

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE GERADORES DE DADOS EM SÉRIES METEOROLÓGICAS PARA O MUNICÍPIO DE ITACOATIARA-AM*

ARISTÓTELES DE JESUS TEIXEIRA FILHO¹; LUCAS MELO VELLAME² E AUREO SILVA DE OLIVEIRA³

*Parte 1: Trabalho retirado do Relatório de Pesquisa de Pós-Doutorado “Preenchimento de falhas em observações meteorológicas importantes na estabilidade da modelagem de evapotranspiração potencial de referência para Município de Itacoatiara, AM”.

¹Professor Titular do Curso de Agronomia, Instituto de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal do Amazonas, Campus Itacoatiara; Brasil, aristoteles@ufam.edu.br; ORCID: 0000-0002-0123-7515.

²Professor Titular do Curso de Agronomia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas, Núcleo de Engenharia de Água e Solo, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Campus de Cruz das Almas; Brasil, lucasvellame@ufrb.edu.br; ORCID: 0000-0001-7649-5773.

³Professor Titular do Curso de Agronomia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas, Núcleo de Engenharia de Água e Solo, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Campus de Cruz das Almas, Brasil, aureo@ufrb.edu.br; ORCID: 0000-0001-7661-551X.

1 RESUMO

O escopo desta investigação foi avaliar o desempenho de geradores de dados de séries meteorológicas de 2019 a 2023 usando o método de interpolação linear, os softwares Easy-Fit e o WeatherMan, para o município de Itacoatiara, Amazonas. No Brasil, a principal fonte de dados oriundos de estações meteorológicas é administrada e disponibilizada pelo Instituto Nacional de Meteorologia, e a série histórica disponibilizada, normalmente, apresenta falhas em escala temporal horária, diária ou mensal. A falta de continuidade nas séries de dados pode levar a conclusões errôneas em processos que dependem diretamente do clima, como a agricultura e o planejamento do uso dos recursos naturais. O estudo foi desenvolvido com os dados meteorológicos da região centro-leste do Estado do Amazonas. As falhas foram preenchidas usando interpolação linear e os geradores de dados climatológicos Easy-Fit e WeatherMan, sendo os resultados comparados com a normal climatológica disponível. A correlação entre a normal climatológica e a normal provisória do parâmetro temperatura máxima mensal média mostrou a existência de regressão, de modo que os três métodos podem ser sugeridos para o preenchimento de falhas, quando não se dispõe de dados completos. O método de interpolação linear e os geradores Easy-Fit e WeatherMan apresentaram potencial para o preenchimento de falhas em séries meteorológicas mensais da região de Itacoatiara-AM, mesmo diante da limitada disponibilidade de dados completos.

Palavras-chave: variáveis meteorológicas, modelagem estatística, agrometeorologia.

TEIXEIRA FILHO, A. de J.; VELLAME, L. M. E.; OLIVEIRA, A. S. de
PERFORMANCE EVALUATION OF WEATHER DATA GENERATORS BASED ON
TIME SERIES FOR THE MUNICIPALITY OF ITACOATIARA-AM

2 ABSTRACT

The purpose of this investigation was to evaluate the performance of weather data generators for the municipality of Itacoatiara, Amazonas, Brazil, on the basis of time series from 2019 to 2023 by the following methods: linear interpolation, easy-fit, and WeatherMan. In Brazil, INMET (National Institute of Meteorology) is the main source of meteorological data, but gaps are very common at hourly, daily, and monthly time scales. The lack of continuity in data series may lead to erroneous conclusions in studies that depend on it. on these data, such as agricultural and natural resource management planning. In this study, monthly meteorological data from the central-eastern region of the state of Amazonas were used. Missing data were filled using linear interpolation, and the climatological data generator Easy-Fit and WeatherMan Estimated values were then compared with the available climatological normal. The correlation between the climatological normal and the provisional normal of the mean monthly maximum temperature parameter demonstrated the existence of regression, indicating that the three methods may be recommended for gap filling. when incomplete datasets are available. The linear interpolation, easy-fit, and WeatherMan methods showed potential for filling the gaps in monthly meteorological series in the Itacoatiara-AM region.

Keywords: weather variables, statistical modeling, agrometeorology.

3 INTRODUÇÃO

Na região Norte, em particular no Estado do Amazonas, o número de estações meteorológicas (convencionais e automáticas) é pequeno, quando comparado à extensão territorial do Estado, e, muitas vezes, há falhas nas observações em razão de pane operacionais, deixando a localidade desprovida de informações reais. As cidades são geograficamente distantes uma das outras, o que leva à necessidade, em muitos casos, de busca por alternativas para gerar tais informações, tornando o banco de dados robusto para uso em planejamentos agrometeorológicos, os quais são fundamentais na tomada de decisão. Embora existam diversos métodos de preenchimento de falhas meteorológicas, ainda há incertezas

sobre o desempenho dessas abordagens em regiões tropicais úmidas com baixa densidade observacional, como a Amazônia.

Para garantir a confiabilidade de muitos estudos climáticos, especialmente daqueles que analisam a variabilidade do clima, são necessários dados confiáveis e homogêneos, tendo em vista que os resultados das análises com dados heterogêneos podem induzir a conclusões contraditórias e errôneas (Santos, 2012). As falhas nos dados ocorrem quando a coleta se apresenta deficitária em algum momento, seja pela ausência do coletor ou por erros e sobreposição de dados dos instrumentos de coleta, o que torna necessária a aplicação de equações para o preenchimento dessas lacunas (Diaz; Pereira; Nóbrega, 2018). Alguns métodos para a análise desses dados podem ser adequados a essa situação, mas a

maioria deles exige que a série esteja completa (Guzmán, 2018). Vários métodos podem ser utilizados no preenchimento de falhas de dados meteorológicos, incluindo a utilização de médias de dados observados (normais climatológicas) ou dados sintéticos de geradores de dados (Oliveira *et al.*, 2010).

A estimação de dados meteorológicos falhos pode ser feita utilizando métodos organizados em três categorias básicas: (i) dentro da estação; (ii) entre estações; e (iii) baseados em regressão (Allen; Degaetano, 2001). A primeira categoria foi a que mais se adequou aos propósitos da investigação. A segunda se baseia na hipótese de que a diferença entre as temperaturas diárias das estações próximas é igual à diferença entre as médias mensais das temperaturas dessas estações vizinhas; contudo, não foram constatadas, na região, estações adjacentes com dados completos. Por fim, a terceira categoria pressupõe a existência de dados disponíveis de uma ou mais estações vizinhas, o que também demanda a completude dessas informações. Nesse cenário, há a dificuldade de obter acesso a um conjunto de dados robusto proveniente das estações meteorológicas disponíveis na ocasião da pesquisa, o que é de responsabilidade do órgão gestor. Portanto, essa dificuldade levou à necessidade de se recorrer aos geradores de dados.

A maioria dos modelos de simulação da produção agrícola exige dados climáticos diários. Normalmente, esses dados estão disponíveis para o desenvolvimento e a validação dos modelos; porém, em muitos casos, não há disponibilidade de dados meteorológicos para a análise de longos períodos em diferentes localidades, o que exige a utilização de modelos geradores de dados meteorológicos (Meinke *et al.*, 1995). Recentemente, vários geradores de dados foram desenvolvidos para simular dados meteorológicos diários (Bristow; Campbell,

1984; Richardson; Wright, 1984), como o modelo WGEN (Richardson; Wright, 1984). No caso dos modelos utilizados no DSSAT (Decision Support System for Agrotechnology Transfer), o conjunto mínimo de dados climáticos requerido inclui valores diários de radiação solar, temperaturas máxima e mínima e precipitação (Hoogenboom; Jones; Boote, 1992). A radiação solar é importante para a estimativa da fotossíntese e da evapotranspiração; a temperatura, para a determinação das taxas de crescimento e desenvolvimento da cultura; e a precipitação, para o atendimento de suas necessidades hídricas (Ritchie; Godwin; Singh, 1990).

A falha na coleta ou no registro dessas informações meteorológicas é ocasionada por diversos fatores. Sobretudo, os que mais atingem as cidades do interior do Estado do Amazonas são a burocracia na manutenção dos aparelhos e o desconhecimento da população sobre a importância de manter uma estação meteorológica em perfeito funcionamento, visto que determinados equipamentos acabam sendo alvos de vandalismo ou furto (Nascimento *et al.*, 2009). Na modelagem, tornam-se necessárias pesquisas que avaliem formas de preenchimento dos intervalos de dados faltantes nas séries históricas, de modo a melhorar as estimativas da evapotranspiração potencial de referência e, consequentemente, dos processos em que essa variável é utilizada (Gionanella *et al.*, 2021).

O preenchimento de falhas de dados meteorológicos na Amazônia é limitado pela baixa densidade de estações meteorológicas e pela grande distância entre elas quando comparado às regiões Sul e Sudeste do País, o que leva à redução da precisão dos métodos estatísticos. A qualidade na modelagem é prejudicada pelos dados faltantes na estação meteorológica de Itacoatiara, AM. Portanto, o estudo teve o objetivo de avaliar o desempenho de geradores de dados de séries

meteorológicas de 2019 a 2023, usando o método da interpolação linear, o Easy-Fit e o WeatherMan, para o município de Itacoatiara, Amazonas.

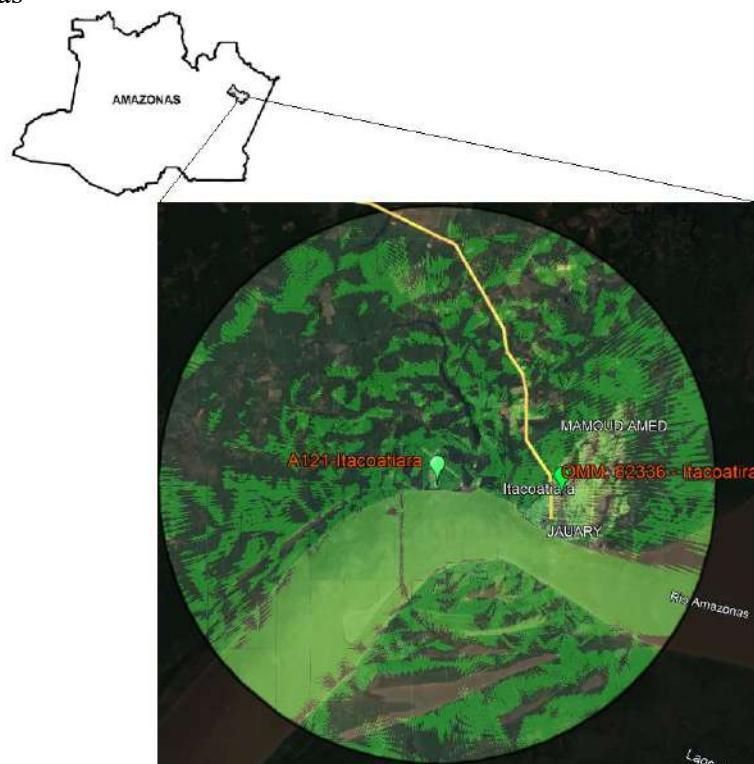
4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Localização Experimental

O estudo foi desenvolvido com dados meteorológicos provenientes da região centro-leste do Estado do Amazonas. A região conta com duas estações meteorológicas (uma convencional e uma automática) pertencentes à rede do Instituto Nacional de Meteorologia,

localizadas no município de Itacoatiara, AM (Figura 1). No Tabela 1, constam as localizações da estação da Organização Meteorológica Mundial (WMO: 82336) e da estação automática (A121). As investigações foram realizadas a partir de uma normal climatológica provisória obtida do período de 2009 a 2023, junto ao Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Em particular, a normal climatológica provisória referida está conforme a WMO (1989), estabelecida como “uma série de dados com mínimo de 10 anos e inferior a 30 anos”.

Figura 1. Distribuição espacial das estações meteorológicas A121 e OMM 82336 em Itacoatiara, Amazonas



Fonte: Autores (2025).

Tabela 1. Localização das estações meteorológicas convencionais

Nome	UF	Latitude °	Longitude	Altitude m	Data de Instalação	Código
Itacoatiara	AM	-3,13694444	-58,44277777	19,16	31/12/1926	82336
	AM	-3,13333333	-58,48277777	41,54	16/04/2008	A121

Fonte: Autores (2025)

4.2 Metodologia Experimental

Na série meteorológica de 2009 a 2023 foram identificados 12,8%, 13,9%, 8,9%, 8,3%, 11,1%, 14,4%, 12,2% e 39,4% de dados faltantes (Quadro 2 e Quadro 3) nas variáveis temperatura máxima, mínima, umidade relativa máxima, mínima, média, velocidade do vento, pressão atmosférica e radiação solar global, respectivamente. As séries de dados

das estações vizinhas (Tabela 2) foram analisadas. Após ser constatada a inexistência de dados completos em estações distanciadas em até 150 km da Estação Meteorológica de Itacoatiara (A121), inviabilizou-se o preenchimento das falhas por meio de regressão linear, o que levou à necessidade de mudar a forma de completar os dados faltantes.

Quadro 2. Meses com dados faltantes das variáveis meteorológicas de 2009 (09) a 2023 (23)

Meses	Temperatura Mínima do ar						Temperatura Máxima do ar					
	09	12	13	19	20	21	09	12	13	19	20	21
J												
F												
M												
A												
M												
J												
J												
A												
S												
O												
N												
D												

Meses	Umidade Relativa Mínima do ar					Umidade Relativa Máxima do ar				
	16	18	19	20	21	16	18	19	20	21
J										
F										
M										
A										
M										
J										
J										
A										
S										
O										
N										
D										

Fonte: Autores (2025)

Quadro 3. Meses com dados faltantes das variáveis meteorológicas de 2009 (09) a 2023 (23)

Meses	Pressão Atmosférica Média do Ar									
	09	10	12	13	16	18	19	20	21	23
J										
F										
M										
A										
M										
J										
J										
A										
S										
O										
N										
D										
Meses	Velocidade do Vento Média do ar									
	09	10	12	13	16	18	19	20	21	23
J										
F										
M										
A										
M										
J										
J										
A										
S										
O										
N										
D										

Fonte: Autores (2025)

Tabela 2. Localização das Estações vizinhas a A121

Nome	UF	Latitude	Longitude	Distância	Altitude	Código
		°		km	m	
Itacoatiara	AM	-3,13694444	-58,44277777	-	41,54	A121
Maues	AM	-3,39888888	-57,67388888	94,34	25,49	A122
Parintins	AM	-2,63916666	-56,75611111	198,26	18,72	A123
Urucará	AM	-2,53472221	-57,75805555	105,86	18,49	A124
Rio Urubu	AM	-2,6336111	-59,60055555	139,32	112,84	A125

Fonte: Autores (2025)

As falhas de dados foram preenchidas pelo método dentro da estação (Allen; Degaetano, 2001), a partir de informações horárias e diárias que foram convertidas em médias mensais. Segundo Fante e Sant'Anna Neto (2016), sob o viés estatístico, as técnicas de preenchimento também são mais indicadas para estimativas de valores e falhas mensais e anuais; deste modo, não são recomendadas para a aplicação em falhas de dados diários. O método dentro da estação possui a vantagem de não depender de dados de outras estações (Kemp *et al.*, 1983). O preenchimento deu-se pelo método da interpolação linear, pelo Easy-Fit e pelo gerador WeatherMan/DSSAT, utilizando o modelo WGEN (Richardson; Wright, 1984; Hoogenboom *et al.*, 2024). É importante escolher a metodologia que mais se adequa às necessidades da pesquisa e que esteja em conformidade com a realidade geográfica e climatológica em que se inserem as estações meteorológicas estudadas (Fante; Sant'Anna Neto, 2016).

O WGEN (Weather Generator) é uma ferramenta algorítmica projetada para gerar séries climáticas sintéticas de centenas de anos, as quais preservam as características estatísticas essenciais (média, variância, autocorrelação e probabilidades de transição) dos dados observados locais. No caso do software Easy-Fit, utilizou-se no ajuste para completar os dados o teste de Kolmogorov-Smirnov, por se tratar de dados não paramétricos. A escolha do Easy-Fit foi motivada por sua capacidade de lidar com incertezas e tomar decisões a partir da probabilidade das informações da análise de seus dados, selecionando, assim, o melhor ajuste de distribuição. O software permite ajustar facilmente um grande número de distribuições aos dados disponíveis em segundos, economizando tempo e evitando erros de análise, o que permite maior segurança no dado gerado.

O método da média aritmética (Equação 1) foi composto pela média aritmética da série incompleta e o método da interpolação linear no intervalo (X_0 , X_1) (Equação 2) foi composto pelo valor máximo e mínimo da série, bem como os valores máximos e mínimos das médias anuais dos dados faltantes, respectivamente. A interpolação linear (Equação 2) pode ser vista como uma média ponderada, cujos pesos são inversamente proporcionais à distância entre o ponto de chegada e o ponto desconhecido. A escolha da interpolação foi devido à possibilidade de poder comparar o processo de preenchimento com os softwares mais sofisticados, de modo que pudesse servir de comparação ou alternativa em situações onde não se tem outra forma de completar as falhas em séries meteorológicas. Contudo, assume-se que a variação entre os pontos conhecidos é linear, o que pode não ser verdade em todos os casos. Quando os dados apresentam um comportamento não linear, a interpolação linear pode resultar em estimativas imprecisas.

$$\bar{m} = \frac{m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_n}{n} \quad (1)$$

$$Y_x = Y_0 + \frac{\bar{X} - X_0}{X_1 - X_0} (Y_1 - Y_0) \quad (2)$$

Em que: $\bar{m}$ é a média aritmética das observações; ($m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_n$) são os valores medidos; n é a quantidade de anos observados; Y_x é o valor da falha a encontrar; Y_0 é o valor mínimo da variável Y ; Y_1 é o valor máximo da variável Y ; X é a média entre o valor máximo e mínimo da variável Y ; X_0 é o valor mínimo da variável X ; e X_1 é o valor máximo da variável X .

O Software Easy-Fit consiste em um banco de dados contendo modelos, dados e resultados, além de algoritmos numéricos subjacentes para resolver o problema de

estimação de parâmetros. A depender da estrutura matemática, o módulo MODFIT.EXE atua na estimação de parâmetros em funções explícitas, transformadas de Laplace, sistemas de estados estacionários, além de equações algébricas diferenciais ordinárias e diferenciais; e PDEFIT.EXE para estimativa de parâmetros em equações algébricas diferenciais parciais unidimensionais dependentes do tempo. Os dados de temperaturas máxima (T_x), mínima (T_n) e média (T_m), de umidade relativa média (UR_m) do ar e de radiação solar global (Q_g) do município de Itacoatiara, foram convertidos para o formato do programa WeatherMan/DSSAT v. 4.8.5.0. Para a geração dos dados climáticos foram utilizados os modelos WGEN (Richardson; Wright; Wgen, 1984; Hoogenboom *et al.*, 2024) e do Easy-Fit. A partir das informações processadas, os modelos geram dados de T_x , T_n , T_m , UR_m e Q_g com base em parâmetros estatísticos calculados internamente.

Para avaliar os métodos de preenchimento de falhas, utilizou-se, como alternativa, a correlação linear entre a normal climatológica de 1991 a 2020 (INMET, 2025), que incorpora, em parte, e extrapola, em parte, a normal climatológica provisória de 2009 a 2023 (15 anos), avaliada nesta investigação. Dessa forma, os métodos foram avaliados por meio de correlação linear e coeficiente de determinação (R^2), utilizando séries meteorológicas do período de 2009 a 2023 e a normal climatológica de 1991 a 2020 (INMET, 2025). As hipóteses estatísticas foram testadas pelo p-valor, assumindo-se que se o p-valor for menor que 0,05, rejeita-se a hipótese nula ($H_0: \beta_1 = 0$), ou seja, o parâmetro é estatisticamente significativo e que a normal climatológica tem efeito significativo sobre a normal climatológica provisória; se o p-valor for maior ou igual a 0,05, não se rejeita a hipótese nula (H_0), isto é, não há evidências suficientes para afirmar, ao nível de 5% de

probabilidade, que a normal climatológica tem efeito significativo sobre a normal climatológica provisória.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Devido às falhas apresentadas no banco de dados meteorológico das estações A122 (Maués), A123 (Parintins), A124 (Urucará) e A125 (Rio Urubu), “vizinhas” à A121 e à OMM: 82336, impossibilitou-se a aplicação da regressão linear simples (RLS), da regressão linear múltipla (RLM) e da regressão linear múltipla passo a passo ou Stepwise (RLMS), as quais eram pretendidas para estimar os dados faltantes das variáveis temperatura do ar, umidade relativa do ar, pressão atmosférica média e velocidade média do vento. Essa restrição corrobora o que afirmam Ritchie, Godwin e Singh (1990), ao apontarem que uma das maiores deficiências que limitam o uso de modelos em larga escala é a falta de dados de solo e clima.

Para o conjunto de dados horários de temperatura do ar, umidade relativa do ar, pressão atmosférica e velocidade média do vento, não foi aplicada nenhuma técnica estatística para o preenchimento de falhas; contudo, aplicaram-se técnicas para os dados diários, mesmo considerando que Fill (1987) e Bertoni e Tucci (2007) informam que nenhuma das várias metodologias para preenchimento de falhas “se presta ao preenchimento de falhas diárias, sendo mais recomendadas no preenchimento de falhas mensais ou anuais”. Ocorre que o programa WeatherMan/DSSAT v. 4.8.5.0 exige que os dados de entrada sejam diários para a geração de dados climáticos pelo modelo WGEN. Dessa forma, a geração de dados deve ser ajustada às premissas da pesquisa diante da situação observada, haja vista que as estações meteorológicas (Tabela 2) não dispunham de dados completos.

Constatada a impossibilidade de aplicar os métodos abordados anteriormente, procedeu-se à aplicação da interpolação linear e do uso dos softwares Easy-Fit e WeatherMan/DSSAT v. 4.8.5.0 para completar os dados faltantes das variáveis ora citadas (Quadro 2, Tabela 3). No caso do software Easy-Fit, utilizou-se o teste de Kolmogorov-Smirnov no ajuste para o

preenchimento por se tratar de dados não paramétricos. Chibana *et al.* (2005) informam que vários métodos podem ser utilizados para o preenchimento de falhas de dados meteorológicos, incluindo a utilização de médias de dados observados (normal climatológica) ou dados sintéticos obtidos de geradores de dados.

Tabela 3. Desempenho comparativo dos métodos de preenchimento de falhas

Ps	Met	rs	R ²	d	c	Desemp	RMSE	EQM	RD	EM	CMR
T _x	I	0,99	0,98	1,00	0,99	Ótimo	1,07	3,30	0,53	1,11	0,02
	EF	0,98	0,97	1,00	0,98	Ótimo	1,07	3,30	0,57	0,90	0,02
	WM	0,99	0,98	1,00	0,99	Ótimo	1,07	3,30	0,51	1,04	0,02
T _n	I	0,93	0,86	1,00	0,93	Ótimo	0,27	1,15	0,00	-2,51	-0,02
	EF	0,94	0,88	1,00	0,94	Ótimo	0,27	1,15	0,00	-2,32	-0,02
	WM	0,93	0,87	1,00	0,93	Ótimo	0,27	1,15	0,00	-2,04	-0,02
UR _m	I	0,97	0,94	1,00	0,97	Ótimo	3,27	3,93	0,00	0,90	0,04
	EF	0,99	0,97	1,00	0,98	Ótimo	3,27	3,93	0,00	0,80	0,03
	WM	0,98	0,96	1,00	0,98	Ótimo	3,27	3,93	0,00	0,98	0,03
U ₂	I	0,79	0,62	0,98	0,78	Muito Bom	0,09	8,30	0,00	-5,15	0,20
	EF	0,80	0,63	0,99	0,79	Muito Bom	0,09	8,30	0,00	-1,82	0,14
P _{atm}	I	0,98	0,96	1,00	0,98	Ótimo	0,10	0,09	0,00	-16,87	0,00
	EF	0,98	0,95	1,00	0,98	Ótimo	0,10	0,09	0,00	-17,22	0,00
n	I	0,98	0,97	0,99	0,98	Ótimo	1,31	25,24	0,00	1,43	-0,17
	EF	0,99	0,98	1,00	0,99	Ótimo	1,31	25,24	0,00	1,09	-0,12

Nota: Valores correspondentes às médias mensais da temperatura do ar máxima (T_x) e mínima (T_n), da umidade relativa do ar média (UR_m), da velocidade do vento (U₂), da pressão atmosférica (P_{atm}) e da insolação (n). Variáveis: coeficiente de correlação de Spearman (rs), coeficiente de determinação (R²), Índice de Willmott (d), Erro Quadrático (RMSE), Erro Quadrático Médio (EQM), Razão dos Desvios (RD), Eficiência da Modelagem (EM), Coeficiente de Massa Residual (CMR), Interpolação (I), Easy-Fit (EF), WeatherMan (WM), Parâmetros (Ps), Desempenho (Desemp) e Métodos (Met). **Fonte:** Autores (2025)

Consta na literatura que o limiar de aceitação do número de falhas em um mês é determinado pela variável climatológica em questão. Conforme orientado por Krusche, Saraiva e Reboita (2002), no caso das temperaturas, a média do mês pode ser calculada se houver até 3 valores faltantes consecutivos ou 5 valores alternados em um mesmo mês. Contudo, dada a necessidade de completar a série e diante da escassez de dados meteorológicos completos para a região

analisada, não foi possível seguir a recomendação de Krusche, Saraiva e Reboita (2002), haja vista que Nascimento *et al.* (2009) informam que, ao tratar dos estudos de climatologia para a Amazônia, as publicações científicas registram uma escassez na produção e organização de dados. Embora tenham aumentado o número de estações automáticas no Norte do Brasil, ainda é pequena quando se compara com outras regiões brasileiras.

As falhas nos dados foram preenchidas pelo método da interpolação linear e pelos softwares Easy-Fit e WeatherMan/DSSAT (Tabela 3). Posteriormente, as médias mensais foram correlacionadas linearmente para verificar o grau de associação entre as variáveis (Figuras 1 a 8). Verifica-se que os métodos se ajustaram adequadamente, com coeficientes de determinação (R^2) variando entre 0,9951 e 0,997, o que leva a supor que os geradores Easy-Fit e WeatherMan apresentaram bons resultados no preenchimento das falhas de dados de temperatura máxima mensal do ar (Figura 2A). A normal climatológica de 1991 a 2020 foi correlacionada com os dados preenchidos de 2009 a 2023 (Figura 2B), apresentando R^2 variando entre 0,9693 a 0,9806. Com o p-valor $< p$ (0,05) (Tabela 4), rejeitou-se a hipótese

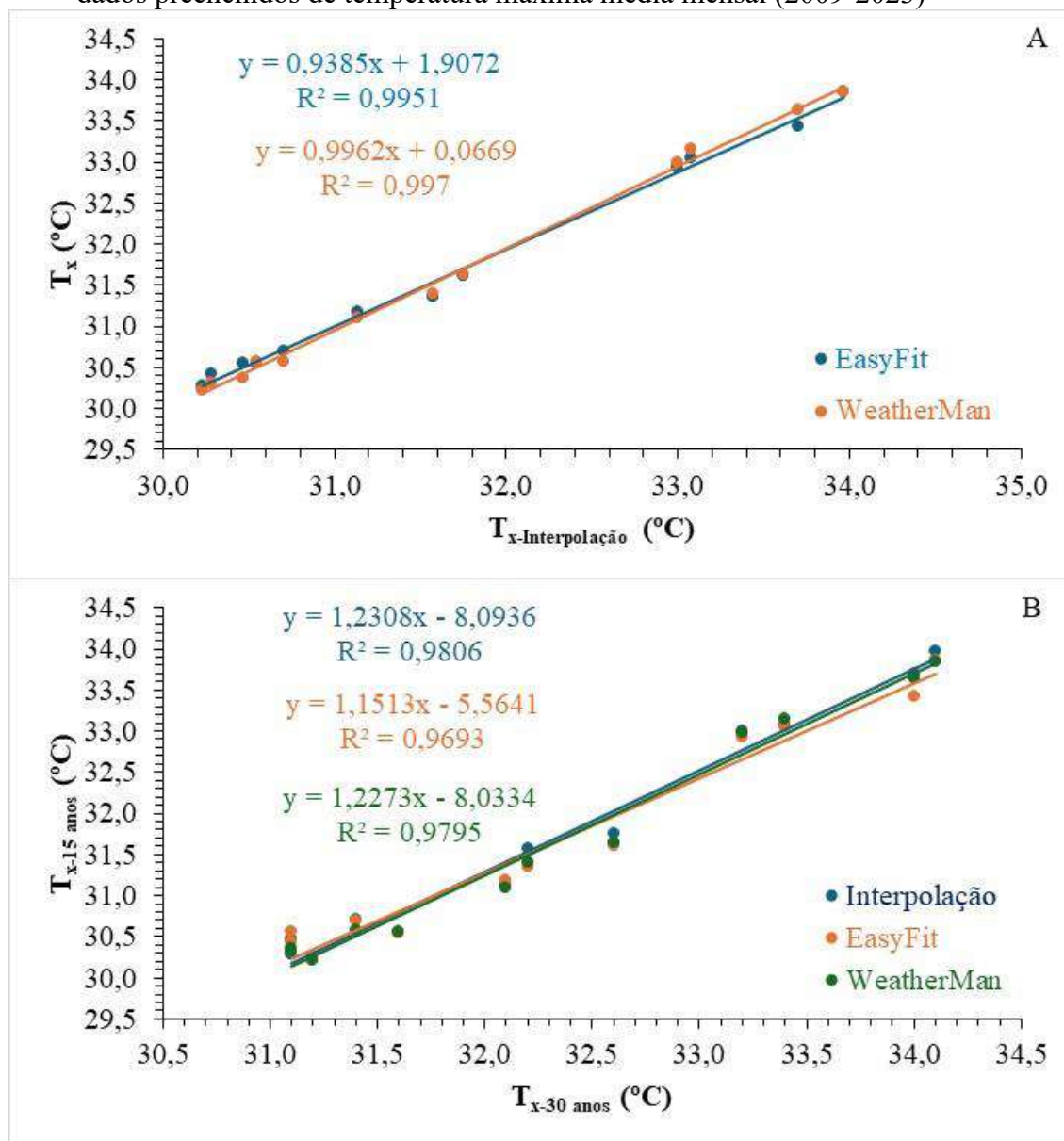
nula (H_0 , ou seja, $\beta_1 \neq 0$), o que confirma a existência da regressão. Desse modo, os três métodos podem ser adotados para o preenchimento de tais falhas, quando não se dispõe de dados completos de estações meteorológicas vizinhas para a realização de comparações entre estações ou em métodos baseados em regressão (Allen; Degaetano, 2001). As pesquisas realizadas por Nascimento *et al.* (2009) e aplicadas para a área do Estado do Amazonas também trazem outras formas de preenchimento de falhas. Embora essas abordagens sejam diferentes das utilizadas nesta pesquisa, elas possuem objetivo semelhante, ou seja, minimizar os fatores que levam às falhas nos dados, tais como erros no formato, medidas não realizadas e dados eliminados devido ao erro de coleta (Pickering *et al.*, 1994).

Tabela 4. Estatística de regressão para análise da temperatura máxima (T_x) obtidos pelo método de regressão linear simples

Método		$T_{x-15 \text{ anos}}$		
		$R^2\text{-EasyFit}$	Stat t	p-valor
$T_{x-30 \text{ anos}}$	Interpolação	0,98	-4,57	0,000
	EasyFit	0,97	-2,66	0,000
	WeatherMan	0,98	-4,42	0,000

Fonte: Autores (2025)

Figura 2. A – Desempenho comparativo dos métodos de preenchimento de falhas para temperatura máxima mensal do ar; B – Comparação entre a normal climatológica (1991-2020) e os dados preenchidos de temperatura máxima média mensal (2009-2023)



Fonte: Autores (2025)

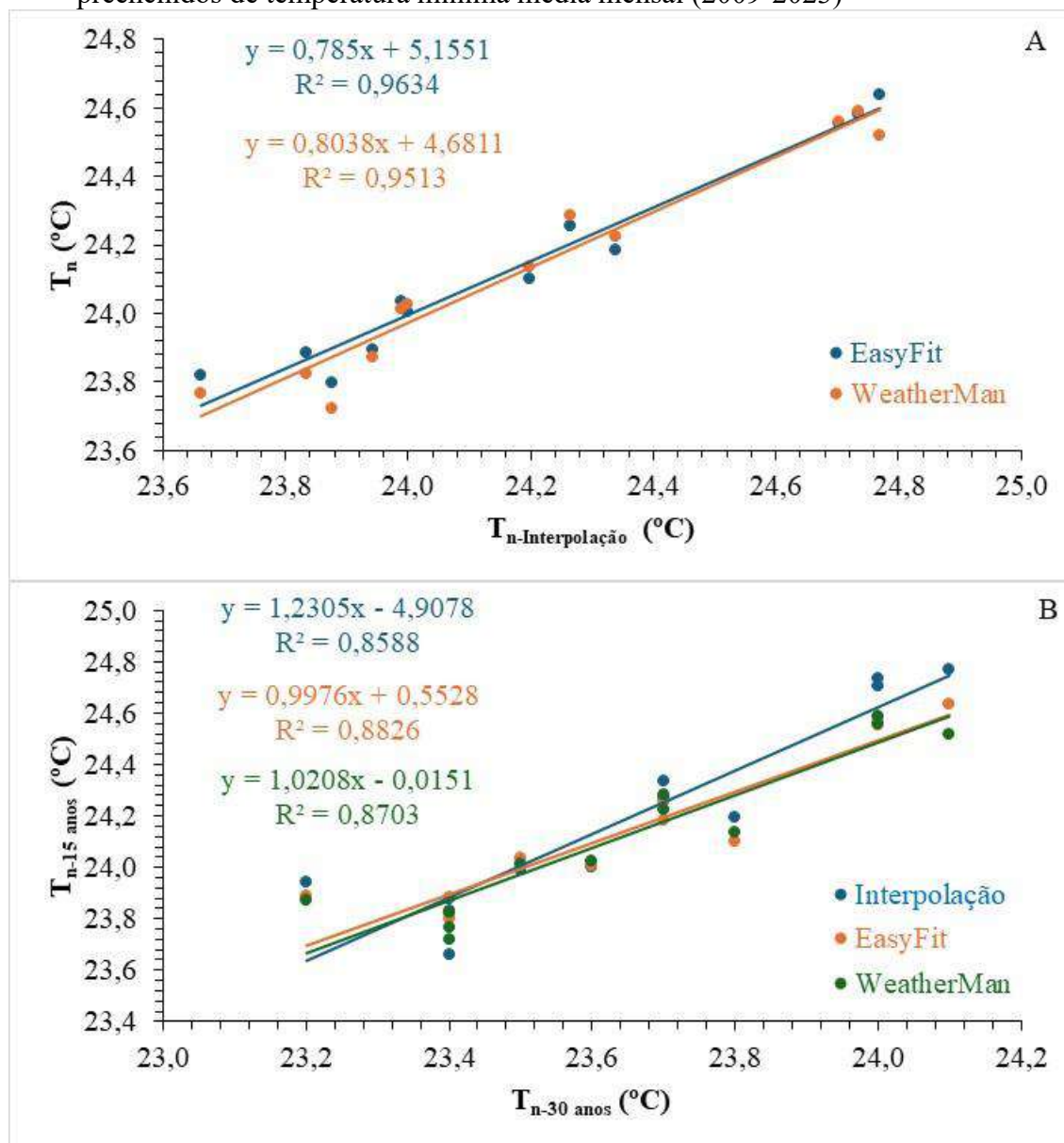
Analisando a Figura 3A, nota-se que a temperatura mínima mensal do ar, preenchida com o método da interpolação linear, ajusta-se adequadamente aos dados do WeatherMan/DSSAT e do Easy-Fit, com R^2 variando entre 0,9513 a 0,9634, respectivamente. Já na Figura 3B, ao

correlacionar os dados da normal climatológica de 30 anos com os dados da normal climatológica provisória de 15 anos (Tabela 5), verifica-se que os dados gerados pelo Easy-Fit, pelo WeatherMan/DSSAT e pela interpolação linear apresentaram coeficiente de determinação (R^2) variando

entre 0,8588 a 0,8703. E, de fato, o p-valor < 0,05 rejeita a hipótese H_0 , mostrando que os dados normais de 30 anos explicam a relação com os dados de 15 anos; em outras palavras,

existe a regressão e os dados gerados podem ser explicados a partir da normal climatológica.

Figura 3. A – Desempenho dos métodos de preenchimento de falhas para temperatura mínima mensal do ar; B – Comparação entre a normal climatológica (1991-2020) e os dados preenchidos de temperatura mínima média mensal (2009-2023)



Fonte: Autores (2025)

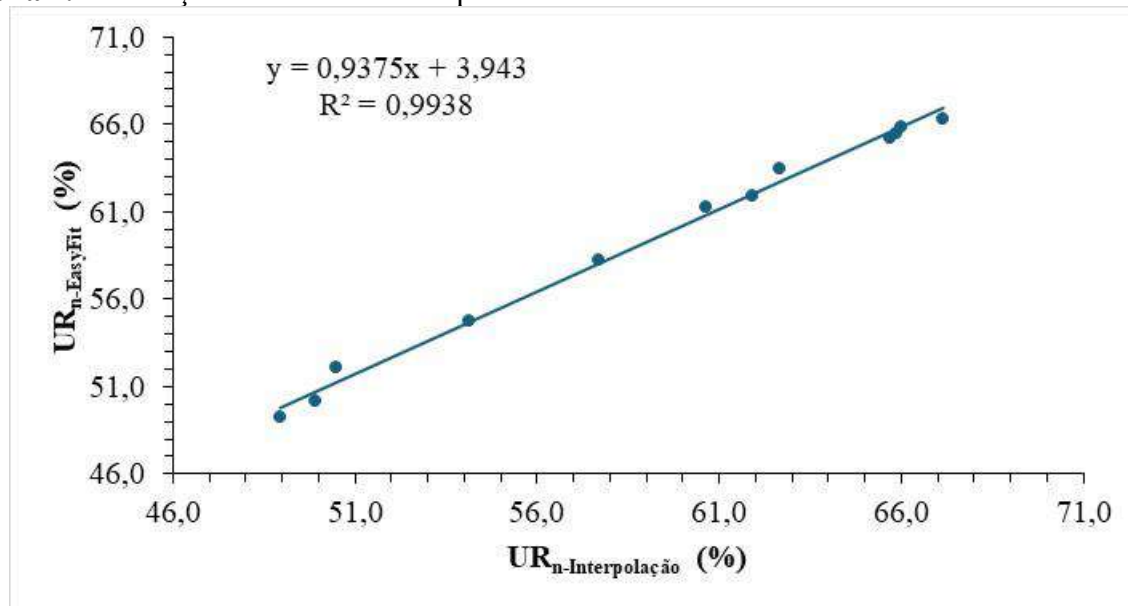
Tabela 5. Estatística de regressão para análise da temperatura mínima (T_n) obtidos pelo método de regressão linear simples

Regressão linear simples				
Método		T _{n-15 anos}		
		R ² -EasyFit	Stat t	p-valor
T _{n-30 anos}	Interpolação	0,8588	-1,32	0,000
	EasyFit	0,8826	0,20	0,000
	WeatherMan	0,8703	-0,01	0,000

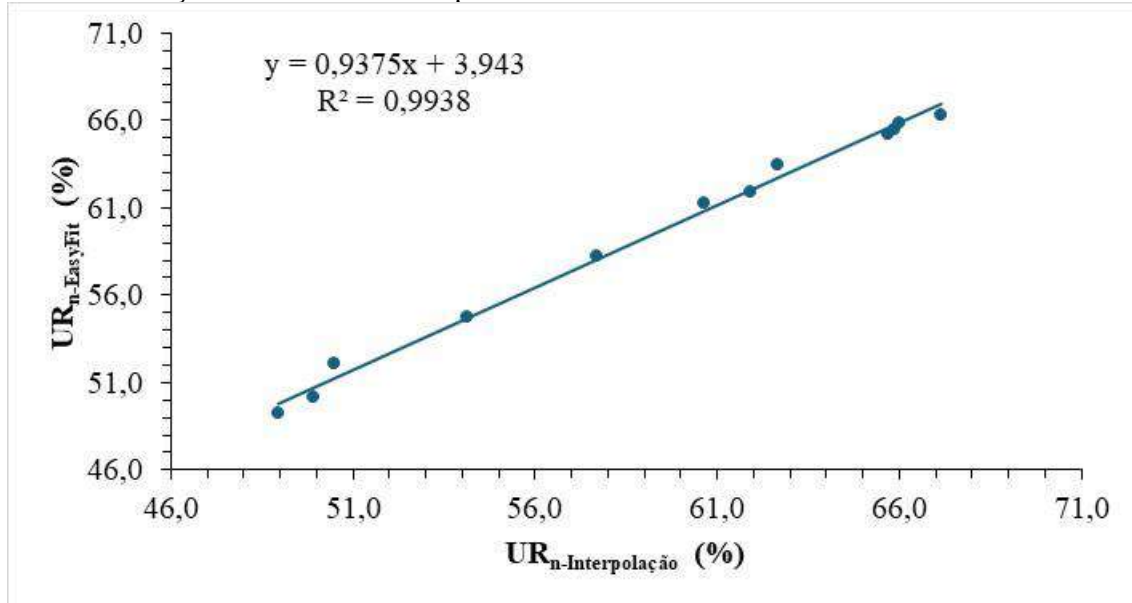
Fonte: Autores (2025)

Os dados gerados da umidade relativa do ar, máxima mensal (Figura 4) e mínima mensal (Figura 5), pelo método da interpolação linear e pelo software Easy-Fit, quando correlacionados (Tabela 6), apresentaram R^2 de 0,9858 e 0,9938, respectivamente. Valores estes que denotam um ótimo ajuste entre a interpolação e o

software Easy-Fit. Infelizmente, na normal climatológica de 1991 a 2020 não havia dados disponíveis dessas variáveis, o que impossibilitou a análise da correlação entre elas. Mas o $p\text{-valor} < 0,05$ entre essas variáveis permite a rejeição da hipótese nula (H_0 , ou seja, $\beta_1 \neq 0$), afirmando que a regressão existe.

Figura 4. Correlação entre métodos de preenchimento da umidade relativa máxima mensal do ar

Fonte: Autores (2025)

Figura 5. Correlação entre métodos de preenchimento da umidade relativa mínima mensal do ar

Fonte: Autores (2025)

Tabela 6. Estatística de regressão para análise da umidade relativa máxima (UR_x) e mínima (UR_n) obtidos pelo método de regressão linear simples

Método		UR _x -15 anos (EasyFit)		
		R ²	Stat t	p-valor
UR _x -15 anos	Interpolação	0,9858	7,37	0,000
Método		UR _n -15 anos (EasyFit)		
		R ²	Stat t	p-valor
UR _n -15 anos	Interpolação	0,9938	2,83	0,000

Fonte: Autores (2025)

A umidade relativa do ar média mensal (Figura 6A), preenchida pelo método da interpolação linear, foi correlacionada aos dados do Easy-Fit e do WeatherMan/DSSAT, com R² variando de 0,9725 a 0,9889. Analisando a Figura 6B, que ilustra a correlação entre os dados da normal climatológica de 1991 a 2020 e os da normal

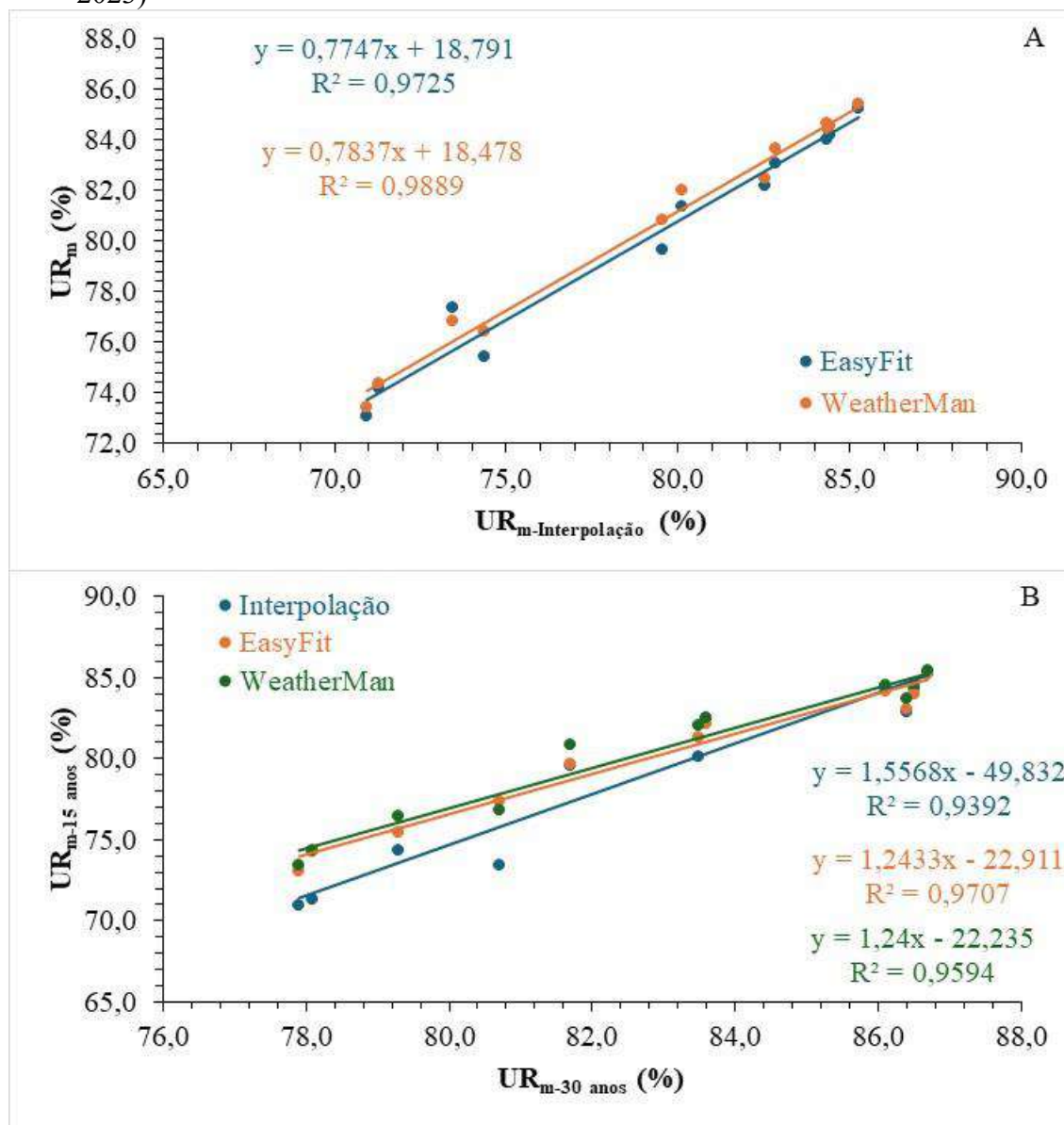
climatológica provisória de 2009 a 2023, percebe-se que os métodos apresentaram variação de R² de 0,9392 a 0,9707. Na Tabela 7, nota-se que os geradores apresentaram p-valor < 0,05, permitindo afirmar que todos os métodos apresentaram ótimos ajustes, podendo ser adotados.

Tabela 7. Estatística de regressão para análise da umidade relativa do ar (UR_m), média mensal obtidas pelo método de regressão linear simples

Método		$UR_{m-15\text{ anos}}$		
		R^2 -EasyFit	Stat t	p-valor
$UR_{m-30\text{ anos}}$	Interpolação	0,9392	-4,79	0,000
	EasyFit	0,9707	-4,04	0,000
	WeatherMan	0,9594	-3,32	0,000

Fonte: Autores (2025)

Figura 6. A – Desempenho dos métodos de preenchimento da umidade relativa média mensal; B – Comparação entre a normal climatológica (1991-2020) e a série preenchida (2009-2023)

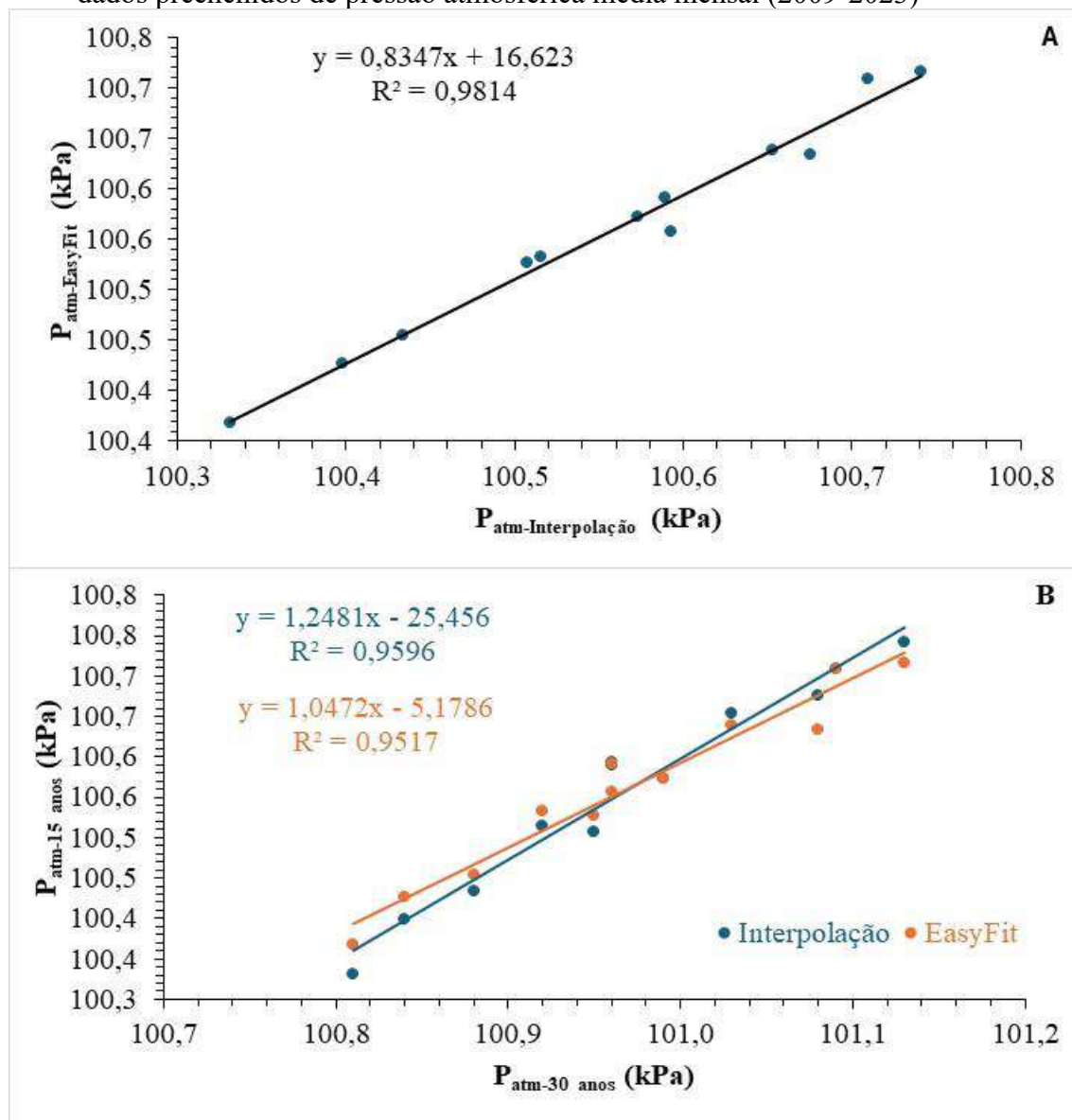


Fonte: Autores (2025)

A variável pressão atmosférica média mensal (Figura 7A), quando correlacionada, apresentou R^2 de 0,9814, o que demonstra um ótimo ajuste entre os métodos. Os dados normais de 1991 a 2020 foram correlacionados com os dados da normal climatológica provisória, preenchidos pela interpolação linear e pelo Easy-Fit (Figura

7B), com o coeficiente de determinação variando entre 0,9517 a 0,9596. Analisando a Tabela 8, o p -valor $< 0,05$, rejeitando a hipótese H_0 tanto para a interpolação como para o Easy-Fit, mostra que a regressão existe e ambos os métodos podem ser adotados para o preenchimento de dados faltantes de pressão atmosférica.

Figura 7. A – Desempenho comparativo entre interpolação e Easy-Fit na estimativa da pressão atmosférica mensal; B – Comparação entre a normal climatológica (1991-2020) e os dados preenchidos de pressão atmosférica média mensal (2009-2023)



Fonte: Autores (2025)

Tabela 8. Estatística de regressão para análise da pressão atmosférica (P_{atm}) obtidos pelo método de regressão linear simples

	Método	$P_{\text{atm-15 anos}}$		
		$R^2\text{-EasyFit}$	Stat t	p-valor
$P_{\text{atm-30 anos}}$	Interpolação	0,9596	-3,11	0,000
	EasyFit	0,9517	-0,69	0,000

Fonte: Autores (2025)

A velocidade média mensal do vento (Figura 8A), obtida pelo método da interpolação linear e pelo software Easy-Fit, quando correlacionada, apresentou R^2 de 0,8714. Analisando a Figura 8B, que correlaciona os dados da normal climatológica de 30 anos (1991 a 2020) com os da normal climatológica provisória de 15 anos (2009 a

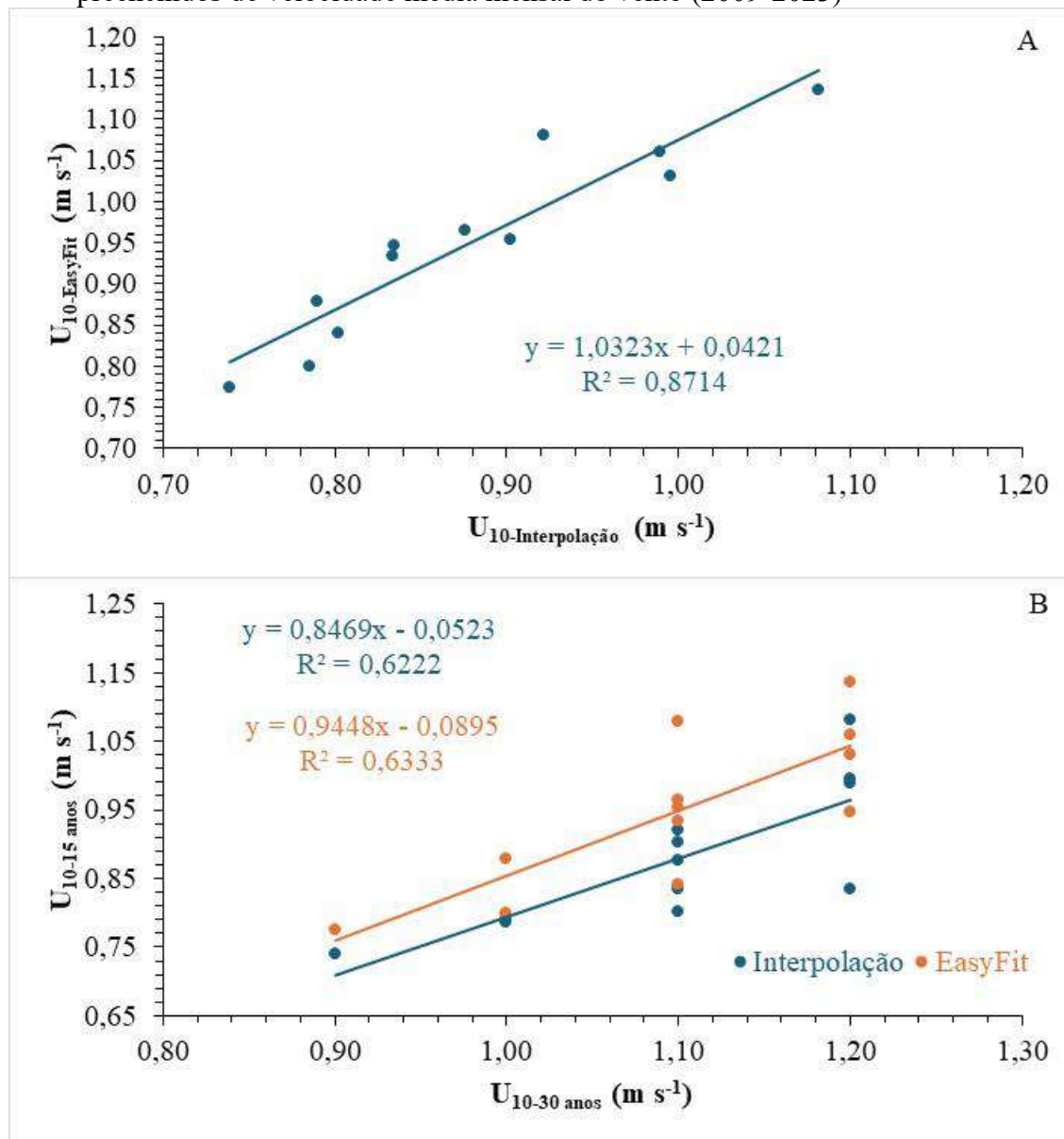
2023), ambos os métodos apresentaram bom ajuste, com R^2 variando entre 0,6222 a 0,6333. Veja na Tabela 9 que o p-valor $< 0,05$, rejeitando a hipótese H_0 , o que mostra que a regressão existe, portanto pode ser recomendado o uso para completar as falhas de dados faltantes.

Tabela 9. Estatística de regressão para análise da velocidade do vento (U_{10}) obtidos pelo método de regressão linear simples

	Método	$U\text{-15 anos}$		
		$R^2\text{-EasyFit}$	Stat t	p-valor
$U\text{-30 anos}$	Interpolação	0,62	-0,23	0,002
	EasyFit	0,63	-0,36	0,002

Fonte: Autores (2025)

Figura 8. A – Ajuste linear entre os métodos de interpolação e Easy-Fit para a velocidade média mensal do vento; B – Comparação entre a normal climatológica (1991-2020) e os dados preenchidos de velocidade média mensal do vento (2009-2023)

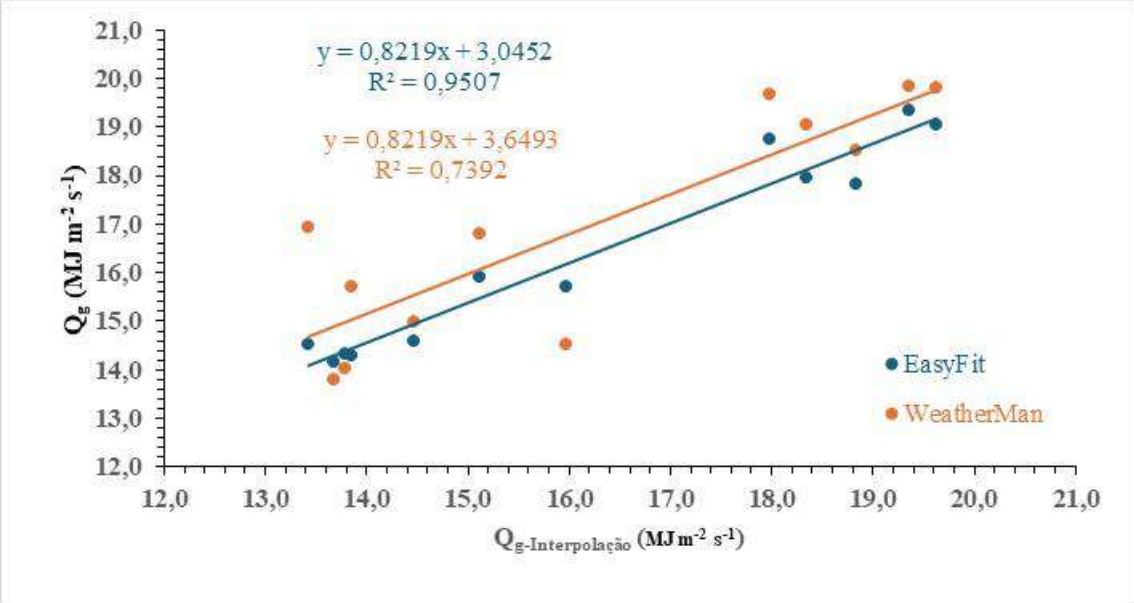


Fonte: Autores (2025)

A radiação solar global média mensal (Figura 9) obtida pelo método da interpolação linear, foi correlacionada com os dados do software Easy-Fit e do WeatherMan/DSSAT. Os dados do Easy-Fit se ajustaram melhor aos dados da interpolação, com R^2 de 0,9507,

quando comparados aos dados do WeatherMan/DSSAT. Os métodos avaliados apresentaram p -valor $< 0,05$ (Tabela 10), mostrando que a regressão existe e pode ser utilizada.

Figura 9. Correlação entre métodos de preenchimento de falhas para a radiação solar global (Q_g) média mensal



Fonte: Autores (2025)

Tabela 10. Estatística de regressão para análise da radiação solar global (Q_g) obtidos pelo método de regressão linear simples

Método		Q _g -15 anos (EasyFit)		
		R ²	Stat t	p-valor
Q _g -15 anos	Interpolação	0,9507	3,14	0,000
		Q _g -15 anos (WeatherMan)		
Q _g -15 anos	Interpolação	0,7392	1,44	0,000

Fonte: Autores (2025)

As análises de regressão das variáveis quantitativas, medidas sobre os mesmos indivíduos, foram bem ajustadas, visto que o coeficiente de determinação apresentado ficou entre 62,22% (velocidade média mensal do vento) e 99,70% (temperatura máxima mensal do ar), de modo a representar o fenômeno estudado. Nesse sentido, a análise de variância da regressão aplicada à velocidade média mensal do vento, apresentou p-valor de 0,002, menor que o nível de probabilidade $p = 0,05$, demonstrando que a regressão existe, ou seja, a normal climatológica de 30 anos explica a normal climatológica provisória de 15 anos,

que foi completa pelo método da interpolação linear.

Cabe ressaltar que Meinke *et al.* (1995), ao avaliarem três diferentes modelos de geração de dados meteorológicos, indicaram que o WGEN é o mais indicado para gerar séries longas de dados de temperatura e de radiação solar, proporcionando boas estimativas da produtividade potencial para as culturas de milho, trigo e girassol, nas condições climáticas da Austrália. Nesta pesquisa, para as temperaturas máxima e mínima do ar e para a radiação solar, não se confirmou a constatação de Meinke *et al.* (1995), sendo

que os melhores geradores de dados foram a interpolação, o WeatherMan e o Easy-Fit, respectivamente. Para Hayhoe (1998), a versão do WGEN adaptada para o programa EPIC (Erosion/Productivity Impact Calculator) não é uma boa opção para gerar dados climáticos por não manter as relações entre as variáveis meteorológicas, o que se deve às simplificações assumidas no programa.

6 CONCLUSÃO

Nas condições em que foi realizado este trabalho, pode-se concluir que:

- Na literatura consultada, não foi verificada nenhuma validação de preenchimento de falhas de séries meteorológicas semelhante a esta, em razão das particularidades da região investigada. Contudo, vislumbrou-se gerar uma série robusta que pudesse propiciar aplicação em diversos segmentos voltados para a tomada de decisão em estudos de solo, planta e atmosfera local, bem como garantir a estabilidade da modelagem voltada à agricultura local, haja vista os lapsos nas séries atuais.
- Os métodos de interpolação, o Easy-Fit e o WeatherMan/DSSAT apresentaram potencial para o preenchimento de falhas em séries meteorológicas mensais da região de Itacoatiara-AM, mesmo diante da limitada disponibilidade de dados completos.
- O método de interpolação apresentou melhor desempenho para temperatura máxima média mensal e pressão atmosférica média mensal, enquanto o Easy-Fit apresentou melhor ajuste para temperatura mínima média mensal,

umidade relativa média mensal e velocidade média do vento.

- Para a velocidade média do vento (p-valor = 0,02), o método da interpolação e o gerador Easy-Fit também podem ser sugeridos para a geração de dados meteorológicos.
- Considerando as falhas de dados das estações meteorológicas na região do Médio e do Baixo Amazonas e a impossibilidade de preenchê-las com outros métodos mais sofisticados, é possível lançar mão dos geradores abordados nesta investigação; no entanto, acrescenta-se que um maior rigor deve ser empregado pelo pesquisador, evitando, dessa forma, falhas na coleta de dados na estação de origem.

7 REFERENCIAS

- ALLEN, R. J.; DEGAETANO, A. T. Estimating Missing Daily Temperature Extremes Using an Optimized Regression Approach. **International Journal of Climatology**, Reino Unido, v. 21, n. 11, p. 1305-1319, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.679>. Disponível em: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.679>. Acesso em: 01 jul. 2026.
- BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. Precipitação. In: Tucci, C. E. M. (org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2007. p. 177-241.
- BRISTOW, K. L.; CAMPBELL, G. S. On the relationship between incoming solar radiation and daily maximum and minimum temperature. **Agricultural and Forest Meteorology**, Reino Unido, v. 31, p. 159-166, 1984.

- CHIBANA, E. Y.; BRITO, L. R. de S.; FLUMIGNAN, D.; MOTA, R. G.; VIEIRA, A. de S.; FARIA, R. T. de. Preenchimento de falhas de dados climáticos. *In*: XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 14., 2005, Campinas. **Anais [...]**. Campinas: SBA, 2005.
- DIAZ, C. C. F.; PEREIRA, J. A. S.; NÓBREGA, R. S. Comparação de dados estimados por dois diferentes métodos para o preenchimento de falhas de precipitação pluvial na bacia do rio pajeú, Pernambuco, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, v. 22, p. 324-339, 2018.
- FILL, H. D. Informações hidrológicas. *In*: TUCCI, C. E. M. (org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: ABRH, 1987. p. 95-202.
- FANTE, K. P.; SANT'ANNA NETO, J. L. Técnicas estatísticas para a homogeneização de dados de temperatura em séries temporais climatológicas. **Revista Brasileira de Climatologia**, Curitiba, ano 12, v. 18, p. 140-156, 2016. DOI: <https://doi.org/10.5380/abclima.v18i0.43202>. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/43202>. Acesso em: 16 out. 2025.
- GIONANELLA, T. H. G.; OLIVEIRA, F. C. de; MARCHI, V. A. de A.; TLUSZCZ, J. Desempenho de Métodos de Preenchimento de Falhas em Dados de Evapotranspiração de Referência para Região Oeste do Paraná. **Revista Brasileira de Meteorologia**, São José dos Campos, v. 36, n. 3, p. 415-422, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/0102-77863630001>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/ySBfCn8CbbRLQfnLWCXbwDd/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 01 jul. 2026.
- GUZMÁN, N. G. **Modelagem para estimativa de dados faltantes em série de dados meteorológicos**. 2018. Dissertação (Mestrado em Modelagem Computacional) – Instituto Politécnico, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo, 2018.
- HAYHOE, H. N. Relationship between weather variables in observed and WXGEN generated data series. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdã, v. 90, p. 203-214, 1998.
- HOOGENBOOM, G.; JONES, J. W.; BOOTE, K. J. Modeling growth, development, and yield of grain legumes using Soygro, Pnutgro, and Beangro. **Transaction of the ASAE**, Michigan, v. 35, n. 6, p. 2043-2056, 1992. Disponível em: <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?JID=3&AID=28833>. Acesso em: 02 jul. 2026.
- HOOGENBOOM, G.; PORTER, C. H.; SHELIA, V.; BOOTE, K. J.; SINGH, U.; PAVAN, W.; OLIVEIRA, F. A. A.; MORENO-CADENA, L. P.; FERREIRA, T. B.; WHITE, J. W.; LIZASO, J. I.; PEQUENO, D. N. L.; KIMBALL, B. A.; ALDERMAN, P. D.; THORP, K. R.; CUADRA, S. V.; VIANNA, M. S.; VILLALOBOS, F. J.; BATCHELOR, W. D.; ASSENG, S.; JONES, M. R.; HOPF, A.; DIAS, H. B.; JINTRAWET, A.; JAIKLA, R.; MEMIC, E.; HUNT, L. A.; JONES, J. W. Decision Support System for Agrotechnology Transfer (DSSAT). versão 4.8.5.0. Gainesville: DSSAT Foundation, 2024. Disponível em: www.dssat.net. Acesso em: 27 jan. 2025.
- INMET. **Normais Climatológicas do Brasil**. Brasília, DF: Internet, 2025. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em: 20 jul. 2025.

- KEMP, W. P.; BURNELL, D. G.; EVERSON, D. O.; THOMSON, A. J. Estimating Missing Daily Maximum and Minimum Temperatures. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, Boston, v. 22, n. 9, p. 1587-1593, 1983.
- KRUSCHE, N.; SARAIVA, M. B. J.; REBOITA, M. S. **Normais climatológicas provisórias de Rio Grande, no período de 1991 a 2000 para Rio Grande, RS**. 1. ed. Rio Grande: FURG, 2002.
- MEINKE, H.; CARBERRY, P. S.; McCASKILL, M. R.; HILLS, M. A.; McLEOD, I. Evaluation of radiation and temperature data generators in the Australian tropics and sub-tropics using crop simulation models. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdã, v. 72, p. 295-316, 1995.
- NASCIMENTO, T. S. do; SARAIVA, J. M. B.; SENNA, R.; AGUIAR, F. E. O. Preenchimento de falhas em banco de dados pluviométricos com base em dados do CPC (climate prediction center): estudo de caso do rio solimões-amazonas. **Revista Brasileira de Climatologia**, São José dos Campos, ano 6, v. 7, p. 143-158, 2009. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/rbclima/article/view/13578#:~:text=Este%20trabalho%20tem%20como%20objetivo%20preencher%20falhas%20em,com%20dados%20sint%C3%A9ticos%20adquiridos%20do%20CPC%20%28Climate%20Prediction%20Center%29>. Acesso em: 11 mar. 2025.
- OLIVEIRA, L. F. C.; FIOREZE, A. P.; MEDEIROS, A. M. M.; SILVA, M. A. S. Comparação de metodologias de preenchimento de falhas de séries históricas de precipitação pluvial anual. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 11, p. 1186-1192, 2010.
- ORGANIZACIÓN METEOROLÓGICA MUNDIAL. **Directrices de la Organización Meteorológica Mundial sobre el cálculo de las normales climáticas**. Genève: OMM, 2017. (OMM, n. 1203). Disponível em: https://library.wmo.int/viewer/60338?medianame=1203_es_#page=1&viewer=picture&obookmark&n=0&q=. Acesso em: 07 abr. 2024.
- PICKERING, N. B.; HANSEN, J. W.; JONES, J. W.; WELLS, C. M.; CHAN, V. K.; GODWIN, D. C. WeatherMan: A Utility for Managing and Generating Daily Weather Data. **Agronomy Journal**, Washington, DC, v. 86, n. 2, p. 332-337, mar. 1994. DOI: <http://dx.doi.org/10.2134/agronj1994.00021962008600020023x>. Disponível em: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.2134/agronj1994.00021962008600020023x>. Acesso em: 27 mai. 2026.
- RICHARDSON, C. W.; WRIGHT, D. A. **WGEN: a model for generating daily weather variables**. Washington, DC: USDA-ARS. 1984. (ARS-8).
- RITCHIE, J. T.; GODWIN, D. C.; SINGH, U. Soil and weather inputs for the IBSNAT crop models. In: IBSNAT SYMPOSIUM: DECISION SUPPORT SYSTEMS FOR AGROTECHNOLOGY TRANSFER, 1989, Honolulu. **Proceedings** [...]. Honolulu: University of Hawaii, 1989. p. 31-45. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/312737550_Soil_and_weather_inputs_for_the_IBSNAT_crop_models. Acesso em: 11 ago. 2025.

SANTOS, R. S. dos. **Homogeneidade e reconstrução de séries climatológicas para localidades do Estado de Minas Gerais**. 2012. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

WMO. **Calculation of monthly and annual 30-year standard normals**. Geneva: WMO, 1989. (WCDP, n. 10/ WMO-TD, n. 341).