparative studies of Spatial interpolation methods in environmental sciences: performance and impact factors. **Ecological Informatics**, v. 6, p. 228-241, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2010.12.003>
- LI, J.; HEAP, A. D. Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: a review. **Environmental Modelling & Software**, v. 53, p. 173-189, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.12.008>
- LITTLE, T. M.; HILLS, F. J. **Agricultural experimentation**. New York: John Wiley& Sons, 1978. 350p.
- LYRA, G. B.; SANTOS, C. M.; ABREU, M. C. ET AL. Estimates of monthly global solar irradiation using empirical models and artificial intelligence techniques based on air temperature in Southeastern Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 152, p. 1031-1051, 2023. <https://doi.org/10.1007/s00704-023-04442>
- MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**, v. 58, p. 1246-1266, 1963. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.58.8.1246>
- MINACAPILLI, M.; CAMMALLERI, C.; CIRAOLO, G.; RALLO, G.; PROVENZANO, G. Using scintillometry to assess reference evapotranspiration methods and their impact on the water balance of olive groves. **Agricultural Water Management**, v. 170, p. 49-60, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.12.004>
- MORENO, A.; GILABERT, M. A.; MARTÍNEZ, B. Mapping daily global solar irradiation over Spain: a comparative study of selected approaches. **Solar Energy**, v. 85, p. 2072-2084, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.05.017>
- OLIVER, M. A.; WEBSTER, R. **Basic Steps in Geostatistics: The Variogram and Kriging**. Springer Cham, 2015. 100p.
- OLIVER, M. A.; WEBSTER, R. Kriging: a method of interpolation for geographical information systems. **International Journal of Geographical Information Systems**, v. 4, p. 313-332, 1990. <https://doi.org/10.1080/02693799008941549>
- RIVINGTON, M.; MATTHEWS, K. B.; BELLOCCHI, G.; BUCHAN, K. Evaluating uncertainty introduced to process-based simulation model estimates by alternative sources of meteorological data. **Agricultural Systems**, v. 88, p. 451-471, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2005.07.004>
- SANTOS, C. M.; ROSSI, T. J.; DAL PAI, A.; ESCOBEDO, J. F.; DE SOUZA, A.; DA SILVA, M. P.; KAMBEZIDIS, H. D. Analysis of the total, annual, and inter-annual hourly mean direct solar normal irradiation. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 15, e219, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12517-022-09505-5>
- SANTOS, C. A. C.; MARIANO, D. A.; NASCIMENTO, F. C. A.; DANTAS, F. R. C.; OLIVEIRA, G.; SILVA, M. T.; SILVA, L. L.; SILVA, B. B.; BEZERRA, B. G.; SAFA, B.; MEDEIROS, S. S.; NEALE, C. M. U. Spatio-temporal patterns of energy exchange and evapotranspiration during an intense drought for drylands in Brazil. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 85, e101982, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101982>
- SCOLUM, T. A.; MCMASTER, R. B.; KESSLER, F. C.; HOWARD, H. H. **Thematic cartography and geography visualization**. Upper Saddle River: Prentice Hall, 518p. 2005.
- SENTELHAS, P. C.; GILLESPIE, T. J.; SANTOS, E. A. Evaluation of FAO Penman-Monteith and alternative for estimating reference evapotranspiration with missing data in southern Ontario, Canada. **Agricultural Water Management**, v. 97, p. 635-644, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.12.001>
- SILVA, A. F.; QUARTEZA, W. Z.; ZIMBACK, C. R. L.; LANDIM, P. M. B. **Aplicação da geoestatística em a ciências agrárias**. Botucatu: FEPAF, 2011. 136p.
- SILVA, F. D. S.; COSTA, R. L.; ANTONIO, M. A. V.; AFONSO, E. O.; SANTOS, D. M.; MATEUS, N. P. A.; ANTONIO, J. F. Tendências observadas da evapotranspiração potencial no Estado de Alagoas (1961-2016). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 11, n. 1, p. 28-43, 2018. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v11.1.p028-043>
- SILVA, M. B. P. da; SOUZA, V. C. de.; CREMASCO, C. P.; CALÇA, M. V. C.; SANTOS, C. M. dos; CREMASCO, C. P.; GABRIEL FILHO, L. R. A.; RODRIGUES, S. A.; ESCOBEDO, J. F. Estimativa da evapotranspiração de referência do Planalto Paulista por meio de regressões múltiplas com dados ausentes estimados via análise de componentes principais. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 8, e31120, 2022a. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i8.31120>
- SILVA, M. B. P. da; SOUZA, V. C. de; PIRES CREMASCO, C.; CALÇA, M. V. C.; SANTOS, C. M. dos; CREMASCO, C. P.; GABRIEL FILHO, L. R. A.; RODRIGUES, S. A.; ESCOBEDO, J. F. Modelos de Machine Learning Aplicados na estimativa da evapotranspiração de referência do planalto ocidental paulista. **Nativa**, v. 10, n. 4, p. 506-515, 2022b. <https://doi.org/10.31413/nativa.v10i4.13922>
- TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, v. 38, n.1, p. 45-93, 1985. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60673-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60673-2)
- VILANOVA, M. R. N.; SIMÕES, S. J. C.; TRANNIN, I. C., B. Interpolação geoespacial da evapotranspiração de referência (ET₀) em regiões com escassez de dados: estudo de caso no Sul de Minas Gerais. **Revista Ambient & Água**, v. 7, n. 2, p. 179-194, 2012. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.763>
- WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. **Geostatistics for environmental scientists**. Chichester: Wiley, 2001. 271p. <https://doi.org/10.1002/9780470517277>
- WMO_World Meteorological Organization. **Guide to meteorological instruments and methods of observation**. 7 Ed. Geneva, Switzerland, 2008. 681p. <https://www.weather.gov/media/epz/mesonet/CWOP-WMO8.pdf>.
- ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade**. 114p. Tese [Livre-Docêncial] – Faculdade de Ciências Agronomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

Agradecimentos: Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) por disponibilizar os dados de séries temporais. Os autores agradecem ao Projeto: 5383 - SYNERGIA/UFPA/FADESP – Cadeia Produtiva da Cacauicultura pelo apoio financeiro. A primeira autora e o último autor agradecem a Universidade Federal do Pará pelas bolsas de Iniciação Científica.

Contribuição dos autores: D.A.L.R.: conceitualização, metodologia, software, validação, análise formal, investigação, recursos, redação – preparação do rascunho original, redação – revisão e edição; C.M.S.: conceitualização, metodologia, software, validação, análise formal, investigação, recursos, curadoria de dados, redação – preparação do rascunho original, redação – revisão e edição, supervisão, administração do projeto; V.D.S.F.: metodologia, software, investigação, recursos, redação – preparação do rascunho original, redação – revisão e edição; M.B.P.S.: software, recursos, redação – revisão e edição, visualização; E.T.T.: software, recursos, redação – revisão e edição, visualização; G.S.S.: software, recursos, redação – revisão e edição, visualização. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Financiamento: Não aplicável.

Revisão por comitê institucional: Não aplicável.

Comitê de Ética: Não aplicável.

Disponibilidade de dados: Os dados desta pesquisa poderão ser obtidos mediante solicitação ao autor correspondente via e-mail.

Conflito de interesses: Os autores declararam não haver conflito de interesses.