

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE
REFERÊNCIA PELO MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH
OBTIDA COM DADOS DE DUAS ESTAÇÕES
METEOROLÓGICAS**

Bernardo Luchini Baccega

Jaboticabal - SP

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE
REFERÊNCIA PELO MÉTODO DE PENMAN-MONTEITH
OBTIDA COM DADOS DE DUAS ESTAÇÕES
METEOROLÓGICAS**

Bernardo Luchini Baccega

Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Pitelli Turco

Trabalho apresentado à Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP,
Câmpus de Jaboticabal, para graduação
em Engenharia Agrônoma.

JABOTICABAL – SP

2º SEMESTRE DE 2025

B116e	Baccega, Bernardo Luchini
	Estimativa da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith obtida com dados de duas estações meteorológicas / Bernardo Luchini Baccega. -- Jaboticabal, 2025
	29 p. : tabs., fotos
	Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Agrônômica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal
	Orientador: José Eduardo Pitelli Turco
	1. Evapotranspiração. 2. Estações meteorológicas. 3. Calibração. I. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus Jaboticabal



NOME COMPLETO DO AUTOR

Bernardo Luchini Baccega

TÍTULO DO TRABALHO ACADÊMICO:

Estimativa da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith obtida com dados de duas estações meteorológicas

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrônômica.

Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Pitelli Turco

Área de Concentração: Instrumentação na Agricultura

Data da defesa: 10 / 07 / 2025

☒ Aprovado

☐ Reprovado

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Eduardo Pitelli Turco

UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal

Prof. Dra. Tatiana Fernanda Canata

UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal

M.Sc. Daniel Aparecido Morello da Costa

Doutorando em Agronomia (Ciência do Solo) pela FCAV/UNESP-Câmpus de Jaboticabal

Aprovado em reunião do Conselho do Departamento em:

11 / 07 / 2025

Prof. Dr. Luiz Fabiano Palaretti

Chefe do Departamento

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente à Deus;

Agradeço à UNESP, pelas oportunidades;

Agradeço ao Professor Doutor José Eduardo Pitelli Turco, meu orientador, pelo apoio e dedicação;

Agradeço aos colegas da minha trajetória acadêmica, pelos momentos e companheirismo.

Sumário

RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. Evapotranspiração	3
2.2. Estações Meteorológicas automáticas	4
2.3. Verificação de dados meteorológicos	5
3. MATERIAL E MÉTODOS	9
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	16
5. CONCLUSÃO	22
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25

RESUMO

Com este trabalho o objetivo foi comparar a estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) pelo método de Penman-Monteith obtida com dados de duas estações meteorológicas automáticas (EMAs). Os dados meteorológicos obtidos foram radiação solar global, temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento. Os dados meteorológicos foram coletados em duas EMAs instaladas na Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Uma da marca Campbell Scientific calibrada (EMA-C) foi instalada em área experimental do LIAP (Laboratório de Instrumentação Automação e processamento) do Departamento de Engenharia. Outra foi instalada na Estação Agroclimatológica (EMA-EA) do Departamento de Ciências Exatas. O método de estimativa diária da ET_o avaliado foi o de Penman-Monteith (PM) recomendado pela FAO como método padrão para estimar a ET_o. Foi utilizada metodologia que possui as seguintes técnicas: estimativa da radiação solar global, dupla massa, comparabilidade operacional de medições meteorológicas, assimetria e curtose para comparar os dados da EMA-EA em relação a EMA-C. Foi utilizada a técnica da dupla massa e análise de regressão para comparar a estima de ET_o das duas EMAs. Foram estimadas a ET_o com os dados meteorológicos das duas EMAs. No período estudado não houve diferenças significativas na estimativa da ET_o obtidas com os dados das duas EMAs.

Palavras-chave: evapotranspiração, estações meteorológicas, calibração.

ABSTRACT

The objective of this study was to compare the estimate of reference evapotranspiration (ET_o) by the Penman-Monteith method obtained with data from two automatic meteorological stations (EMAs). The meteorological data obtained were global solar radiation, air temperature, relative humidity, and wind speed. The meteorological data were collected in two EMAs installed at the São Paulo State University (UNESP), School of Agricultural and Veterinary Sciences, Jaboticabal. One calibrated Campbell Scientific (EMA-C) was installed in the experimental area of LIAP (Instrumentation, Automation and Processing Laboratory), of the Engineering Department. Another was installed at the Agroclimatological Station (EMA-EA) of the Exact Sciences Department. The daily ET_o estimation method evaluated was the Penman-Monteith (PM), recommended by FAO as the standard method for estimating ET_o. A methodology that includes the following techniques was used: estimation of global solar radiation, double mass, operational comparability of meteorological measurements, asymmetry and kurtosis, to compare the data from EMA-EA in relation to EMA-C. The double mass technique and regression analysis were used to compare the ET_o estimates of the two EMAs. The ET_o was estimated with the meteorological data from the two EMAs. During the study period, there were no significant differences in the ET_o estimates obtained with data from the two EMAs.

Key words: evapotranspiration, automated weather station, calibration.

1. INTRODUÇÃO

Na Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal tem instaladas duas estações meteorológicas automáticas (EMAs). Uma instalada em área experimental do LIAP (Laboratório de Instrumentação Automação e processamento), do Departamento de Engenharia com a finalidade de verificar EMAs, estação meteorológica automáticas calibrada (EMA-C). Uma instalada na Estação Agroclimatológica (EMA-EA) do Departamento de Ciências Exatas que fornecem dados online que são utilizados para várias finalidades.

A calibração de EMAS é importante para a confiabilidade dos seus sistemas de medição e a redução das variabilidades das operações continuamente. Por isso, é importante ressaltar que vários fatores podem influenciar na variabilidade das calibrações, como: fatores humanos, condições ambientais, equipamentos, manuseio de objetos e rastreabilidade de medição. E é neste cenário que a periodicidade de calibração ganha destaque, pois se não forem determinada adequadamente, surgirão erros e incertezas nas medições.

A estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) é fundamental tanto para o planejamento quanto para o manejo da irrigação. Assim, a não verificação dos dados meteorológicos para estimativa da ET_o, pode conduzir ao manejo inadequado da irrigação. Aplicações de lâminas d'água insuficientes ou em excesso resultam em perdas e prejuízos consideráveis às plantas e ao solo, diminuindo, dessa forma, a eficiência do uso de irrigação.

As EMAs são utilizadas na determinação da ET_o, com o intuito de diminuir os erros na lâmina de água a ser aplicada na cultura. As EMAs têm proporcionado precisão e rapidez na coleta de dados, facilitando o seu uso nas estimativas da ET_o, principalmente pelo método Penman-Monteith.

Com este trabalho o objetivo foi comparar a estimativa da evapotranspiração de referência pelo método de Penman-Monteith obtida com dados de duas estações meteorológicas automáticas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Evapotranspiração de Referência (ET_o)

A estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) é um instrumento fundamental tanto para o planejamento quanto para o manejo da irrigação. Assim, a não calibração dos sensores de estações meteorológicas automáticas (EMAs) para a estimativa da ET_o em geral pode conduzir ao manejo inadequado da irrigação. Aplicações insuficientes ou em excesso resultam em perdas e prejuízos consideráveis às plantas e ao solo, diminuindo dessa forma, a eficiência do uso de irrigação (SILVA et al., 1993).

A equação de Penman-Monteith FAO-56 é padrão para estimar a (ET_o) na escala diária e mensal em todos os climas e pode ser usada globalmente sem qualquer calibração local e até para estimativas horárias, devido à incorporação de parâmetros fisiológicos e aerodinâmicos, sendo validada em diferentes ambientes nos quais se utilizam medidas precisas obtidas a partir de lisímetros. O processo de cálculo exige medições confiáveis de elementos meteorológicos tais como: temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação solar, velocidade do vento e pressão atmosférica (LIMA JÚNIOR et al., 2016). Porém, há um número limitado

de estações meteorológicas nas quais essas variáveis são medidas de modo eficiente.

Os dados meteorológicos provenientes das EMAs devem apresentar qualidade para a estimativa da ETo. Avaliações da qualidade dos dados meteorológicos precisam ser realizadas antes dos dados serem utilizados em equações de estimativa da ETo (TURCO e CARLETO, 2017).

A irrigação de precisão é a prática de aplicar água em quantidades que atendam à demanda precisa desse recurso pelas plantas cultivadas. Se não for verificada a qualidade dos dados meteorológicos que são utilizados em equações de estimativa da ETo, o manejo da água de irrigação poderá ser inadequado (TURCO, 2019).

Os sistemas de aquisição automática de dados, além da importância na área de meteorologia, vêm ganhando espaço na área de agronomia, favorecendo o monitoramento das variáveis relacionadas à planta, ao solo e às máquinas agrícolas, as quais estão ligadas direta ou indiretamente ao crescimento e ao desenvolvimento das plantas cultivadas, melhorando o manejo das atividades agrícolas (CUNHA; MARTINS, 2004).

2.2. Estações Meteorológicas Automáticas

As estações meteorológicas automáticas (EMAs) são instrumentos de medidas práticos e funcionais que fornecem dados meteorológicos de forma automática. Os dados meteorológicos são medidos, transmitidos e registrados em um sistema de aquisição de dados, podendo ser disponibilizados e utilizados em inúmeras aplicações.

As informações meteorológicas são informações importantes para a maioria das pessoas e diretamente relacionadas à economia e segurança nacional. Considerando a segurança das informações meteorológicas, informações sobre o clima de forma imprecisa pode ser uma enorme ameaça à segurança nacional e à economia (SOARES et al., 2019).

A coleta de dados meteorológicos ocorre por meio de EMAs equipadas por sensores específicos para cada variável desejada. Entre as variáveis mais utilizadas estão a temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, pluviosidade e radiação solar. Dessa forma é necessário instalar e operar estações para coleta de dados meteorológicos, incluindo sensores que atendam padrões técnicos mínimos para reduzir as incertezas associadas com a aquisição de dados de campo (TOLMASQUIM et al., 2007).

Vários processos econômicos estão diretamente ligados às condições meteorológicas, entre eles estão a agricultura, a pecuária, a geração de bioenergia, entre outros. A energia solar, em específico, é limpa e utiliza uma fonte inesgotável de matéria prima, o Sol. Assim, o levantamento e planejamento do recurso solar em determinada localidade é de alto valor estratégico para fornecedores de energia e investidores (LIMA et al., 2016).

2.3. Verificação de dados meteorológicos

Além da qualidade e a instalação correta dos equipamentos utilizados nas EMAs, é fundamental manter um controle de qualidade dos dados observados com o intuito de garantir a representatividade dos dados em relação às condições meteorológicas locais e possibilitar a análise de comparação com diferentes bases de dados para a mesma localidade (SOARES et al., 2019).

Devido a importância e a aplicabilidade dos dados medidos em EMAs é necessário que eles sejam analisados quanto à integridade antes mesmo de serem disponibilizados para os usuários para garantir a confiabilidade das informações (WMO, 2008; CARLETO, 2016).

Um funcionamento correto dos sensores reflete na confiabilidade das avaliações realizadas, o que pode auxiliar até mesmo na proteção da sociedade tendo em vista um monitoramento real das mudanças climáticas e desastres naturais cada vez mais frequentes no mundo (JAMIL et al., 2013). Falhas ao longo do histórico de dados climáticos podem levar a resultados errôneos ou tendenciosos, o que compromete a análise climática (VIEIRA et al., 2018; DIAZ et al., 2018).

Jamil et al. (2013) destacam a importância do conhecer tecnicamente os sensores meteorológicos para garantir a correta operação da estação meteorológica automática e, conseqüentemente, auxiliar na prevenção de enchentes. Como resultado, os autores verificaram que o bom funcionamento dos sensores auxilia na confiabilidade dos dados como forma de proteção à sociedade; já que os desastres naturais vêm aumentando

A confiabilidade dos dados, por sua vez, é testada quanto à calibração dos sensores e norteia a sua checagem, manutenção ou troca. Ao se detectar diferenças significativas pela análise de integridade de dados, comparando sensores de estação meteorológica próximas, significa que existe algum tipo de problema nos sensores (ALLEN, 1996).

Sharan (2014) desenvolveu um protótipo de estação metrológica automática para medir dados meteorológicos de forma remota (wireless). Os

resultados mostram que os dados medidos são aceitáveis, quando comparados com dados de EMAs existentes no mercado.

Várias técnicas para avaliação da qualidade dos dados medidos em EMAs foram desenvolvidas pelo CIMIS 2014 (Califórnia Irrigation Management Information System).

Turco e Barbosa (2008) avaliaram a integridade de dados meteorológicos de duas EMAs, uma do fabricante Davis Instruments e outra do fabricante Campbell Scientific, para detectar possíveis erros nas medidas dos sensores. Como resultado, os autores identificaram que os dados da radiação solar e da temperatura do ar foram satisfatórios. Porém, os dados da umidade relativa do ar das duas EMAs não foram aceitáveis. Com relação a velocidade do vento, ambas EMAs não apresentaram boa correlação

Estévez et al. (2011a) apresentam algumas diretrizes para aplicação de técnicas que verificam a integridade de dados meteorológicos encontradas na literatura, para garantia da qualidade de dados meteorológicos da Rede de Informação Agroclimático da Andaluzia (sul da Espanha). Os autores concluíram que as diretrizes propostas são capazes de identificar os vários tipos de erros e são utilizadas 16 como uma ferramenta que permite tomar decisões, tais como a substituição do sensor e para remover os dados antes da sua aplicação. Estévez et al. (2011b) desenvolveram um sistema de controle de qualidade para quantificar a Evapotranspiração de Referência (ET_o) e auxiliar no processo de irrigação. Os autores concluíram que é necessário analisar cada estação meteorológica para detectar erros de medida, bem como estabelecer melhorias na análise de dados para validar a sua confiabilidade.

Oliveira et al. (2010, 2015) comparando dados de duas EMAs concluíram que uma boa concordância das variáveis de temperatura e precipitação, o que indicou bom funcionamento dos sensores. Scarpore et al. (2006) também encontraram uniformidade de umidade relativa do ar entre estações meteorológicas convencional e automática.

Soares et al. (2019), desenvolveram uma ferramenta numérica para a qualificação de dados coletados em estações automáticas de superfície.

Nishimura et al. (2023) desenvolveram um método de controle de qualidade de dados meteorológicos de duas EMAs instaladas no noroeste da Groenlândia. Foram analisadas a série temporal resultante de 2012–2020 de temperatura do ar, graus-dia positivos, altura da neve, albedo de superfície e histogramas de radiação de ondas longas (um proxy da frequência de formação de nuvens).

3. MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida na área experimental do Laboratório de Instrumentação Automação e processamento (LIAP) do Departamento de Engenharia da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, situada a 21°15'22" de latitude sul, 48°18'58" de longitude oeste e altitude de 575 m.

As determinações diárias da evapotranspiração de referência (ET_o) foram feitas por meio dos dados coletados de duas estações meteorológicas automáticas, utilizando-se o método de Penman-Monteith (ALLEN et al., 2006).

Para o cálculo da ET_o pelo método padrão FAO 56, Allen et al. (2006) propuseram o que segue na Equação 1.

$$ET_{oPM} = \frac{0,409 \Delta (R_n - G) + \gamma \left(\frac{900}{T + 273} \right) v (e_s - e)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 v)} \quad (1)$$

Em que,

ET_{oPM} - evapotranspiração de referência, em gramado, mm d⁻¹;

R_n - radiação líquida, MJ m⁻² d⁻¹;

G - fluxo de calor no solo, $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$;

T - temperatura média do ar, $^{\circ}\text{C}$;

V - velocidade média do vento a 2 m de altura, m s^{-1} ;

$(e_s - e)$ - déficit de pressão de vapor, kPa ;

Δ - curva de pressão de vapor, $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$;

γ - constante psicrométrica, $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$;

900 - fator de conversão

Não há necessidade de utilizar a medida do fluxo de calor do solo quando se calcula os valores diários de evapotranspiração, pois o balanço de energia no solo nesse período é próximo de zero (ITIER, 1981).

Os dados meteorológicos foram coletados em duas EMAs: uma da marca Campbell Scientific calibrada (EMA-C), instalada em área experimental do LIAP, situada a $21^{\circ}15'22''$ de latitude sul, $48^{\circ}18'58''$ de longitude oeste e altitude de 575 m. Uma instalada na Estação Agroclimatológica (EMA-EA) do Departamento de Ciências Exatas, situada a $21^{\circ}14'05''$ de latitude sul, $48^{\circ}17'09''$ de longitude oeste e altitude de 615,01 m.

A EMA-C (Figura 1) é composta por sistema de aquisição de dados da marca Campbell Scientific (CR10X), sensor de precipitação pluviométrica Handar (modelo 444A), velocidade do vento, modelo 03001 RM Young Co, radiação solar global, modelo CM3 Kipp & Zonen e temperatura e umidade do ar Rotronic (modelo Hygroclip).



Figura 1. Estação meteorológica automática da Campbell Scientific, calibrada (EMA – C).

A descrição da EMA-EA (Figura 2) do Departamento de Ciências Exatas, localizada na Estação Agroclimatológica, pode ser obtida em: <https://www.fcav.unesp.br/#!/estacao-agroclimatologica/sensores-da-estacao/>



Figura 2. Estação Agroclimatológica (EMA-EA).

Foram comparados dos dados das EMAs por meio da metodologia de Turco (2024) que utiliza as seguintes técnicas: estimativa da radiação solar global, dupla massa, comparabilidade operacional de medições meteorológicas, assimetria e curtose. Os dados coletados nas EMA-EA foram comparados aos dados coletados no mesmo período, obtidos na EMA-C.

Para verificação da radiação solar global das EMAs foi utilizada a técnica de estimativa da radiação solar global descrita por Allen (1996).

Para comparação dos dados meteorológicos das EMAs foi utilizada a técnica de dupla massa; desenvolvido pela United States Geological Survey (USGS) (TUCCI, 2007).

As variáveis meteorológicas das EMAs foram comparadas por meio da norma ASTM D4430 - Standard Practice for Determining the Operational Comparability of Meteorological Measurements (ASTM, 2023) descrita resumidamente a seguir.

Diferença sistemática (d) - a média das diferenças na medição pelos dois sistemas:

$$d = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{ai} - X_{bi}) \quad (2)$$

Comparabilidade operacional (C) - a raiz quadrada média (rms) da diferença entre leituras simultâneas de dois sistemas medindo a mesma quantidade no mesmo ambiente:

$$C = \pm \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{ai} - X_{bi})^2} \quad (3)$$

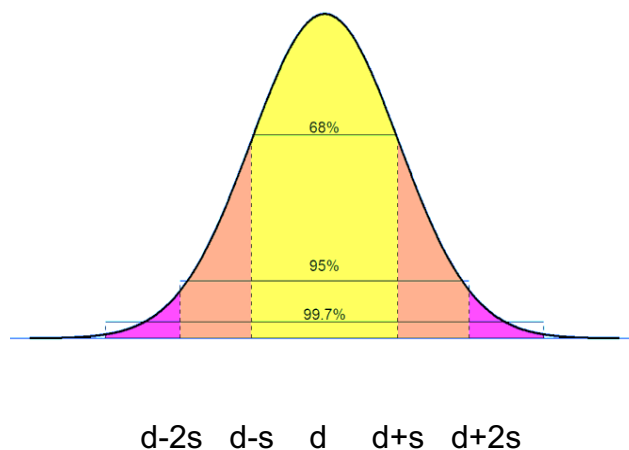
onde: X_{ai} - i-ésima medição feita por um sistema, X_{bi} - i-ésima medição simultânea feita por outro sistema, e N - número de amostras usadas.

Desvio padrão estimado da diferença (s) - a medida da dispersão de uma série de diferenças em torno de d.

$$s = \pm \sqrt{C^2 - d^2} \quad (4)$$

Neste trabalho foi adotado que a distribuição normal (Gaussiana) as medidas das diferenças caem dentro de $\pm 2s$ (95 % de confiança), ou seja, 95 por cento das medidas das diferenças caem dentro $\pm 2s$ de d (EA, 2022).

Distribuição Normal (Gaussiana)



O cálculo da assimetria e curtose foi realizado por meio do coeficiente de assimetria e curtose de Fisher (FÁVERO e BELFIORE, 2017).

O coeficiente de assimetria de Fisher pode ser escrito como:

$$g_1 = \frac{n^2 \cdot M_3}{(n-1) \cdot (n-2) \cdot S^3} \quad (4)$$

Sendo que o terceiro momento é:

$$M_3 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3}{n} \quad (5)$$

A interpretação, será: $g_1 = 0$, a distribuição é simétrica; $g_1 > 0$, a distribuição é assimétrica positiva (à direita) e $g_1 < 0$, a distribuição é assimétrica negativa (à esquerda);

O coeficiente de curtose de Fisher pode ser escrito como:

$$g_2 = \frac{n^2 \cdot (n+1) \cdot M_4}{(n-1) \cdot (n-2) \cdot (n-3) \cdot S^4} - 3 \cdot \frac{(n-1)^2}{(n-1) \cdot (n-3)} \quad (6)$$

Em que o quarto momento é dado por:

$$M_4 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^4}{n} \quad (7)$$

A interpretação, será: $g_2 = 0$, a curva é normal padrão, isto é, mesocúrtica; $g_2 > 0$, grau de achatamento baixo, a curva é leptocúrtica e $g_2 < 0$, grau de achatamento alto, a curva é platicúrtica.

Para avaliação da ETo da EMA-EA em relação a EMA-C foi utilizada a técnica de dupla massa; desenvolvido pela United States Geological Survey (USGS) (Tucci, 2007).

Para a avaliação dos dados médios diários da ETo foi utilizada análise de regressão e considerando o modelo linear ($y = ax + b$), na qual a variável dependente foram as estimativas da ETo pelo método de Penman-Monteith da

EMA-EA e a variável independente as estimativas da ETo pelo método de Penman-Monteith da EMA-C.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por meio da meteorologia de Turco (2024) foi realizada a verificação dos dados meteorológicos das EMAs. Os resultados seguintes referem-se ao ano de 2024.

A radiação solar global medidas pela EMA-C e EMA-EA apresentam valores inferiores a radiação solar global estimada pela técnica de estimativa da radiação solar global (Figura 3 e 4). Os resultados obtidos corroboram com os de Costa et al. (2024) que avaliaram os dados radiação solar global da EMA-C por meio da meteorologia de Turco (2024).

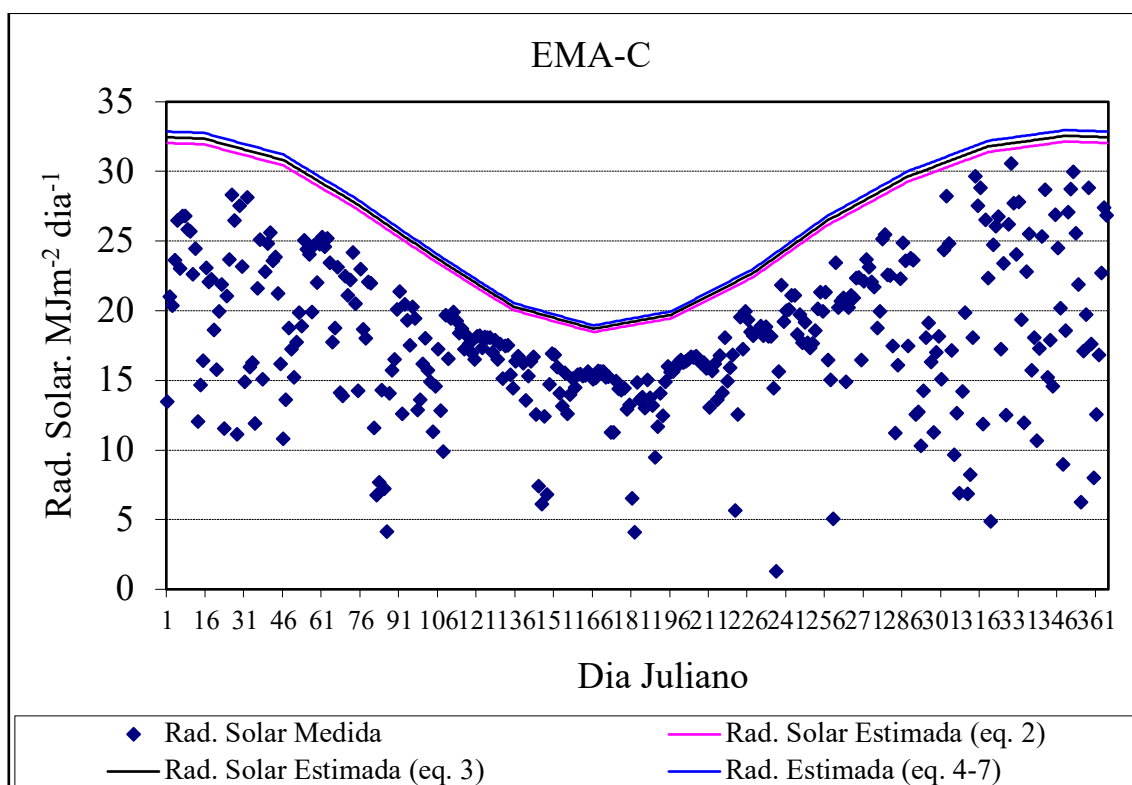


Figura 3. Radiação solar medida na EMA-C e estimada por três equações. Ano: 2024.

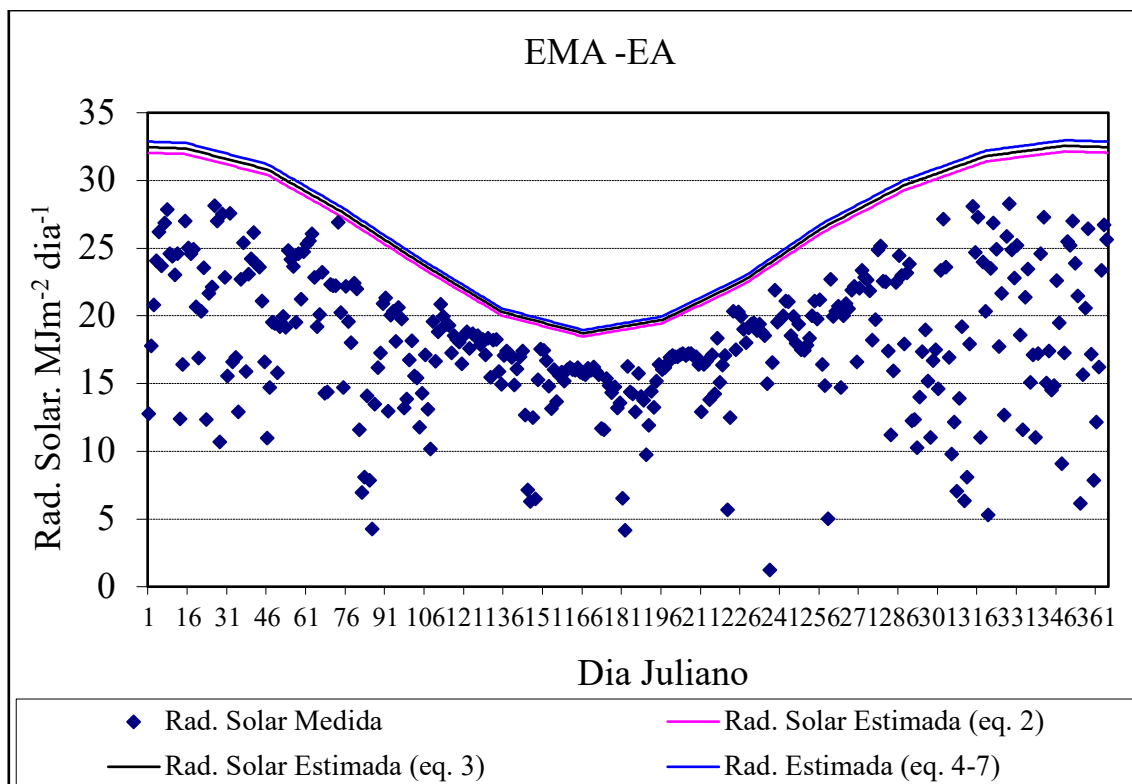


Figura 4. Radiação solar medida na EMA-EA e estimada por três equações. Ano: 2024.

Por meio da técnica da dupla massa os dados meteorológicos das EMAs foram comparados (Tabela 1).

Com base no coeficiente de determinação (r^2) e angular é possível verificar que os sensores (temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, radiação solar global e precipitação pluviométrica) da EMAs estão operando de forma satisfatória (Tabela 1). Provavelmente a diferença do sensor de velocidade do vento da EMA-EA em relação a EMA-C é devido a altitude que foram instaladas.

Seibert e Móren (1999) testaram em laboratório seis tipos de pluviômetros de báscula e concluíram que, para precipitações acima de 100 mm, há uma tendência de o sensor não registrar na mesma velocidade em que a precipitação ocorre, uma vez que uma parte da água não é computada pelo sensor.

Tabela 1. Comparação da temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar global e precipitação pluviométrica da EMA-EA, em relação a EMA-C, por meio da técnica de dupla massa - coeficiente de determinação (r^2) e equação ($y = a x$). Ano: 2024

EMAs	Ano	TEMPERATURA DO AR		UMIDADE RELATIVA DO AR		VELOCIDADE DO VENTO		RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL		PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA	
		Equação	r^2	Equação	r^2	Equação	r^2	Equação	r^2	Equação	r^2
EMA-EA	2024	$y = 0,97 x$	1	$y = 1,03 x$	0,99	$y = 0,86 x$	0,99	$y = 0,98 x$	0,99	$y = 0,92 x$	0,99

Foram comparados dos dados meteorológicos (temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar global) das EMAs, por meio da diferença sistemática (d), desvio padrão estimado da diferença (s) e Confiança (c) (Tabela 2) e por meio do coeficiente de assimetria e curtose (Tabela 3).

Os dados apresentaram d e s aceitáveis, ou seja, valores próximos e 95% das medidas das diferenças caíram dentro $\pm 2s$. Os dados de umidade relativa do ar e radiação solar global apresentaram coeficiente de assimetria (g1) maior que zero, ou seja, distribuição assimétrica positiva (à direita). Já os dados de temperatura do ar e velocidade do vento tiveram coeficiente de assimetria (g1) menor que zero, ou seja, distribuição assimétrica negativa (à esquerda).

Os dados de temperatura do ar e umidade relativa do ar apresentaram coeficiente de curtose (g2) menor que zero, ou seja, grau de achatamento alto, curva platicúrtica. Já os dados de velocidade do vento e radiação solar apresentaram coeficiente de curtose (g2) maior que zero, ou seja, grau de achatamento baixo, curva leptocúrtica.

Tabela 2. Comparação da temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e Radiação solar global da EMA-EA, em relação a EMA-C, por meio da diferença sistemática (d), desvio padrão estimado da diferença (s) e Confiança (c). Ano: 2024.

EMAs	Ano	TEMPERATURA DO			UMIDADE			VELOCIDADE DO			RADIAÇÃO SOLAR		
		AR			RELATIVA DO AR			VENTO			GLOBAL		
		d	s	c	d	s	c	d	s	c	d	s	c
				(%)			(%)			(%)			(%)
EMA-EA	2024	-0,48	0,62	96,99	2,57	2,67	95,61	-0,2	0,27	94,79	-0,09	1,18	96,43

Tabela 3. Comparação da temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e Radiação solar global da EMA-EA, em relação a EMA-C, por meio do coeficiente de assimetria e curtose de Fisher. Ano: 2024.

EMAs	Ano	TEMPERATURA DO		UMIDADE		VELOCIDADE DO		RADIAÇÃO	
		AR		RELATIVA DO AR		VENTO		SOLAR GLOBAL	
		g1	g2	g1	g2	g1	g2	g1	g2
EMA-EA	2024	-0,42	-0,43	0,81	-0,27	-0,18	0,59	2,92	51

Após a comparação dos sensores das EMAs por meio da metodologia de Turco (2024) verifica-se que eles estão operando dentro das especificações técnicas, fornecendo dados confiáveis para estimativa da Evapotranspiração de

Referência (ET_o).

De acordo com Allen (1996) os registros de dados produzidos por estações meteorológicas podem ser comparados aos registros de estações vizinhas (próximas) para verificar se houve alteração no funcionamento dos sensores.

Por meio da técnica da dupla massa os dados da ET_o da EMA-C foram comparando com os da EMA-EA (Figura 5).

A soma acumulativa da ET_o da EMA-C e EMA-EA no ano de 2024 foi de 1.465,31 mm e 1.555,13 mm, respectivamente (Figura 5).

O teste da análise acumulativa mostrou uma boa correlação entre a ET_o das duas estações. Com base no coeficiente de determinação (R^2) e angular é possível verificar que os dados de estimativas diárias da evapotranspiração de referência (ET_o) apresentam diferenças aceitáveis (Figura 5).

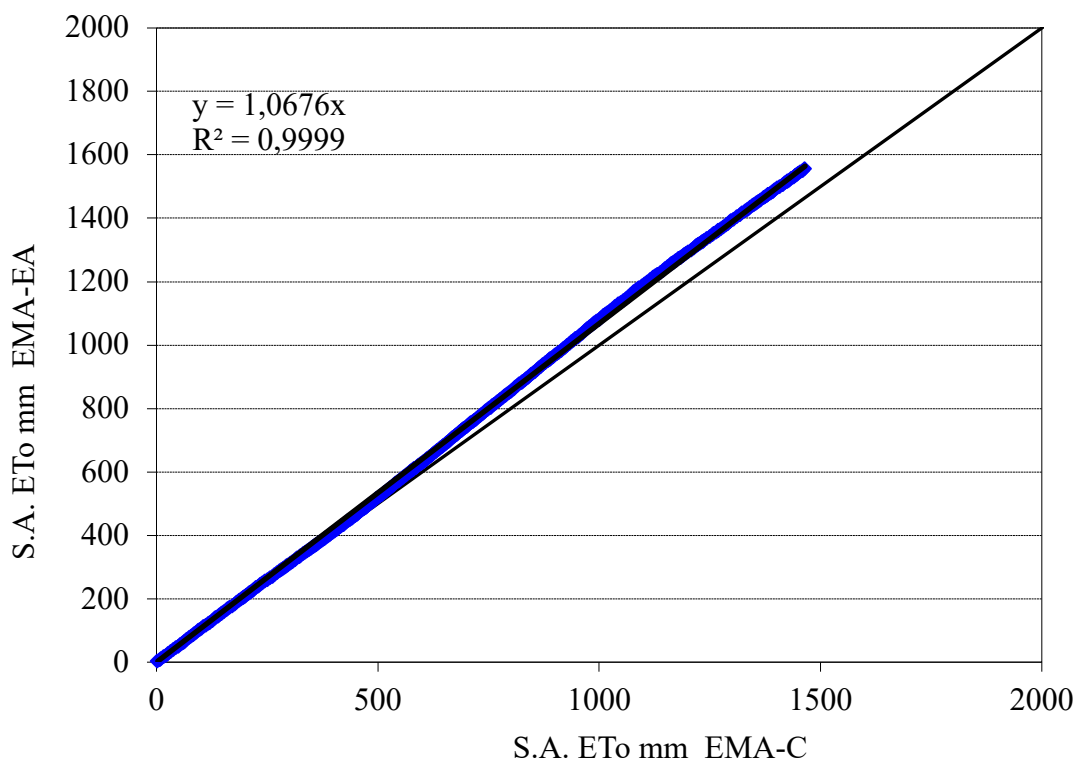


Figura 5. Soma acumulativa da ETo mm das EMAs.

A Figura 6 mostra as relações dos valores diários obtidos pela EMA-C e os obtidos pela EMA-EA. Essas comparações fornecem a base para avaliar os dados obtidos pela EMA-C em relação aos obtidos pela EMA-EA. Se os dados obtidos na EMA-C forem semelhantes aos obtidos pela EMA-EA, a linha de regressão deveria sobrepor-se à reta $y = x$, e os pares de pontos deveriam estar próximos à linha de regressão. Se a linha de regressão estiver afastada da reta $y = x$, e os pares de pontos estiverem próximos à linha de regressão, isso significa que os dados obtidos pela EMA-C apresentam uma diferença aceitável em relação aos obtidos pela EMA-EA, ou seja, a equação pode ser utilizada com precisão para fazer a correção dos dados obtidos na estação da EMA-EA em relação aos obtidos na EMA-C.

Verifica-se, na Figura 6, que a linha de regressão obtida pelas estimativas diárias da ETo da EMA-C em relação aos da ETo da EMA-EA. As estimativas diárias da ETo da EMA-EA são subestimadas em relação aos da EMA-C. Ainda analisando a Figura 6, observa-se uma boa equação de correlação, confirmado pelo valor do coeficiente de determinação R^2 (0,9937).

Turco e Carleto (2017) avaliaram a estimativa diária da evapotranspiração de referência (ETo) de duas EMAs utilizando análise de regressão. Concluíram que as estimativas diárias da (ETo) apresentam diferenças aceitáveis.

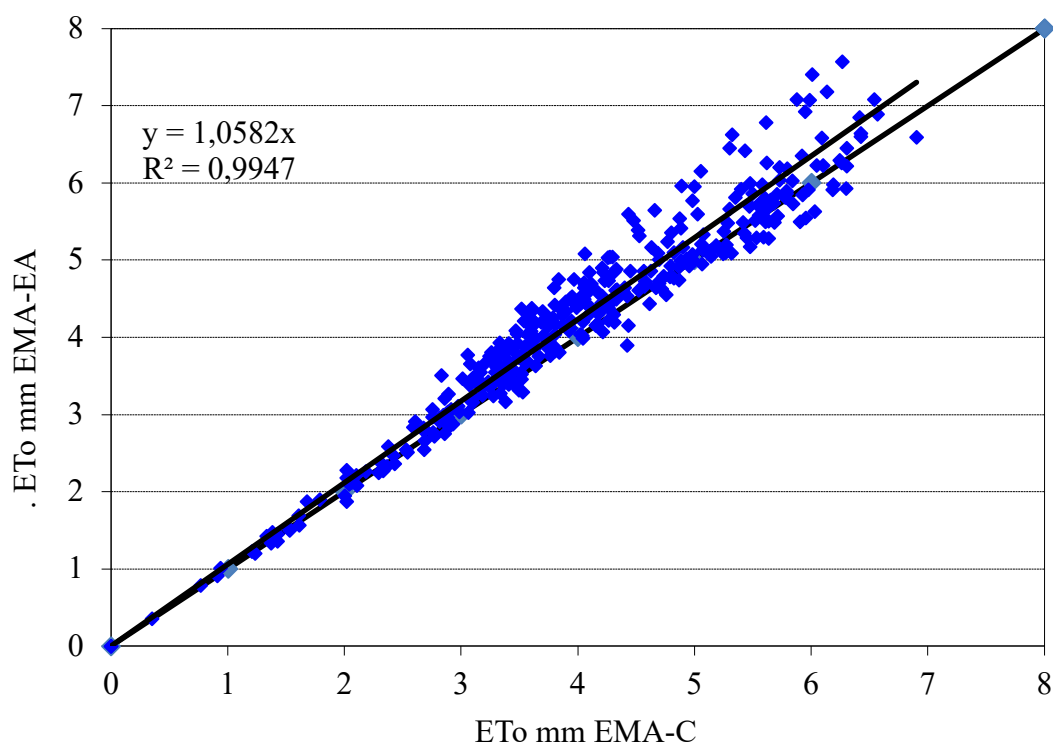


Figura 6. Regressão linear entre valores diários da evapotranspiração de referência (ETo), em mm dia^{-1} , estimados com dados obtidos na EMA-C, segundo o método de Penman-monteith (PM), em relação aos valores diários da ETo, estimados pela EMA-EA,

5. CONCLUSÃO

A metodologia utilizada foi eficiente para verificar os dados meteorológicos e pode ser utilizada periodicamente para verificar os sensores de estações meteorológicas automáticas afastadas. Os sensores das estações verificadas estão dentro das especificações técnicas fornecendo dados confiáveis e não precisam ser substituídos ou calibrados

O teste da análise acumulativa mostrou uma boa correlação entre os de ETo das duas estações.

Análise dos Resultados, utilizando-se análise de regressão linear, nas condições do desenvolvimento deste trabalho, levam a concluir que os dados de estimativas diárias da evapotranspiração de referência (ETo) apresentam diferenças aceitáveis.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G. Assessing integrity of weather data for reference evapotranspiration estimation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 122, n. 2, p.97-106, 1996.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Evapotraspiration del cultivo: guias para la determinación de los requerimientos de água de los cultivos**. Roma: FAO, 2006. 298p. (Estúdio FAO Riego y Drenaje Paper, 56).

ASTM - SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. D4430 – 00 (Reapproved 2023). **Standard Practice for Determining the Operational Comparability of Meteorological Measurements**. <https://www.astm.org/d4430-00r15.html>

CALIFÓRNIA IRRIGATION MANAGEMENT INFORMATION SYSTEM (CIMIS). **Publicações**. Disponível em: < <http://www.cimis.water.ca.gov/Resources.aspx> >. Acesso em: 25 mar. 2014.

CARLETO, N. **Integridade de dados meteorológicos para uso em modelo hidrológico**. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal-SP, 2016.

COSTA, D.A.M; TURCO, J.E.P; SANTANA, M.A.A; FURLANI, C.E.A. Calibração e verificação de sensores para estimativa da evapotranspiração de referência. **Caderno Pedagógico**. Curitiba -PR, v. 21, n.8, p. 1-19. 2024.

CUNHA, A. R.; MARTINS, D. Estudo comparativo entre elementos meteorológicos obtidos em estações meteorológicas convencional e automática em Botucatu, SP. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 12, n. 1, p. 103-111, 2004.

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**, v. 22, p. 324-339, 2018.

EA-EUROPEAN ACCREDITATION. EA-4/02 M: 2022. **Evaluation of the Uncertainty of Measurement in calibration**. EA, p.1-78, 2022. Disponível em: < <https://european-accreditation.org/> >. Acesso em: 16 outubro. 2023.

ESTÉVES, J., GAVILÁN, P., GIRÁLDEZ, J.V. Guidelines on validation procedures for meteorological data from automatic weather stations. **Journal of Hydrology**, v. 402, p. 144-154, 2011a.

ESTÉVEZ, J.; GAVILÁN, P.; GARCÍA-MARÍN, A. P. Data validation procedures in agricultural meteorology – a prerequisite for their use. **Advanced in Science and Research**, v. 6, p. 141-146, 2011b.

FÁVERO, L. P., BELFIORI, P. **Manual de análise de dados**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

ITIER, B. Une méthode simple por la mesme de l'évapotranspiration réelle à l'échelle de la parcelle. **Agronomie**, v. 1, n.10, p. 869-876, 1981.

JAMIL, I.; JAMIL, R.; JINQUAN, Z.; MING, L.; ANSAR, A.; AHMED, R.; JAFAR, I.; HUSSIAN, R.; JAMIL, R. Application and composition observing system of automatic weather station (AWS) and power grid (PGMIS). **Electrical and Electronics Engineering: An International Journal (ELELIJ)**, v. 2, n. 4, p.31-44, 2013.

LIMA JUNIOR, J.C.; ARRAES, F.D.A.; OLIVEIRA, J.B.; NASCIMENTO, F.A.L.; MACÊDO, K.G. Parametrização da equação de Hargreaves e Samani para estimativa da evapotranspiração de referência no Estado do Ceará, Brasil. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.47, n.3, p.447-454, 2016.

LIMA, J.C.O; BISPO, F.S; RIFFEL, D.B. Comparação entre dados de radiação solar medidas por estações meteorológicas automáticas no Estado de Sergipe com valores estimados a partir de imagens de satélite. In: SIMPÓSIO SERGIPANO DE ENERGIA SOLAR. 2016, Aracaju. **Anais....** Aracaju.

NISHIMURA, M.; AOKI, T.; NIWANO, M.; MATOBA, S.; TANIKAWA, T.; YAMASAKI, T.; YAMAGUCHI, S.; FUJITA, K. Quality-controlled meteorological datasets from SIGMA automatic weather stations in northwest Greenland, 2012–2020, **Earth Syst. Sci. Data. Discuss.** [preprint], <https://doi.org/10.5194/essd-2023-116>, in review, 2023.

OLIVEIRA, A. D.; ALMEIDA, B. M.; CAVALCANTI JÚNIOR, E. G.; SOBRINHO, J. E.; VIEIRA, R. Y. M. Comparação de dados meteorológicos obtidos por

estação convencional e automática em Jaboticabal – SP. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 23, n. 4, p. 108-114, 2010.

OLIVEIRA, P. J. D.; TURCO, J. E. P.; CARLETO, N. Integridade de dados meteorológicos obtidos por estação meteorológica automatizada. In: XLIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2015. São Pedro. **Anais ...** São Pedro, 2015.

SCARPARE, F. V.; OLIVEIRA, G. X. S.; SIMON, J.; PIEDADE, S. M. S.; ANGELOCCI, L. R. Comparação da uniformidade de dados meteorológicos de estação convencional e automática – Piracicaba/SP. In: XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia. 2006. Florianópolis. **Anais ...** Florianópolis: Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2006.

SEIBERT, J.; MORÉN, A. Reducing systematic errors in rainfall measurements using a new type of gauge. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 98-99, p.341-348, 1999.

SHARAN, R. V. Development of a remote automatic weather station with a PC – based datalogger. **International Journal of Hybrid Information Technology**, v. 7, n. 1, 2014, p. 233- 240.

SILVA, A.A.G. da.; ANGELOCCI, L.R.; NOGUEIRA, L.C.; ANDRADE, C.L.T. Avaliação da eficiência de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 22, 1993., Ilhéus. **Anais...** SBEA/CEPLAC, 1993. p.2465-2478.

SOARES, T.G; MENDES, C.C; CLOSOSKI, G; SOUZA, G.T; PEREIRA, A.L.V; CONTI, W.R.P, MARTINS; F.R. Data-QS-Ferramenta numérica para

qualificação de dados coletados em estações automáticas de superfície.

Brazilian Journal of Development, v.5, n.7, p. 9641-9651, 2019.

STRASSBURGER, A. S.; MENEZES, A. J. E. A.; PERLEBERG, T. D.; EICHOLZ, E. D.; MENDEZ, M. E. G.; SCHÖFFEL, E. R. Comparação da temperatura do ar obtida por estação meteorológica convencional e automática. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 2, p. 273-278, 2011.

TOLMASQUIM, M; GUERREIRO, A; GORINI, R. Matriz Energética Brasileira: Uma Prospectiva. **Novos Estudos**, v.3, p. 46-69, 2007.

TUCCI, C. E. M. (2007). **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. Ed. Porto Alegre: ABRH, 2007.

TURCO, J.E.P. Metodologia para verificar dados meteorológicos para estimativa da evapotranspiração de referência. **Contribuciones a Las Ciencias Sociales**, v. 17, p. n.1, 2455-2469, 2024.

TURCO, J.E.P. Estimativa da evapotranspiração de referência com precisão. **Engenharia na Agricultura**. Viçosa, v.27, n.2, p. 132-141, 2019.

TURCO, J. E. P.; BARBOSA, J. C. Avaliação de duas estações meteorológicas automatizadas, para estimativa diária da evapotranspiração de referência obtida pelo método de Penman-Monteith. **Irriga: Brazilian Journal of Irrigation and Drainage**. Botucatu-SP, v. 13, n. 3, p.339-354, 2008.

TURCO, J.E.P.; CARLETO, N. Integridade de dados meteorológicos para uso em modelo hidrológico. **Revista brasileira de agricultura irrigada – RBAI**, Fortaleza-CE, v.11, n.8, p.2084- 2097, 2017.

TURCO, J.E.P.; FERNANDES, E.J. Construção e avaliação de um psicrômetro de termopares. **Engenharia Agrícola**. Jaboticabal, v.23, n.3, p.468-477, 2003.

VIEIRA, S.; OSORIO, D. M. M.; QUEVEDO, D. M.; ADAM, K. N.; PEREIRA, M. A. F. Metodologia de imputação de dados hidrometeorológicos para análise de séries históricas – Bacia do Rio dos Sinos, RS, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 23, p. 189-204, 2018.

WMO. World Meteorological Organization. **Guide to meteorological instruments and methods of observation WMO-Nº. 8**. Geneva 2, Switzerland, p.161-173, 2008.