

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**CALIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO DE SENSORES PARA
ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA**

Daniel Aparecido Morello da Costa

Engenheiro Eletricista

2024

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**CALIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO DE SENSORES PARA
ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA**

Discente: Daniel Aparecido Morello da Costa

Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Pitelli Turco

Coorientador: Prof. Dr. Carlos Eduardo Angeli Furlani

Coorientador: Me. Márcio Antônio Aparecido Santana

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo).

2024

D118c	<p>da Costa, Daniel Morello</p> <p>Calibração e Verificação de Sensores para Estimativa da Evapotranspiração de Referência / Daniel Morello da Costa. -- Jaboticabal, 2024</p> <p>77 p.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal</p> <p>Orientador: José Eduardo Pitelli Turco</p> <p>Coorientador: Carlos Eduardo Angeli Furlani</p> <p>1. Calibração de sensores. 2. Evapotranspiração de referência. 3. Segurança hídrica. 4. Metrologia ambiental. I. Título.</p>
-------	---

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal




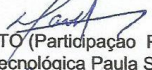
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

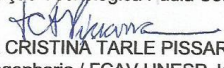
TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: CALIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO DE SENSORES PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA

AUTOR: DANIEL APARECIDO MORELLO DA COSTA
ORIENTADOR: JOSÉ EDUARDO PITELLI TURCO
COORIENTADOR: CARLOS EDUARDO ANGELI FURLANI
COORIENTADOR: MARCIO ANTONIO APARECIDO SANTANA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo), pela Comissão Examinadora:


Prof. Dr. JOSÉ EDUARDO PITELLI TURCO (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia / FCAV UNESP Jaboticabal


Prof. Dr. NIVALDO CARLETO (Participação Presencial)
Centro Est. de Educação Tecnológica Paula Souza / FATEC - Taquaritinga/SP


Profa. Dra. TERESA CRISTINA TARLE PISSARRA (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia / FCAV UNESP Jaboticabal

Jaboticabal, 31 de agosto de 2024

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

DANIEL APARECIDO MORELLO DA COSTA – Nascido em 12 de outubro de 1994, na cidade de Jaboticabal/SP. Filho de Reinaldo Ricardo da Costa e Maria de Lourdes Morello Costa. Solteiro. Graduado em Engenharia Elétrica, em novembro de 2021, pelo Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de São Paulo - IFSP. Ingressou, em agosto de 2022, no Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias da Universidade Estadual Paulista – UNESP, trabalhou em 2021 como projetista Elétrico, elaborando projetos na área de Automação Industrial, na empresa Drivetech, na cidade de Sertãozinho/SP.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Reinaldo e Maria de Lourdes, ao meu irmão, Danilo Costa, pelo apoio e inspiração durante todo o curso de mestrado.

Ao meu orientador, Prof. José Eduardo Pitelli, pela oportunidade de trabalhar neste projeto, pela amizade, pelas orientações e por ser um profissional dedicado e exemplar, e Coorientadores, Marcio Aparecido Santana e Carlos Eduardo Furlani, pela orientação e persistência nas etapas e resultados da pesquisa.

À Universidade Estadual de São Paulo (UNESP), ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo e ao Laboratório de Instrumentação, Automatização e Processamento (LIAP) por tornarem possível a realização deste trabalho. Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) pela disponibilidade de tempo e laboratórios necessários para avaliar e calibrar os instrumentos utilizados na pesquisa, dando qualidade e confiança ao trabalho realizado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Por fim, agradeço aos avaliadores pelas correções e contribuições a esta dissertação.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	iii
ABSTRACT.....	iv
LISTA DE QUADRO E TABELAS.....	v
LISTA DE FIGURAS.....	vi
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....	vii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	2
2.1 EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ET_0).....	2
2.2 ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS AUTOMÁTICAS.....	2
2.3 CALIBRAÇÃO DE SENSORES.....	4
2.3.1 Temperatura do ar.....	5
2.3.2 Umidade relativa do ar.....	6
2.3.3 Radiação solar global.....	7
2.3.4 Velocidade do vento.....	9
2.3.5 Precipitação pluviométrica.....	10
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	13
3.1 ÁREA EXPERIMENTAL.....	13
3.2 MÉTODO DE ESTIMATIVA DA ET_0	13
3.3 DADOS METEOROLÓGICOS.....	14
3.3.1 EMA-DI instalada na área experimental do LIAP.....	15
3.3.2 EMA-C instalada na área experimental do LIAP.....	15
3.4 CALIBRAÇÃO DOS SENSORES.....	16
3.5 VERIFICAÇÃO DOS SENSORES DA EMA-DI.....	16
3.5.1 Descrição da técnica de estimativa da radiação solar global.....	17
3.5.2 Descrição da técnica de dupla massa desenvolvida pela USGS.....	20
3.5.3 Descrição da técnica de comparabilidade operacional de medições meteorológicas.....	20
3.5.4 Descrição da técnica de assimetria e curtose de Fisher.....	22
3.6 AVALIAÇÃO DA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE	

REFERÊNCIA (ET _o) DA EMA-DI EM RELAÇÃO EMA-C	23
3.6.1 Descrição da técnica de determinação de erros	23
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
4.1 CALIBRAÇÃO DE SENSORES	26
4.1.1 Temperatura do ar	26
4.1.2 Umidade relativa do ar	36
4.1.3 Radiação solar global	40
4.1.4 Velocidade do vento.....	41
4.1.5 Precipitação pluviométrica.....	42
4.2 VERIFICAÇÃO DOS SENSORES DA EMA-DI.....	45
4.3 AVALIAÇÃO DA ET _o DA EMA-DI EM RELAÇÃO EMA-C	49
4.3.1 Avaliação da ET_o por meio da técnica de dupla massa	49
4.3.2 Avaliação da ET_o considerando os erros da ET_o	49
5 CONCLUSÃO	51
REFERÊNCIAS.....	52
ANEXOS	59

CALIBRAÇÃO E VERIFICAÇÃO DE SENSORES PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA

RESUMO - Com este trabalho o objetivo foi calibrar sensores de uma estação meteorológica automática e verificar os sensores de outra e verificar a influência da calibração de sensores na estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o). Os dados meteorológicos avaliados foram radiação solar global, temperatura do ar, umidade do ar, velocidade do vento e precipitação pluviométrica. 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. Os dados meteorológicos foram obtidos por duas estações meteorológicas automáticas: da marca Davis Instruments (EMA-DI) e da marca Campbell Scientific, calibrada (EMA-C). As duas estações foram instaladas na área experimental do LIAP (Laboratório de Instrumentação Automação e processamento) do Departamento de Engenharia da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, situada a 21°15'22" S, 48°18'58" 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 verificar os dados da EMA-DI em relação a EMA-C. Foram estimadas a ET_o com os dados meteorológicos das duas EMAs. No período estudado os sensores calibrados não influenciaram estimativa da ET_o pelo método de PM, mas influenciaram na incerteza da estimativa da ET_o ($\pm\Delta ET_o$), contribuindo positivamente em futuros estudos de segurança hídrica na região.

Palavras-chave: Calibração de Sensores, Incerteza de Medição, Metrologia Ambiental

CALIBRATION AND VERIFICATION OF SENSORS TO ESTIMATE REFERENCE EVAPOTRANSPIRATION

ABSTRACT – With this work the objective was to calibrate sensors of an automatic meteorological station and verify the sensors of another and verify the influence of sensor calibration on the estimation of reference evapotranspiration (ET_o). The meteorological data evaluated were global solar radiation, air temperature, air humidity, wind speed and rainfall. The daily ET_o estimation method evaluated was the Penman-Monteith (PM), recommended by FAO as a standard method for estimating ET_o. Meteorological data were obtained by two automatic meteorological stations: Davis Instruments (EMA-DI) and Campbell Scientific, calibrated (EMA-C). The two stations were installed in the experimental area of the LIAP (Instrumentation Automation and Processing Laboratory) of the Department of Engineering at São Paulo State University (UNESP), School of Agricultural and Veterinary Sciences, Jaboticabal, located at 21^o15'22" S, 48^o18'58" W. A methodology was used that has the following techniques: estimation of global solar radiation, double mass, operational comparability of meteorological measurements, asymmetry and kurtosis, to verify the EMA-DI data in relation to EMA-C. ET_o was estimated with meteorological data from both EMAs. During the study period, the calibrated sensors did not influence the ET_o estimate by the PM method, but they influenced the uncertainty of the ET_o estimate ($\pm\Delta ET_o$), contributing positively future water security studies in the region.

Keywords: Sensor Calibration, Measurement Uncertainty, Environmental Metrology

LISTA DE QUADRO E TABELAS

Quadro 1. Contribuições de Incertezas presentes na calibração de temperatura	32
Tabela 1. Valores de k da distribuição-t para n graus de liberdade.....	35
Tabela 2. Valores de k da distribuição-t para n graus de liberdade.....	36
Tabela 3. Resultado da calibração de umidade relativa	40
Tabela 4. Resultados da calibração do piranômetro	41
Tabela 5. Resultados obtidos na calibração do anemômetro.....	42
Tabela 6. Dados obtidos durante a calibração do pluviômetro.....	44
Tabela 7. Resultados da calibração do pluviômetro.....	45
Tabela 8. Verificação da temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar global da EMA-DI, em relação a EMA-C, por meio da diferença sistemática (d), desvio padrão estimado da diferença (s) e Confiança (c).	48
Tabela 9. Verificação da Precipitação Pluviométrica da EMA-DI, em relação a EMA-C, por meio da diferença sistemática (d), desvio padrão estimado da diferença (s), Confiança (c).	48
Tabela 10. Verificação da temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, Radiação solar global e precipitação pluviométrica da EMA-DI, em relação a EMA-C, por meio do coeficiente de assimetria e curtose de Fisher. 48	

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Termohigrômetro Rotronic com protetor de radiação solar direta	5
Figura 2. Piranômetro marca Kipp & Zonen, modelo CM3	8
Figura 3. Anemômetro.....	9
Figura 4. Ilustração de um anemômetro, com medidas de referência.....	10
Figura 5. Pluviômetro de báscula, marca Vaisala, modelo 444A	11
Figura 6. Estação meteorológica automatizada da <i>Davis Instruments</i> (EMA – DI)	14
Figura 7. Estação meteorológica automatizada da <i>Campbell Scientific</i> (EMA-C)	15
Figura 8. Distribuição Normal (Gaussiana)	21
Figura 9. Câmara climática com padrões de temperatura de ponto de orvalho e de temperatura do ar e termohigrômetro sob calibração.....	26
Figura 10. Metodologia utilizada para a calibração dos sensores	27
Figura 11. Calibração de temperatura do ar.....	28
Figura 12. Calibração de temperatura do ar (ponto nominal 25 °C)	29
Figura 13. Box-plot após a filtragem de <i>outliers</i>	29
Figura 14. Visão interna da câmara climática e seus pontos de avaliação da uniformidade térmica (levantamento de gradiente térmico)	30
Figura 15. Calibração de temperatura do ar (coeficientes de Kessel).....	31
Figura 16. Diagrama de Ishikawa das fontes de incerteza	33
Figura 17. Faixas de trabalho de umidade relativa do ar da câmara climática utilizada na calibração.....	36
Figura 18. Display (mostrador e teclado digital) e momento de configuração da câmara climática	37
Figura 19. Box-plot após a filtragem dos dados discrepantes (% u.r.)	38
Figura 20. Calibração de umidade relativa do ar (coeficientes de Kessel).	39
Figura 21. A) Configuração da bomba peristáltica. / B) Medições do diâmetro da área de captação do pluviômetro	43
Figura 22. Radiação solar medida. a) EMA-C. / b) EMA-DI	46
Figura 23. Soma acumulativa dos valores diários da Radiação solar global, umidade relativa do ar, temperatura do ar, velocidade do vento precipitação pluviométrica. máxima e mínima, EMA-C e EMA-DI.	47
Figura 24. Soma acumulativa da ETo das EMA-C e EMA-DI.....	49
Figura 25. Valores da ETo $\pm\Delta ETo$, para EMA-C e EMA-DI.....	50

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

% - porcentagem

BIPM - Bureau Internacional de Pesos e Medidas

C - Comparabilidade operacional

cm – Centímetro

d - Diferença sistemática

EMAs - Estações Meteorológicas Automatizadas

EMs - Estações Meteorológicas

ETo - Evapotranspiração De Referência

FAO - Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura

GAMP - Guia de Práticas Meteorológicas Agrícolas

GUM - Guia para a Expressão de Incerteza de Medição

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

k - Fator De Abrangência

LIAP - Laboratório de Instrumentação Automação e Processamento

m² – Metro Quadrado

ml – Mililitro

mm – Milímetro

mV - Milivolts

NPL - *National Physical Laboratory*

PV - Sistemas Fotovoltaicos

RH - Umidade Relativa Do Ar

rms - Raiz Quadrada Média

Rso - Radiações De Ondas Curtas

s - Desvio Padrão Estimado Da Diferença

SI - Sistema Internacional de Unidades

t - Distribuição

T - Temperatura Termodinâmica

u.r. – Umidade Relativa

UNESP - Universidade Estadual Paulista

USGS - *United States Geological Survey*

VIM - Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia

WMO - Organização Meteorológica Mundial

1 INTRODUÇÃO

Informações sobre a evapotranspiração de referência (ET_o) são ferramentas fundamentais tanto para o planejamento quanto para o manejo da irrigação. Assim, a não calibração dos sensores de estações meteorológicas automáticas para estimativa da ET_o em geral podem conduzir ao manejo inadequado da irrigação. Aplicações insuficientes ou em excesso de água resultam em perdas e prejuízos consideráveis às plantas e ao solo, diminuindo dessa forma, a eficiência do uso de irrigação (Silva *et al.*, 1993).

No Brasil existem várias estações meteorológicas sendo utilizadas no manejo de irrigação, por meio da determinação da estimativa da ET_o pelo método de Penman-Monteith, como uma técnica indireta e que conduz a uma estimativa das necessidades de água pelas plantas, utilizando um coeficiente de cultura. Assim, há a necessidade de ser verificada periodicamente a confiabilidade dos dados gerados e fornecidos por estas estações.

Importantes decisões são tomadas a partir de informações coletadas por meio de instrumentos de medida, das quais muitas das vezes são questionáveis devido à inexistência de rastreabilidade metrológica e da confiabilidade, induzindo o usuário a uma falsa sensação de segurança nos dados coletados (Bentley, 1998). Portanto, ao analisar as precisões das medições estamos abordando a instrumentação com confiabilidade dos dados. Partindo desse pressuposto, surgiu a necessidade da calibração dos sensores de temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento, radiação solar e precipitação pluviométrica.

O processo de calibração é caracterizado pela relação existente entre os valores medidos, os valores de referência, as diversas fontes de incertezas, a incerteza padrão combinada e a incerteza expandida de medição (Inmetro/IPQ, 2012).

Objetiva-se com este trabalho calibrar sensores de uma estação meteorológica automática e verificar os sensores de outra e verificar a influência da calibração de sensores na estimativa da ET_o pelo método de Penman-Monteith.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ET_o)

A evapotranspiração de referência (ET_o) é o principal método de estimativa para o cálculo da lâmina de irrigação a ser aplicada nas culturas. Na ET_o é relacionado o efeito da demanda atmosférica sobre as necessidades hídricas das plantas sendo que representa a combinação dos processos de evaporação e transpiração (Djaman *et al.*, 2018).

A ET_o é a entrada e a saída de água do sistema planta-atmosfera que condiciona a produção de biomassa vegetal (Wagle; Gowda, 2019). O manejo da irrigação de forma consistente minimiza o risco de redução da rentabilidade das produções agrícolas por utilizar quantidade ideal de água para o desenvolvimento. Por este motivo, o gerenciamento do balanço hídrico da planta é essencial para a produtividade das culturas irrigadas e eficiência do uso de água (Çetin; Köksal, 2018; Filgueiras *et al.*, 2019). A eficiência do uso da água na agricultura é pautada na relação entre a produção de biomassa e a quantidade de água aplicada (Souza *et al.*, 2019).

Para que o cálculo da ET_o seja feito de forma correta o primeiro passo é garantir a qualidade dos dados (Reboita; Kruche, 2018), realizada por meio da verificação de erros durante o registro dos dados, formatação, transmissão e arquivamento (WMO/TD - Nº 1186, 2003). A estimativa da ET_o está relacionada com a umidade relativa do ar, temperatura do ar, velocidade do vento e radiação solar realizadas de forma diária. Dessa forma, se esse cálculo for processado com dados obtidos de sensores descalibrados, a estimativa da ET_o terá incerteza referente a incerteza das quatro grandezas.

A precisão da estimativa de ET_o contribui não só com o uso racional da irrigação (Jamshidi *et al.*, 2019; Khand *et al.*, 2019; McCabe *et al.*, 2019), mas também para a regularização, planejamento e monitoramento do uso da água, além de avaliar o estado do sistema de irrigação e drenagem (Taghvaeian *et al.*, 2018).

2.2 ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS AUTOMÁTICAS

Os sistemas de aquisição automatizada 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 desenvolvimento das plantas cultivadas, melhorando o manejo das atividades agrícolas (Cunha; Martins, 2004).

A confiabilidade de dados meteorológicos obtidos por meio de sistema automático de aquisição de dados é função da escolha e manutenção dos sensores. Segundo Sentelhas *et al.* (1997), a escolha do sensor é de grande importância, devendo-se seguir a ordem de prioridade: precisão, tempo de resposta, etc. A precisão dos sensores é o que mais limita quanto ao objetivo da coleta e o manejo de recursos hídricos, visto que pode levar a erros grosseiros na determinação da evapotranspiração de referência (Barros *et al.*, 2009).

No Brasil, as Estações Meteorológicas (EMs) vêm sendo utilizadas com frequência nas universidades, no setor agrícola e alguns institutos de pesquisa (Turco; Carleto, 2017). Esse fato se dar porque trata-se de instrumentos práticos, de fácil e baixo custo na coleta de dados essenciais, que têm sido constantemente requeridos nos trabalhos acadêmicos, e nas prevenções de desastres naturais.

Embora seja difícil verificar o estado de conservação da malha de estações em operação atualmente no país, os dados fornecidos por elas não são de boa qualidade, havendo a necessidade de além de fazer a manutenção das estações, investimento para seu fortalecimento e expansão (Turco; Carleto, 2017). Dessa maneira, acredita-se que é essencial analisar a integridade destes dados para garantir a confiabilidade das informações climatológicas (Turco; Carleto, 2017), uma vez que para a aplicabilidade destes dados, torna-se imprescindível que eles sejam analisados quanto à integridade antes mesmo de serem disponibilizados para os usuários (WMO, 2008; Carleto, 2016).

Isso foi comprovado por Turco e Barbosa (2008) quando avaliaram a integridade de dados meteorológicos de duas EMs, uma do fabricante *Davis Instruments* e outra do fabricante *Campbell Scientific*, para detectar possíveis erros nas medidas dos sensores. E nesse caso, foram encontrados dados aceitáveis para as variáveis radiação solar e temperatura do ar. Por outro lado, não houve boa correlação quanto a comparação dos dados de umidade relativa do ar e velocidade do vento nas duas EMs.

Em discordância disso, Scarpate *et al.* (2006) demonstraram uniformidade de umidade relativa do ar entre estações meteorológicas convencional e automática, enquanto para Oliveira (2015), houve boa concordância das variáveis de temperatura e precipitação, o que indicou bom funcionamento dos sensores, quando comparou dados de duas EMs.

2.3 CALIBRAÇÃO DE SENSORES

A Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura (FAO), por meio da publicação “*Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage, paper 56*”, recomenda o Guia de Práticas Meteorológicas Agrícolas (GAMP), da Organização Meteorológica Mundial (WMO), para a utilização da instrumentação aplicada às estações meteorológicas agrícolas (FAO, 2006).

Para trabalhos de pesquisa em meteorologia agrícola, em muitos casos, são necessárias estações meteorológicas com equipamentos e condições de exposição muitas vezes não padronizadas quanto ao instrumento, altura de instalação e exposição, modalidades de amostragem, tempos de médias, forma como as medições são processadas etc. Para avaliar as medições e a sua qualidade é essencial conhecer os seus metadados (WMO, 2012).

A WMO, através do Guia de Instrumentos e Métodos de Observação, descreve que os metadados são importantes para conhecer a qualidade dos dados (WMO, 2021). De acordo com Santana *et al.* (2016), a WMO recomenda a calibração inicial, a calibração periódica e a verificação de toda a instrumentação meteorológica. As informações e os resultados das calibrações são metadados fundamentais para a garantia da confiabilidade metrológica.

Segundo o Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia (VIM), calibração é a operação que estabelece, sob condições especificadas, numa primeira etapa, uma relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas; numa segunda etapa, utiliza esta informação para estabelecer uma relação visando a obtenção dum resultado de medição a partir duma indicação (Inmetro, 2012),

ou seja, através da calibração com rastreabilidade ao Sistema Internacional de Unidades (SI), obtém-se as correções e as incertezas a serem aplicadas e propagadas nas medições (Inmetro, 2021).

2.3.1 Temperatura do ar

Uma das necessidades frequentes que o pesquisador vive em campo é a utilização de sensores, se possível de baixo custo, porém, confiáveis. Pesquisas sobre avaliação de diferentes abrigos meteorológicos, realizadas por Cunha *et al.* (2001) e Rojas *et al.* (2014), auxiliam o monitoramento climático em países em desenvolvimento, com criação de novos sensores para instalação em campo. Para a calibração de temperatura é preciso fazer uma comparação de um instrumento de medição (não calibrado) com uma referência oficial (padrão com rastreabilidade ao SI), para identificar qualquer viés ou erro sistemático nas leituras e avaliar as incertezas de medição ou erros aleatórios.

A temperatura termodinâmica (T) é uma quantidade física que caracteriza a energia média de movimento molecular aleatório numa substância e para fins meteorológicos, a temperatura do ar é definida como a temperatura indicada por um termômetro exposto ao ar em local protegido da radiação solar direta, conforme Figura 1 (WMO, 2021).

Figura 1. Termohigrômetro Rotronic com protetor de radiação solar direta



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

De acordo com o Glossário de Meteorologia (AMS, 2022), a temperatura representa a energia cinética molecular, que é então consistente com a equação de estado e com as definições de pressão como a força média dos impactos moleculares e densidade como a massa total das moléculas em um volume.

As estações meteorológicas automáticas necessitam de instrumentos meteorológicos para a obtenção de dados dos atributos climáticos, principalmente em locais onde não há abrangência de redes de estações meteorológicas certificadas e com rastreabilidade. Diante desse cenário, a quantidade de empresas de calibração instrumental vem crescendo em nosso País (Torres *et al.*, 2015).

De acordo com Torres *et al.* (2015), a calibração de termômetros e termohigrômetros, em laboratório com ambiente controlado é realizada, utilizando-se de uma câmara climática, variando a temperatura e a umidade relativa do ar, todos os sensores são instalados um ao lado do outro, dispostos horizontalmente ou de acordo com a posição utilizada em campo.

Os pontos nominais de calibração são selecionados dentro da faixa de temperatura em que o sensor será submetido em campo. Os sensores ficam expostos às variações na câmara climática em um período de 1 hora em cada ponto, sendo as medidas tomadas de 30 em 30 segundos (respeitando o tempo de resposta dos instrumentos), de forma a estabelecer relações matemáticas entre os sensores sob calibração e o padrão de referência.

Pode ser utilizado o método da regressão linear, de forma a estabelecer uma equação de ajuste para o conjunto (série) de dados, ou por meio da comparação de médias de cada conjunto de dados, contanto que cada conjunto represente as medições coletadas do padrão e do sensor sob calibração de forma síncrona, ou seja, ao mesmo tempo, e um mínimo de 17 amostras por ponto (Novais *et al.*, 2021).

2.3.2 Umidade relativa do ar

A umidade relativa do ar (UR) é razão em porcentagem da pressão de vapor observada em relação à pressão de vapor de saturação em relação à água na mesma temperatura e pressão (WMO, 2021). De acordo com o Glossário de Meteorologia, a umidade relativa do ar é a relação entre a quantidade de vapor de água presente no ar e a quantidade máxima que poderia estar presente a uma dada temperatura (AMS,

2022).

O resultado de uma calibração relata correções que precisam ser aplicadas aos valores indicados pelo instrumento, juntamente com uma estimativa da incerteza na calibração e outras informações relevantes. Por exemplo, a calibração de um determinado instrumento com 50% de umidade relativa (u.r.), pode mostrar uma leitura majorada em 1%. Nesse caso, uma correção necessária de -1% u.r. seria mostrada no certificado. A calibração da grandeza de umidade relativa do ar é realizada em conjunto com a calibração de temperatura do ar, pois alguns instrumentos possuem os dois sensores juntos no mesmo dispositivo (invólucro), medindo assim as duas grandezas (variáveis meteorológicas), desta forma a calibração depende do mesmo período de tempo e há a possibilidade de correlacionar as medições.

Quaisquer correções de calibração relatadas em um resultado ou certificado de calibração devem ser aplicadas aos valores medidos, ou seja, obtidos usando esse instrumento. Se as correções de calibração não puderem ser aplicadas, a incerteza citada nos resultados pode ser incluída e avaliar o erro máximo admissível ou tolerado. Sendo assim a rastreabilidade metrológica, é a maneira de garantir a precisão das medições e leva à consistência das medições entre usuários em diferentes momentos e locais. Uma medição rastreável é aquela que pode ser relacionada com padrões de medição apropriados, segundo o *National Physical Laboratory* do Reino Unido (NPL, 1996).

Segundo o VIM, a rastreabilidade metrológica é a propriedade dum resultado de medição pela qual tal resultado pode ser relacionado a uma referência através duma cadeia ininterrupta e documentada de calibrações, cada uma contribuindo para a incerteza de medição (Inmetro, 2012).

2.3.3 Radiação solar global

De acordo com a ISO 9847/2023, o piranômetro (Figura 2) é um instrumento usado para medir a radiação global (energia por unidade de área) recebida do sol para diversos fins. O uso de piranômetro para medir a radiação solar hemisférica aumentou significativamente nos últimos anos. O principal uso dos piranômetro não é a utilização para pesquisas científicas, mas para avaliar o desempenho de usinas de energia solar, medindo a radiação solar em um hemisfério para determinar a entrada de energia de

sistemas de energia solar, como sistemas fotovoltaicos (PV) e mapeamento geográfico dos recursos de energia solar.

Figura 2. Piranômetro marca Kipp & Zonen, modelo CM3



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Segundo a ISO 9060/2018, os piranômetros não espectralmente planos podem ter uma resposta espectral que varia fortemente com o comprimento de onda, mesmo dentro da gama espectral de 300 nm a 1.500 nm, e, portanto, o resultado da calibração pode ser possivelmente válido numa gama mais limitada de condições.

A calibração de equipamentos de medição é parte integrante da avaliação de incertezas e de qualquer sistema de gestão da qualidade na área de metrologia aplicada à instrumentação meteorológica. A recalibração regular do instrumento de acordo com as normas técnicas é primordial para conhecer as incertezas inerentes aos processos de medição, mesmo que sejam valores baixos ou muito baixos. Os resultados das calibrações geralmente mostram que o instrumento pode estar estável e então servirá para confirmar de que os dados de medição coletados durante o intervalo de tempo entre a calibração anterior e a atual são confiáveis, podendo assim aplicar as correções a propagação das incertezas (Santana *et al.*, 2015).

As calibrações denominadas internas ou tipo A (*indoor*) de piranômetros são realizadas contra uma fonte de lâmpada calibrada, enquanto o método externo B (*outdoor*) utiliza o sol, ou seja, a radiação solar natural como fonte. A calibração tipo A é realizada com incidência normal a superfície do receptor perpendicular ao feixe da

lâmpada ou sob exposição a uma fonte de lâmpada difusa uniforme usando uma esfera integradora. Porém, a calibração externa é realizada utilizando o sol como fonte com o piranômetro na posição horizontal ou em plano inclinado para o norte. A incerteza expandida relatada no certificado de calibração de piranômetro, deve declarar o fator de abrangência (k) de acordo com uma distribuição de probabilidade, por exemplo a distribuição (t), segundo o Guia para a Expressão de Incerteza de Medição – GUM (Inmetro, 2012).

2.3.4 Velocidade do vento

Os resultados da calibração do anemômetro podem revelar, por exemplo, se as medições estão de acordo com as especificações técnicas do fabricante do instrumento. Sendo assim, as medições do anemômetro padrão de referência (Figura 3) pode indicar a necessidade de ajuste ou manutenção do anemômetro sob calibração e de uma nova calibração após a manutenção corretiva.

Figura 3. Anemômetro

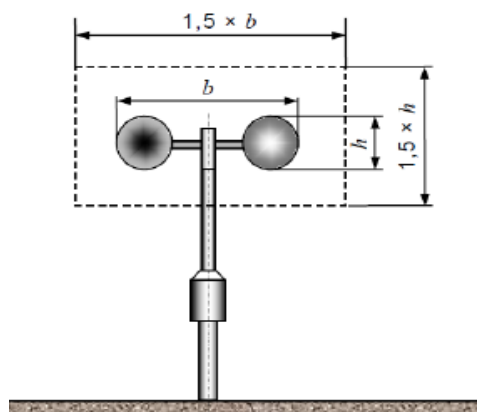


Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Segundo a publicação “*Procedure for calibration of anemometer, 2021*”, a resolução dos testes de fluxo do vento não deve exceder 15 cm em cada direção do sensor coberta pelo anemômetro do tipo copo (distâncias horizontal ou vertical), conforme mostradas (b e h) na Figura 4. Dentro da área interna do túnel de vento onde estão instalados o anemômetro sob calibração e outro com o anemômetro de

referência, é necessário obedecer a essas medidas para garantir uma melhor confiabilidade dos resultados da calibração.

Figura 4. Ilustração de um anemômetro, com medidas de referência



Fonte: MEASNET (2020)

Entretanto, uma variação na velocidade do fluxo ao longo do tempo influenciará ambos os valores de medição no local da posição de referência, em qualquer posição da grade. Devido a esses efeitos é necessário ter um controle do fluxo numa magnitude idêntica no túnel de vento e compensando assim os efeitos da instabilidade (Measnet, 2020).

2.3.5 Precipitação pluviométrica

O pluviômetro se trata de um instrumento hidro meteorológico dedicado ao estudo da transferência de água entre a atmosfera e a superfície, com o propósito de medir a quantidade de precipitação líquida. A altura pluviométrica pode ser compreendida como a altura média da lâmina de água precipitada que recobriria a região atingida pela precipitação admitindo-se que essa água não infiltrasse, não evaporasse, nem escoasse para fora dos limites da região. A unidade de medição habitual é o milímetro, definido como a quantidade de precipitação (ou acumulado de chuva) correspondente ao volume de 1 mm/m^2 de superfície (Blainski *et al.*, 2012).

Dentre os pluviômetros automáticos, o mais utilizado nas estações meteorológicas automáticas é o pluviômetro automático de báscula (Figura 5), que opera parecido com uma gangorra, posicionada sob o bico de um funil por onde toda a

água pluvial escoada pela área é coletada por um recipiente, que varia de 4 ml até 10 ml (variando de cada fabricante) (Santana *et al.*, 2018).

Figura 5. Pluviômetro de báscula, marca Vaisala, modelo 444A



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

A operação desse pluviômetro é por um ímã acoplado à báscula e uma chave magnética (*reedswitch*). Quando a quantidade de chuva acumulada em um dos compartimentos da báscula atinge um determinado volume, o peso desta quantidade de líquido aciona o mecanismo, fechando um relé magnético, descartando o líquido e preparando o outro compartimento (ou outra concha) para receber nova quantidade de líquido. A cada mudança de posição do mecanismo produz um fechamento momentâneo da chave gerando um pulso elétrico que será transmitido e convertido em altura pluviométrica (Santana *et al.*, 2018).

Os métodos de calibração são de comparação direta ou indireta. Na calibração direta o mensurado é aplicado sobre sistema de medição por meio de medidas materializadas ou comparação direta a um padrão de referência, e as indicações dos sistemas de medição (padrão e objeto sob calibração) são confrontadas com cada valor verdadeiro convencional, como por exemplo nas calibrações de temperatura e velocidade de vento. Feito isso, a correção e sua incerteza são estimadas por meio de medições repetidas (Guimarães *et al.*, 2012).

Já na calibração indireta, não existe um padrão, como por exemplo de calibração de pluviômetro ou de radiação solar, pois não existe um padrão de “chuva” ou “radiação solar global”, neste casos, os mensurados são gerados por meios de dispositivos auxiliares ou simuladores, que atua simultaneamente no sistema de medição a calibrar e também no sistema de medição de referência que utilizam-se de padrões de medidas derivadas, como por exemplo, um voltímetro padrão para ler o sinal de saída de um piranômetro ou de uma balança que mede a massa da água de chuva simulada. Assim, as indicações são avaliadas e obtém-se as correções e incertezas de medições (Santana *et al.*, 2015).

Procurando o equilíbrio técnico-econômico busca-se adotar como padrões de referência que apresentem incertezas não superior a um décimo da incerteza esperada para o sistema de medição a calibrar (instrumento sob calibração). Quando se trata de um trabalho não rotineiro, de cunho técnico-científico, e muitas vezes de alta responsabilidade, é fundamental que sejam registrados todos os eventos associados com o desenrolar da atividade, na forma de um memorial de calibração (Reda; Uehara, 2008).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 ÁREA EXPERIMENTAL

A pesquisa foi desenvolvida nos meses de abril, maio, junho, julho, agosto e setembro de 2023, correspondente a 158 dias, 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, situada a 21°15'22" de latitude sul, 48°18'58" de longitude oeste e altitude de 575 m, na cidade de Jaboticabal-SP.

3.2 MÉTODO DE ESTIMATIVA DA ETo

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

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

$$ET_o = \frac{4,409\Delta(Rn - G) + \gamma \left(\frac{900}{T + 273} \right) V(es - e)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34V)} \quad (1)$$

Em que:

ETo = evapotranspiração de referência, em gramado, mm d⁻¹;

Rn = radiação líquida, MJ m⁻² d⁻¹;

G = fluxo de calor no solo, MJ m⁻² d⁻¹;

T = temperatura média do ar, °C;

V = velocidade média do vento a 2m de altura, m s⁻¹;

(es-e) = déficit de pressão de vapor, kPa;

Δ = tangente à curva de pressão de vapor, kPa °C⁻¹;

γ = constante psicrométrica, kPa °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).

3.3 DADOS METEOROLÓGICOS

Os dados meteorológicos foram obtidos em duas estações meteorológicas automatizadas. Uma da marca da *Davis Instruments* (EMA – DI) (Figura 6) e a outra da *Campbell Scientific*, calibrada (EMA-C) (Figura 7). As duas EMAs foram instaladas na área experimental do LIAP. Os dados meteorológicos foram obtidos no período do outono e do inverno de 2023.

Figura 6. Estação meteorológica automatizada da *Davis Instruments* (EMA – DI)



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

A Estação meteorologia automática da marca *Campbell Scientific*, foi instalado a uma distância de 2 metros ao lado da EMA-DI e com os anemômetros e pluviômetros instalados na mesma altura, sendo anemômetros em 2 metros de altura e pluviômetros com 1,70 metros de altura.

Figura 7. Estação meteorológica automatizada da *Campbell Scientific* (EMA-C)



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

A estação meteorológica automatizada da marca *Campbell Scientific* (EMA-C), foi calibrada dois meses antes do início do experimento para mostrar eficácia nos resultados dos cálculos de evapotranspiração. Ela foi instalada a uma distância de dois metros, ao lado da estação já presente no local (EMA – DI).

3.3.1 EMA–DI instalada na área experimental do LIAP

A EMA-DI tem um Sistema de Aquisição de Dados *Vantage Pro Plus Wireless* e possui os seguintes sensores: temperatura e umidade relativa do ar, modelo 7859; velocidade do vento, modelo 7911; radiação solar global, modelo 6450; precipitação pluviométrica, modelo 7852; todos da marca *Davis Instruments*.

3.3.2 EMA-C instalada na área experimental do LIAP

A EMA-C 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; temperatura e umidade do ar Rotronic (modelo Hygroclip).

3.4 CALIBRAÇÃO DOS SENSORES

Os sensores de temperatura do ar, umidade do ar e precipitação foram calibrados no laboratório de Metrologia Ambiental do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), em Cachoeira Paulista – SP. Os sensores de velocidade do vento e radiação sol ar foram calibrados no Laboratório UNIMETRO, em São Paulo – SP.

Os sensores foram calibrados de acordo com as recomendações Nº 8 da Organização Meteorológica Mundial (WMO, 2008) e com os requisitos metrológicos do Bureau Internacional de Pesos e Medidas (BIPM), por meio da ISO/IEC 17025/2017 sobre requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração (NBR, 2017).

Foram calibrados os sensores de temperatura e umidade relativa do ar (termohigrômetro, marca Rotronic, modelo Hygroclip S), de chuva (pluviômetro, marca Handar, modelo 444A), de radiação solar global (piranômetro, marca Kipp & Zonnen, modelo CM3 e de velocidade do vento (anemômetro, marca R.M. Young, modelo 03001) em laboratórios com padrões de referência e de trabalho rastreados ao SI (Inmetro, 2021).

No caso de radiação solar, a calibração também é baseada nos requisitos das normas ISO 9847 - “*Solar energy — Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer*” (ISO 9847, 1992) e ASTM E824 – “*Standard Test Method for Transfer of Calibration From Reference to Field Radiometers*” (ASTM E824 – 10, 2018).

Todos os sensores que compõem a estação meteorológica foram calibrados com padrões rastreados ao SI (Inmetro, 2021).

3.5 VERIFICAÇÃO DOS SENSORES DA EMA-DI

Os dados da EMA-DI foram analisados utilizando a metodologia desenvolvida por Turco (2024) para verificação de dados meteorológicos, que inclui as seguintes técnicas: estimativa da radiação solar global, dupla massa, comparabilidade operacional de medições meteorológicas, assimetria e curtose.

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

Para verificação dos dados meteorológicos das EMAs foi utilizada a técnica de dupla massa, desenvolvida pela *United States Geological Survey* (USGS) (Tucci, 2007).

As variáveis meteorológicas da EMA-DI foram verificadas, em relação as da EMA-C, por meio da norma ASTM D4430 – “*Standard Practice for Determining the Operational Comparability of Meteorological Measurements*” (ASTM D4430 – 00, 2023).

O cálculo da assimetria e curtose foi realizado por meio coeficiente de assimetria e curtose de Fisher (Fávero; Belfiore, 2017).

Os dados coletados na EMA-DI foram comparados com os dados obtidos no mesmo período na EMA-C.

3.5.1 Descrição da técnica de estimativa da radiação solar global

De acordo com Allen (1996), a operação do piranômetro e a precisão da calibração podem ser avaliadas pela delineação (plotagem) de hora em hora ou pela média diária das leituras do piranômetro comparando com as radiações de ondas curtas esperadas computadas sob condições de céu limpo (R_{so}).

R_{so} pode ser descrita conforme Equação 2 abaixo.

$$R_{so} = K_T * R_a \quad (2)$$

Em que:

R_a = radiação extraterrestre;

K_T = índice de “claridade”.

A R_a pode ser computada por períodos diários ou de hora em hora como uma função da latitude, dia do ano e hora do dia. Para dados de 24 horas, o K_T pode variar de 0,7 a 0,8; dependendo da claridade atmosférica (poeira em suspensão no ar, poluição, umidade, etc.), elevação e ângulo solar.

Uma simples previsão para o K_T , onde apenas a elevação do local é considerada, pode ser determinada pela equação:

$$K_T = 0,75 + (2E - 5)z \quad (3)$$

Em que:

z = elevação da estação (m).

A Equação 3 foi desenvolvida para uma média do ângulo solar de 45° acima da linha do horizonte.

Estimativas aperfeiçoadas da R_{so} para períodos ou dias com baixos ângulos solares podem ser calculados utilizando-se a Equação 4 descrita abaixo.

$$K_T = \exp\left(\frac{-0,0018P}{K_{tb}(\sin\Phi)}\right) \quad (4)$$

Em que:

K_{tb} = coeficiente de claridade, $0,5 < K_{tb} \leq 1,0$, onde $K_{tb} = 1,0$ para condições de ar limpo e $0,5$ para extremamente túrbido ou pardo. Geralmente, K_{tb} é tomado como $1,0$ para predizer o limite mais alto de K_T para a maioria das áreas agrícolas. A variável P significa pressão atmosférica (kPa), e Φ = o ângulo solar acima do horizonte (rad).

Uma porção da absorção ou a dispersão da radiação de luz direta na atmosfera é causada pelo vapor de água (radiação de luz direta é definida como a densidade de fluxo de radiação de onda curta, vinda diretamente do feixe de luz solar, incidente em um plano paralelo da superfície da terra. Radiação difusa é definida como a densidade de fluxo de radiação de onda curta, vinda da dispersão da luz solar).

A função K_T pode ser melhorada incluindo a água precipitável como variável. A função K_B prediz o índice de claridade para radiação de luz direta, sob condições de céu limpo com baixa turbidez (Equação 5).

$$K_B = 0,98 \exp\left[\frac{-0,00146P}{K_{tb} \sin \Phi - 0,162 \left(\frac{W}{\sin \Phi}\right)^{0,25}}\right] \quad (5)$$

Em que:

P = pressão atmosférica (kPa);

W = água precipitável na atmosfera, em cm.

W pode ser calculado utilizando a Equação 6:

$$W = (0,014e_d * P) + 0,21 \quad (6)$$

Em que:

e_d = pressão de vapor próxima à superfície (kPa).

Um índice de radiação difusa, K_D , pode ser estimado de K_B , usando as seguintes expressões:

$$K_D = 0,35 - 0,33K_B \text{ para } K_B \geq 0,15 \quad (7)$$

$$K_D = 0,18 + 0,82K_B \text{ para } K_B < 0,15$$

Quando as equações (5) e (7) são utilizadas, o índice de claridade é calculado como a soma de K_B e K_D .

$$K_T = K_B + K_D \quad (8)$$

Para períodos de hora em hora ou mais curtos, o $\sin \Phi$ nas equações (4) e (5) é calculado como:

$$\sin \Phi = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \omega \quad (9)$$

Em que:

φ = latitude da estação (rad);

δ = declinação solar (rad);

ω = ângulo de tempo solar (rad).

Para aplicação das equações (4) e (5) para dados fixados de 24 horas ou mensais, uma média de 24 horas ponderada do $\sin \Phi$ pode ser estimada por ponderação instantânea de $\sin \Phi$, de acordo com a R_a instantânea, durante o curso do dia. O resultado integrado e médio é dado pela Equação 10:

$$(\sin \Phi)_{24} = \frac{(\sin^2 \varphi \sin^2 \delta \omega s + 2 \sin \varphi \sin \delta \cos \varphi \cos \delta \sin \omega s + \cos^2 \varphi \cos^2 \delta \left[\frac{\omega s}{2} + \sin^2 \frac{\omega s}{4} \right])}{\omega s \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega s} \quad (10)$$

Em que:

ωs = ângulo do horário do pôr-do-sol.

Uma simplificação da Equação 10 determinada por regressão é dada por meio da Equação 11:

$$(\sin \Phi)_{24} = \sin \left[0,85 + 0,3 \varphi \sin \left(\frac{2\pi}{365 J - 1,39} \right) - 0,42 \varphi^2 \right] \quad (11)$$

Em que:

J = dia do ano (1 a 365);

φ = latitude em graus radianos.

A Equação 11 estima $(\sin \Phi)_{24}$ com um padrão de erro de estimativa de aproximadamente 4% para períodos da primavera, verão e outono, sobre uma faixa de -65 a 65^{a} latitude e 6% para todos os meses sobre uma faixa de -60 a 60^{o} latitude. Essa precisão é adequada para predizer K_T para períodos de 24h.

3.5.2 Descrição da técnica de dupla massa desenvolvida pela USGS

De acordo com Tucci (2007), as somas acumulativas de uma variável em duas localidades são plotadas uma contra o outra (por exemplo, vento acumulativo no local 1 versus vento acumulativo no local 2). Uma mudança na inclinação da curva acumulativa em um período de tempo pode indicar uma mudança no funcionamento e calibração em um dos instrumentos.

3.5.3 Descrição da técnica de comparabilidade operacional de medições meteorológicas

Segundo ASTM (2023), a diferença sistemática (d) é a média das diferenças na medição pelos dois sistemas (Equação 12):

$$d = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{ai} - X_{bi}) \quad (12)$$

Segundo ASTM (2023), a Comparabilidade operacional (C) é a raiz quadrada média (rms) da diferença entre leituras simultâneas de dois sistemas medindo a mesma quantidade no mesmo ambiente (Equação 13):

$$C = \pm \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_{ai} - X_{bi})^2} \quad (13)$$

Em que:

X_{ai} = i-ésima medição feita por um sistema;

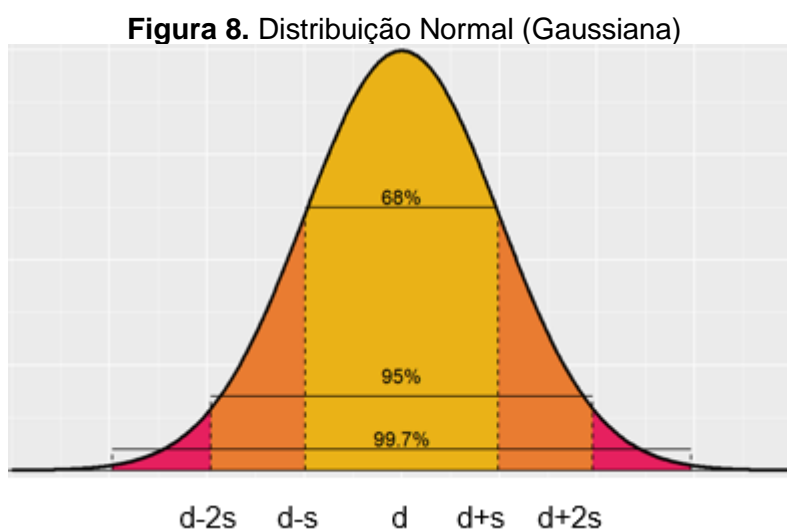
X_{bi} = i-ésima medição simultânea feita por outro sistema;

N = número de amostras usadas.

Segundo ASTM (2023), o desvio padrão estimado da diferença (s) é a medida da dispersão de uma série de diferenças em torno de d (Equação 14).

$$s = \pm \sqrt{C^2 - d^2} \quad (14)$$

Neste trabalho foi adotado que em uma distribuição normal (Figura 8) perfeita as medidas das diferenças caem dentro de $\pm 2s$ (95 % de confiança), ou seja, 95% das medidas das diferenças caem dentro $\pm 2s$ de d (EA, 2022).



Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

3.5.4 Descrição da técnica de assimetria e curtose de Fisher

De acordo com Fávero e Belfiore (2017), o coeficiente de assimetria de Fisher pode ser escrito como:

$$g_1 = \frac{n^2 \cdot M_3}{(n-1) \cdot (n-2) \cdot S^3} \quad (15)$$

Sendo que o terceiro momento é:

$$M_3 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3}{n} \quad (16)$$

A interpretação será:

$g_1 = 0$, a distribuição é simétrica;

$g_1 > 0$, a distribuição é assimétrica positiva (à direita);

$g_1 < 0$, a distribuição é assimétrica negativa (à esquerda).

O coeficiente de curtose de Fisher pode ser escrito como:

$$g_2 = \frac{n^2 \cdot (n+1) \cdot M_4}{(n-1) \cdot (n-2) \cdot (n-3) \cdot S^4} - 3 \cdot \frac{(n-1)^2}{(n-1) \cdot (n-3)} \quad (17)$$

Em que o quarto momento é dado por:

$$M_4 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^4}{n} \quad (18)$$

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;

$g_2 < 0$, grau de achatamento alto, a curva é platicúrtica.

3.6 AVALIAÇÃO DA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA (ET_o) DA EMA-DI EM RELAÇÃO EMA-C

Para avaliação da ET_o da EMA-DI em relação a EMA-C foi utilizada a técnica de determinação de erros desenvolvida por Turco *et al.* (1994) e técnica de dupla massa; desenvolvido pela USGS (Tucci, 2007).

3.6.1 Descrição da técnica de determinação de erros

De acordo com Turco *et al.* (1994), a descrição da técnica de determinação de erros se dá:

Seja uma quantidade ET_o, em que ET_o é uma função conhecida de x variáveis independentes $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, isto é, $ET_o = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$.

As variáveis $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$, são quantidades medidas com erros $\pm \Delta x_1, \pm \Delta x_2, \pm \Delta x_3, \dots, \pm \Delta x_n$, respectivamente. Esses erros combinados, resultam no erro ΔET_o .

Os erros Δx podem ser combinados de duas maneiras diferentes:

a) Limites Absolutos

Os Δx são obtidos considerando-se os limites absolutos deles, ou seja, com 100% de confiança.

$$ET_o \pm \Delta ET_o = f(x_1 \pm \Delta x_1, x_2 \pm \Delta x_2, \dots, x_n \pm \Delta x_n)$$

Para se obter ΔET_o pode-se desenvolver a expressão em série de Taylor.

$$\begin{aligned} f(x_1 \pm \Delta x_1, x_2 \pm \Delta x_2, \dots, x_n \pm \Delta x_n) &= f(x_1, x_2, \dots, x_n) + \\ &+ \Delta x_1 \frac{\partial f}{\partial x_1} + \Delta x_2 \frac{\partial f}{\partial x_2} + \dots + \Delta x_n \frac{\partial f}{\partial x_n} + \frac{1}{2} \left[(\Delta x_1)^2 \frac{\partial^2 f}{\partial x_1^2} + \dots \right] + \dots \end{aligned}$$

Como os Δx são pequenos despreza-se todos os termos onde Δx_i está elevado à uma

potência igual a 2 ou mais, ou há produtos $\Delta x_i \Delta x_j$ e pode-se concluir que o erro absoluto fica:

$$Ea = \Delta ETo = \left| \Delta x_1 \frac{\partial f}{\partial x_1} \right| + \left| \Delta x_2 \frac{\partial f}{\partial x_2} \right| + \dots + \left| \Delta x_n \frac{\partial f}{\partial x_n} \right| \quad (19)$$

O erro relativo porcentual Er , fica, então:

$$Er = \left(\frac{\Delta ETo}{ETo} \right) 100 = \left(\frac{100Ea}{ETo} \right) \quad (20)$$

b) Limites Estatísticos

Os Δx são obtidos por processos estatísticos tais como $\pm 2s$ (95% de confiança), $\pm 3s$ (99,7% de confiança). Nesse caso, para calcular o erro utiliza-se a fórmula da raiz da soma dos quadrados (rsq).

$$Ersq = \Delta ETo = \sqrt{\left(\Delta x_1 \frac{\partial f}{\partial x_1} \right)^2 + \left(\Delta x_2 \frac{\partial f}{\partial x_2} \right)^2 + \dots + \left(\Delta x_n \frac{\partial f}{\partial x_n} \right)^2} \quad (21)$$

O erro $Ersq$ tem o mesmo significado estatístico dos erros individuais. Se os Δx são $\pm 2s$, também $Ersq$ será com 95% de confiança.

Para aplicação da técnica de Turco *et al.* (1994) no método de estimativa da ETo de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 2006), foi realizado um tratamento matemático na equação original desse método (Equação 1).

A pressão atual do vapor da água do ar é expressa pela Equação 22 abaixo:

$$e = (U/100) e_s \quad (22)$$

Em que:

e = pressão atual do vapor da água do ar, kPa;

e_s = pressão de saturação do ar à temperatura do termômetro seco, kPa;
 U = umidade relativa média do ar, %.

A pressão de saturação do ar à temperatura do termômetro seco é determinada pela Equação 23:

$$e_s = 0,6108 \exp\left(\frac{17,27 T}{T + 237,3}\right) \quad (23)$$

A curva de pressão de vapor é determinada pela Equação 24:

$$\Delta = \frac{4098 e_s}{(T + 237,3)^2} \quad (24)$$

Substituindo as equações (22), (23) e (24) na Equação 1, tem-se:

$$ET_o = \frac{1021,247827 \frac{\exp\left(\frac{17,27 T}{T + 237,3}\right) Rn}{(T + 237,3)^2} + 36,666324 \frac{V \left(\exp\left(\frac{17,27 T}{T + 237,3}\right) - \frac{1}{100} U \exp\left(\frac{17,27 T}{T + 237,3}\right) \right)}{T + 273}}{2503,0584 \frac{\exp\left(\frac{17,27 T}{T + 237,3}\right)}{(T + 237,3)^2} + 0,0667 + 0,022678 V} \quad (25)$$

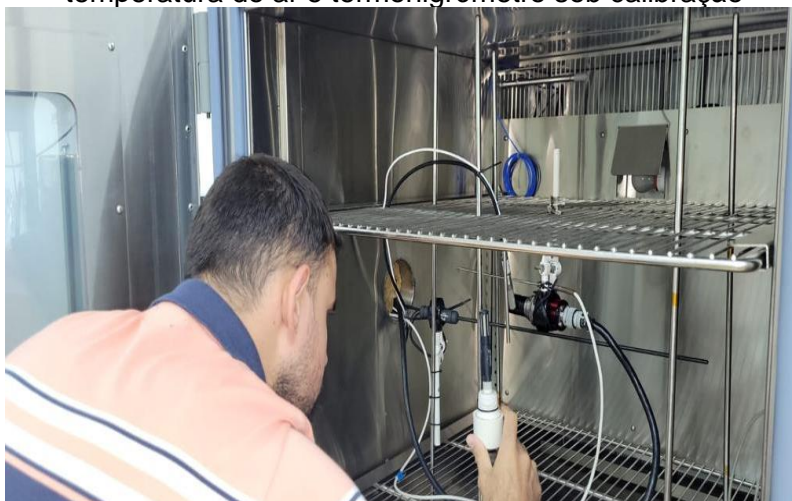
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CALIBRAÇÃO DE SENSORES

4.1.1 Temperatura do ar

A metodologia utilizada na calibração do sensor de temperatura foi baseada na comparação direta a um padrão de temperatura do ar e da umidade relativa do ar na comparação indireta a um padrão de referência de temperatura de ponto de orvalho que fazem parte do Higrômetro padrão, marca Michell, modelo Optidew/ST2, utilizando uma câmara climática com boa estabilidade térmica como meio de calibração, marca Cincinnati Sub Zero, modelo ZPH-16-1.5HAC, conforme Figura 9. Para medir as condições ambientais (pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar) do laboratório durante a calibração foi utilizado um termobarohigrômetro calibrado, marca Vaisala, modelo PTU 303.

Figura 9. Câmara climática com padrões de temperatura de ponto de orvalho e de temperatura do ar e termohigrômetro sob calibração



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

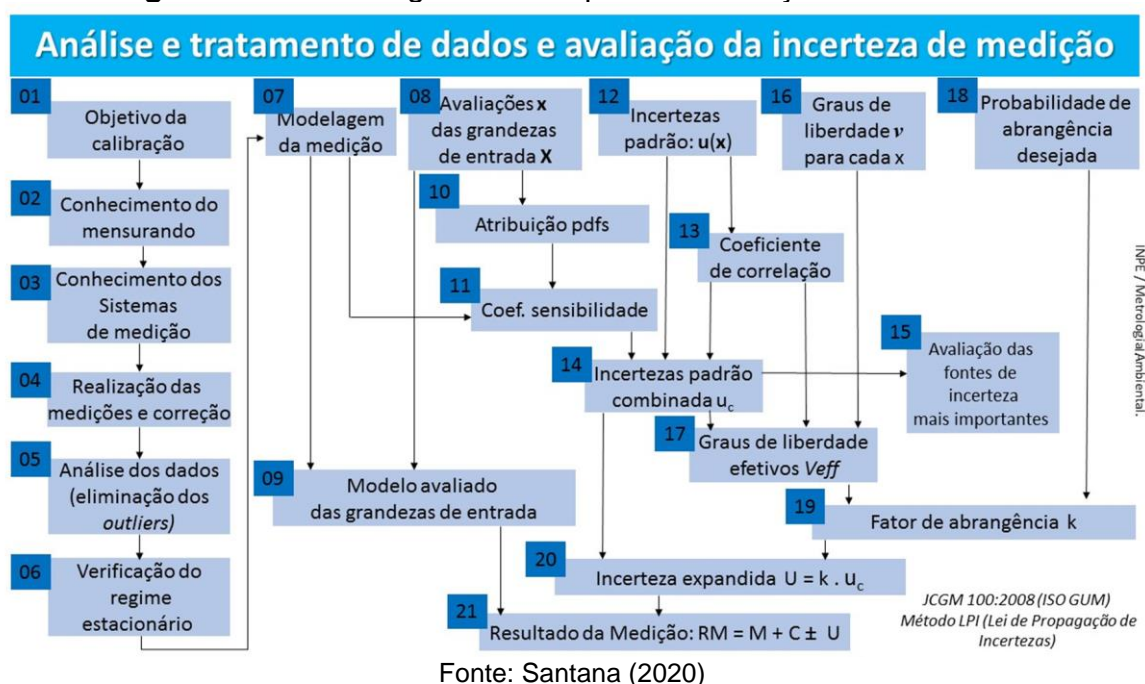
A calibração do termohigrômetro, da marca Rotronics e modelo HygroClip, teve início no dia 13 de fevereiro de 2023 e foi realizada na faixa de 0 °C a 45 °C e de 35%u.r a 85%u.r. (Figura 9), de acordo com as faixas a serem monitoradas no local do experimento em campo e em conformidade com as faixas de temperatura, pressão e umidade apresentadas nos certificados de calibração dos padrões. As medidas de

temperatura foram baseadas na Escala Prática Internacional de Temperatura (IPT-90) para cada ponto de medição. Foram realizadas medidas num período de 1 hora para cada ponto nominal de calibração e selecionados no mínimo 17 medições com intervalo entre as medições de 30 segundos (Preston-Tomas, 1990).

Para a análise exploratória dos dados, tratamento estatístico e avaliação da incerteza de medição na calibração foi utilizado o esquema descrito na Figura 10 (Santana, 2020).

O primeiro passo para iniciar a calibração foi entender o objeto que seria calibrado e conhecer qual o mensurado e seu critério de aceitação (qual o limite inferior e superior das grandezas que esse sensor funciona sem erros em suas medidas) para cada ponto nominal ensaiado em laboratório (Figura 10).

Figura 10. Metodologia utilizada para a calibração dos sensores

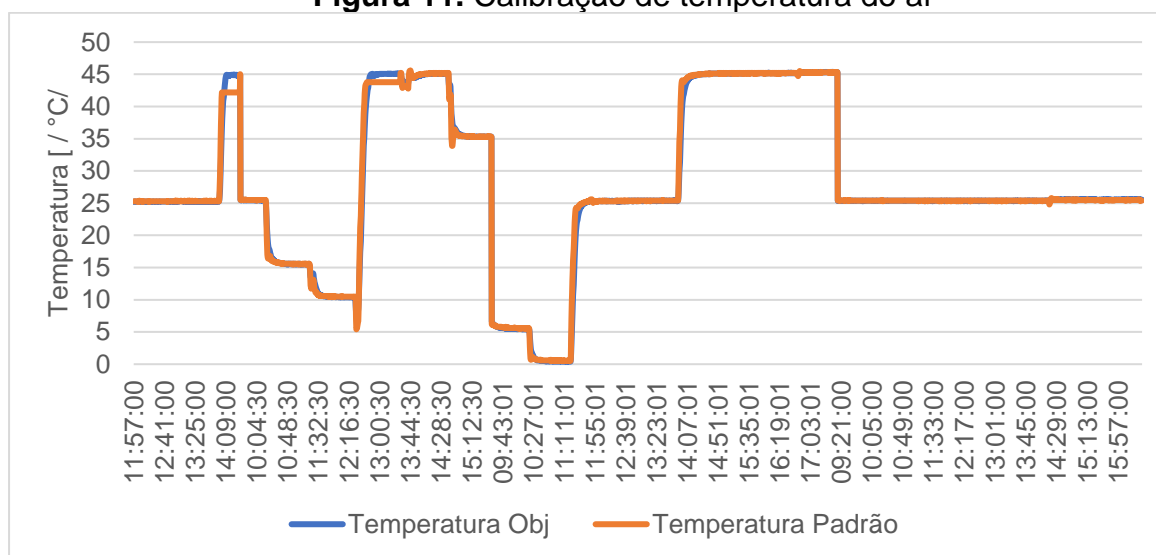


O próximo passo realizado foi a leitura do manual de cada sensor, nesse caso a leitura do objeto de calibração foi feita em milivolts (mV). Portanto, para sua conversão ser feita de mV para °C exige uma correção no valor obtido de 1:100.

Após os passos anteriores, iniciou-se o momento de realizar as medições, analisar e corrigir os dados (Item 4 – Figura 10). Para o termohigrometro Rotronics foi necessária a conversão do seu valor de leitura para °C, enquanto o padrão exige

apenas a correção de acordo com seu certificado. No total foram realizados ensaios em nove pontos diferentes no período de quatro dias, repetindo apenas o ponto de 25 °C durante três vezes, entretanto, com a umidade relativa do ar em pontos diferentes como visto na Figura 11.

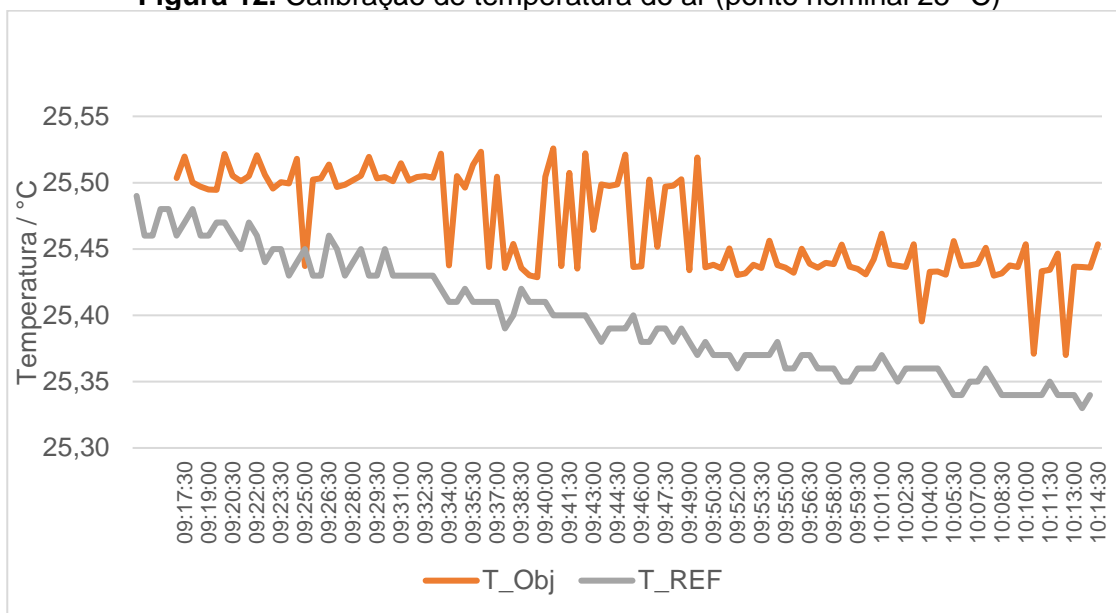
Figura 11. Calibração de temperatura do ar



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

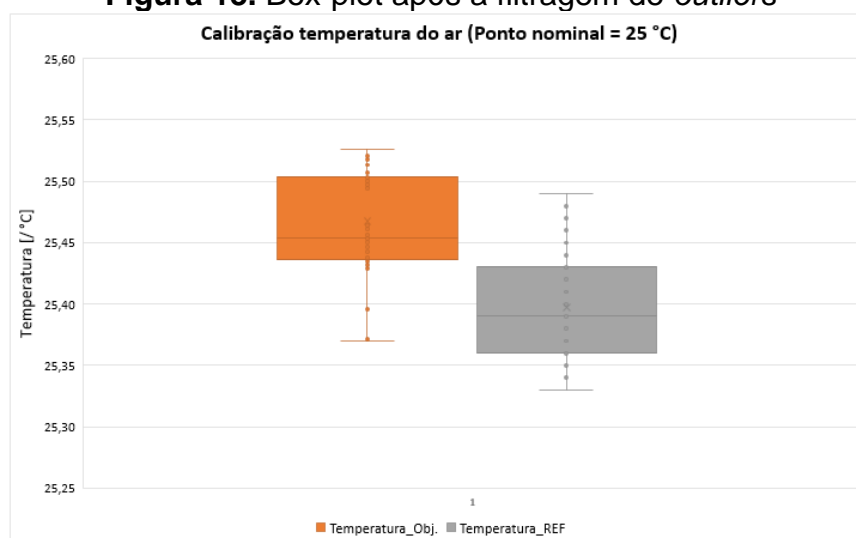
Para a análise e seleção dos dados (item 05 do esquema da Figura 10 – análise dos dados – eliminação de *outliers*) foram utilizados os gráficos de box-plot antes e depois da filtragem, para que não houvesse *valores discrepantes* presentes no conjunto de dados. Em seguida foi realizado o teste de Shapiro Wilk e D'Agostino para verificar a normalidade desses dados e selecionar outro conjunto, se necessário. Todos os testes estatísticos foram realizados utilizando a ferramenta *Real Statistics*, implementada na planilha Excel e programado no *Python*.

Os histogramas dessas séries de dados serviram para observar se estavam aproximados de uma normalidade, permitindo calcular a comparação de médias entre essas amostras com as do objeto sob calibração (termômetro Rotronics) nas etapas futuras da calibração (Figura 12).

Figura 12. Calibração de temperatura do ar (ponto nominal 25 °C)

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

No item 5 da Figura 10, realiza-se a análise dos dados selecionados, retirando seus dados discrepantes para que possa ser realizado toda a estatística descritiva antes de calcular as incertezas da calibração, para garantir que os dados estejam sem outliers e em regime estacionário. O item 5 é necessário para que os dados inseridos no certificado tenham base em uma análise de dados confiável (Figura 13).

Figura 13. Box-plot após a filtragem de *outliers*

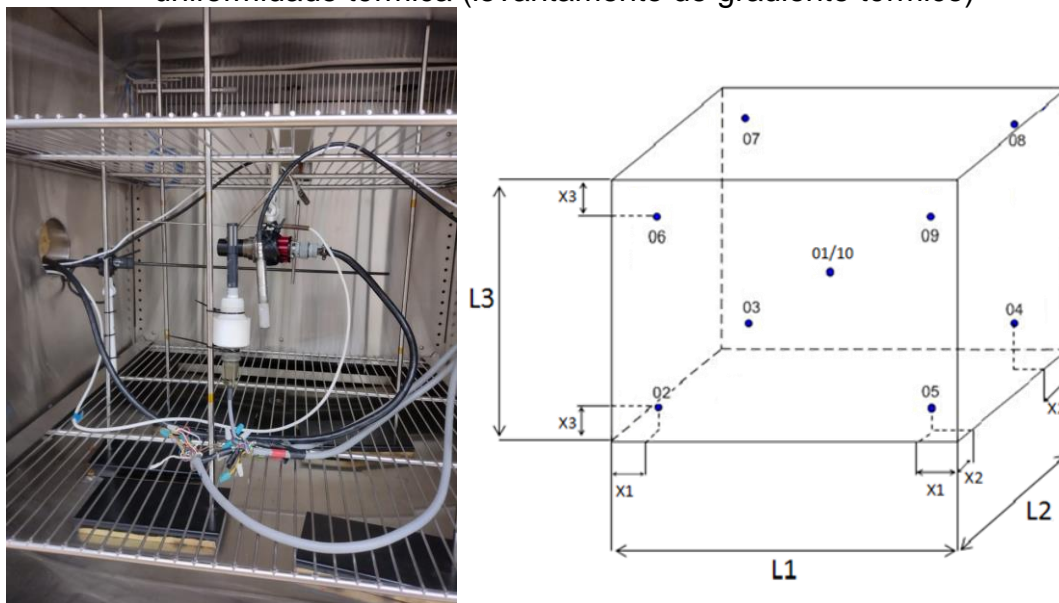
Fonte: elaborado pelo autor (2024)

A estatística aplicada na Metrologia avalia como contribuição de incerteza, além da variabilidade das medições (desvios-padrão ou variância), as contribuições relativas

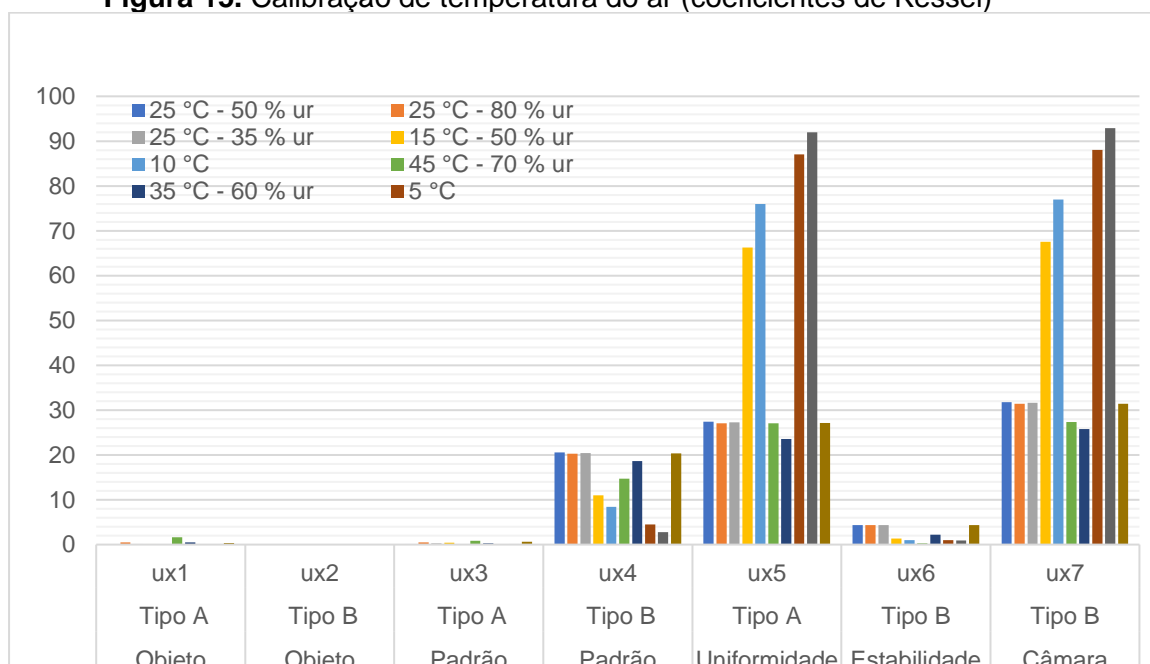
aos sistemas de medição (padrão de referência, instrumento sob calibração e meio de calibração). No processo de calibração de um termo-higrômetro, além da contribuição de incertezas presentes em cada instrumento e certificado utilizado nas etapas da calibração, temos uma incerteza relativa aos gradientes espacial e temporal da câmara climática, que contribui em todos os testes, sendo a incerteza de uniformidade térmica e incerteza de estabilidade térmica, utilizada para os cálculos de contribuição da incerteza combinada de toda a calibração.

As incertezas dos gradientes espacial e temporal estão presentes no certificado devido às dimensões internas da câmara climática, onde cada localização interna tem uma pequena diferença de temperatura, que pode ser demonstrada através de um cubo com 9 pontos (sensores de temperatura), esta uniformidade contribui consideravelmente para a incerteza combinada da calibração relatada nos resultados da calibração, conforme apresentado nas Figuras 14 e 15 (Cincinnati, 2021).

Figura 14. Visão interna da câmara climática e seus pontos de avaliação da uniformidade térmica (levantamento de gradiente térmico)



Fonte: Cincinnati (2021)

Figura 15. Calibração de temperatura do ar (coeficientes de Kessel)

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Para representar cada contribuição de incerteza presente na calibração, foi utilizado o item 8 (Figura 10), gerando um gráfico de colunas com as fontes de incertezas na calibração vezes o coeficiente proposto por Kessel *et al.* (2006), analisando assim os componentes que possuem maior contribuição na avaliação da incerteza padrão combinada (item 14 - Figura 10) indicado na calibração e na incerteza relatada no certificado.

A Equação 26 abaixo refere-se a incerteza padrão combinada de todas as contribuições de incerteza na calibração e a Equação 27, mostra como é calculado o coeficiente de Kessel, ou seja, quanto cada contribuição representa do total das incertezas, sendo assim é possível avaliar quais contribuições são mais representativas na calibração.

$$uc = \sqrt{(ux_1^2 + ux_2^2 + ux_3^2 + ux_4^2 + ux_5^2 + ux_6^2 + ux_7^2)} \quad (26)$$

$$uxk_n = \frac{ux_n^2}{uc^2} * 100 \quad (27)$$

Em que:

uxk_n = Coeficiente de Kessel da incerteza n;

u_{x_n} = Incerteza padrão da contribuição n ;

u_c = Incerteza padrão combinada.

O Quadro 1 abaixo apresenta as contribuições de incertezas presentes na calibração de temperatura.

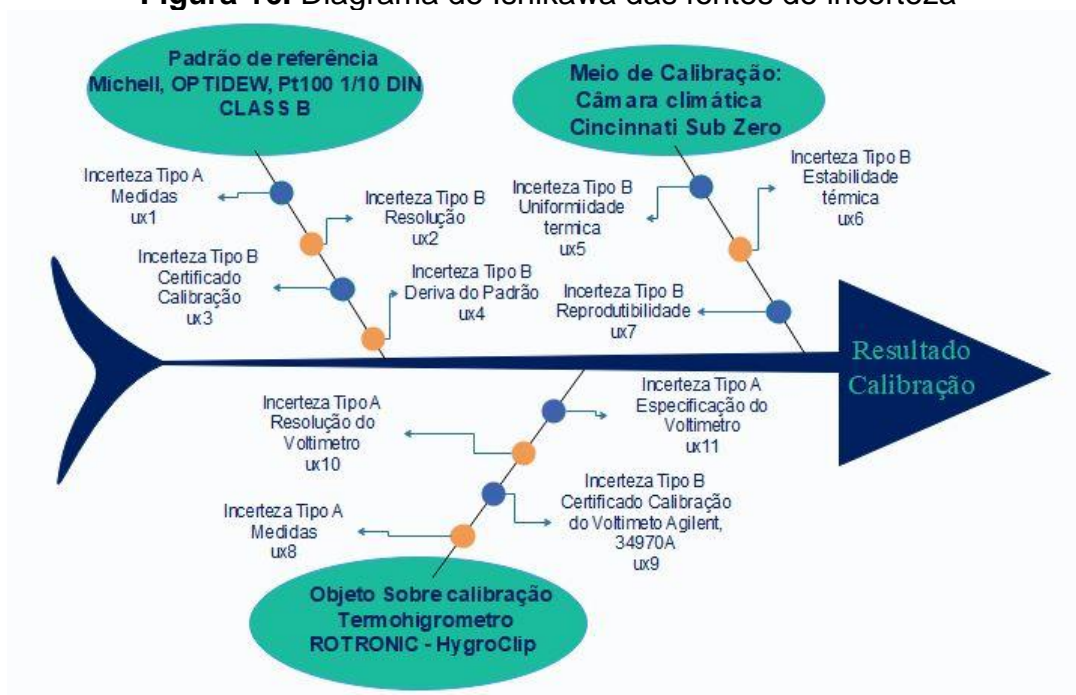
Quadro 1. Contribuições de Incertezas presentes na calibração de temperatura

Contribuição de incerteza	Contribuição de incerteza devido à:
u_{x1}	Medidas do objeto sob calibração
u_{x2}	Resolução do datalogger do objeto
u_{x3}	Medidas e resolução do padrão
u_{x4}	Certificado do padrão
u_{x5}	Uniformidade térmica da câmara
u_{x6}	Estabilidade térmica da câmara
u_{x7}	Combinada da câmara climática, uniformidade + estabilidade + reprodutibilidade

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Para explicar melhor o item 12 (incertezas padrão $u(x)$) da Figura 10, foi utilizado um diagrama de Ishikawa (Figura 16) para determinar cada fonte de incerteza na calibração do termohigrometro, organizando o raciocínio preciso na hora de analisar cada contribuição de cada incerteza dentro da calibração. No diagrama foi excluído apenas a incerteza padrão combinada (raiz quadrada positiva da soma das diferentes grandezas do padrão de referência ou do meio de calibração), pois a mesma é a média da soma entre as incertezas padrão presente na câmara climática. Sendo assim, enxergar a quantidade de contribuições que podem ter impacto no resultado final da calibração.

Figura 16. Diagrama de Ishikawa das fontes de incerteza



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Através do diagrama de Ishikawa é possível visualizar quantas incertezas cada componente presente na calibração traz para os dados que serão entregues no final da calibração, variando de um ensaio de calibração para outro e dependendo de quantos padrões de referência podem ser utilizados em uma calibração, no caso foi utilizado apenas um padrão de referência da marca Michell e as incertezas presentes no meio de calibração (Camãra climática).

Após todos os resultados das equações anteriores, foi iniciado o cálculo dos graus de liberdade efetivos “ V_{eff} ”, segundo a Equação 28, presente em cada ponto da calibração (item 17 da Figura 10), porém, foi necessário adotar os valores presentes na tabela (NMI-AU) para os graus de liberdade onde não existem números de amostras (sendo os graus de liberdade igual o número de medidas subtraído por um), entre eles ux_2 , ux_4 , ux_5 , ux_6 e ux_7 .

$$V_{eff} = \frac{uc^4}{\left(\frac{ux_1^4}{v_1}\right) + \left(\frac{ux_2^4}{v_2}\right) + \left(\frac{ux_3^4}{v_3}\right) + \left(\frac{ux_4^4}{v_4}\right) + \left(\frac{ux_5^4}{v_5}\right) + \left(\frac{ux_6^4}{v_6}\right) + \left(\frac{ux_7^4}{v_7}\right)} \quad (28)$$

Em que:

V_{eff} = Graus de liberdade efetivos;

u_c = Incerteza padrão combinada;

u_{x_n} = Incerteza padrão da contribuição n ;

v_n = Graus de liberdade para cada fonte de contribuição.

Segundo Bentley (2005), existem quatro diferentes valores para determinar com maior consistência e credibilidade os graus de liberdade de cada componente, sendo o valor 3 para os pontos que estavam ruins (baixas temperaturas ou alta umidade relativa do ar, onde existe uma incerteza maior na calibração), 10 para os pontos razoáveis, 30 para um ponto estável da calibração e 100 para quando os dados estão excelentes, dentro do ponto de calibração programado.

Para determinar a incerteza expandida de medição (produto da incerteza padrão combinada pelo fator de abrangência), foi preciso calcular o fator de abrangência existente em cada ponto da calibração. Os valores de k sempre são inseridos como 2,0 para os casos em que o número de graus de liberdade é maior ou igual a 1000, entretanto caso isso não aconteça em algum ponto da calibração, é necessário utilizar a tabela G2 do Guia JCGM 100:2008 (ISO GUM), onde é informado os valores do fator de abrangência “ k ” (Tabela 1), para cada grau de liberdade dentro de uma porcentagem de 95,45% da distribuição normal (*student*).

Tabela 1. Valores de k da distribuição-t para n graus de liberdade

Graus de liberdade ν	Fração p em porcentagem					
	68,27 ^{a)}	90	95	95,45 ^{a)}	99	99,73 ^{a)}
1	1,84	6,31	12,71	13,97	63,66	235,78
2	1,32	2,92	4,30	4,53	9,92	19,21
3	1,20	2,35	3,18	3,31	5,84	9,22
4	1,14	2,13	2,78	2,87	4,60	6,62
5	1,11	2,02	2,57	2,65	4,03	5,51
6	1,09	1,94	2,45	2,52	3,71	4,90
7	1,08	1,89	2,36	2,43	3,50	4,53
8	1,07	1,86	2,31	2,37	3,36	4,28
9	1,06	1,83	2,28	2,32	3,25	4,09
10	1,05	1,81	2,23	2,28	3,17	3,96
11	1,05	1,80	2,20	2,25	3,11	3,85
12	1,04	1,78	2,18	2,23	3,05	3,76
13	1,04	1,77	2,16	2,21	3,01	3,69
14	1,04	1,76	2,14	2,20	2,98	3,64
15	1,03	1,75	2,13	2,18	2,95	3,59
16	1,03	1,75	2,12	2,17	2,92	3,54
17	1,03	1,74	2,11	2,16	2,90	3,51
18	1,03	1,73	2,10	2,15	2,88	3,48
19	1,03	1,73	2,09	2,14	2,86	3,45
20	1,03	1,72	2,09	2,13	2,85	3,42
25	1,02	1,71	2,08	2,11	2,79	3,33
30	1,02	1,70	2,04	2,09	2,75	3,27
35	1,01	1,69	2,03	2,07	2,72	3,23
40	1,01	1,68	2,02	2,06	2,70	3,20
45	1,01	1,68	2,01	2,06	2,69	3,18
50	1,01	1,68	2,01	2,05	2,68	3,16
100	1,005	1,660	1,984	2,025	2,626	3,077
∞	1,000	1,645	1,960	2,000	2,576	3,000

Fonte: Guia JCGM 100 (2008)

Foram realizadas no mínimo 17 medidas para cada ponto de calibração (item 06 - Figura 10) e relatado o valor médio. A incerteza expandida de medição relatada (item 20 - Figura 10) é equivalente à incerteza padrão combinada multiplicada pelo fator de abrangência "k", para uma distribuição t com graus de liberdade efetivos correspondentes a uma probabilidade de abrangência de 95,45%, determinada de acordo com os documentos "Avaliação da Incerteza de Medição na Calibração" (EA, 2022) e "Guia para a expressão da incerteza na medição" (ISO/IEC, 2008).

A Tabela 2 abaixo mostra os resultados da calibração de temperatura do ar.

Tabela 2. Valores de k da distribuição-t para n graus de liberdade

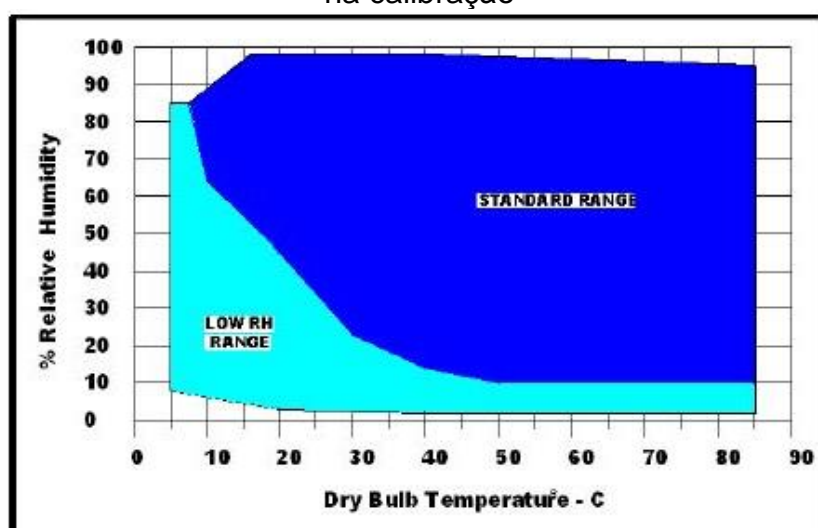
Temperatura de Referência Tref / °C	Temperatura Medida Tmed / °C	Correção Tref - Tmed / °C	Graus de liberdade efetivo Bentley Veff -	Incerteza expandida de medição U / °C
25,1	25,2	-0,1	107	0,2
25,1	25,2	-0,1	109	0,2
25,3	25,4	-0,1	108	0,2
15,5	15,5	-0,1	73	0,3
10,4	10,4	0,0	59	0,3
44,8	45,0	-0,2	123	0,3
35,2	35,4	-0,2	113	0,2
5,5	5,5	0,0	44	0,5
0,5	0,4	0,1	38	0,6
25,1	25,3	-0,2	109	0,2

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

4.1.2 Umidade relativa do ar

Para determinação dos pontos de calibração de umidade relativa do ar, além da faixa climática do local do experimento em campo e da faixa do higrômetro sob calibração foi preciso verificar a faixa de trabalho da câmara climática, conforme Figura 17.

Figura 17. Faixas de trabalho de umidade relativa do ar da câmara climática utilizada na calibração



Fonte: Cincinatti (2021)

Para cada ponto de calibração foram coletados, no caso mais rápido, 1 hora de medidas a cada 30 segundos, simultaneamente para temperatura e umidade relativa do ar, incluindo as medidas onde a câmara climática estava aguardando estabilização térmica. Dentro deste intervalo foram selecionados séries de medições para cada ponto de calibração, tanto para temperatura como para umidade relativa do ar (Figura 18).

Figura 18. Display (mostrador e teclado digital) e momento de configuração da câmara climática



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

A calibração de umidade foi realizada pelo método de comparação indireta com o padrão de referência de temperatura de ponto de orvalho utilizando a câmara climática como meio de calibração. Para a conversão dos dados obtidos (de temperatura de ponto de orvalho para umidade relativa do ar) foi utilizada a fórmula do Guia de Instrumentos Meteorológicos e Métodos de Observação (WMO, 2008), para obter a umidade relativa correta a partir dos dados de ponto de orvalho pelo padrão de referência Optidew/ST2, sendo a umidade relativa do ar a divisão da pressão de vapor da água pela pressão de vapor da água saturada, multiplicado por 100, conforme Equações 29, 30 e 31.

$$e_w = 6,112 e^{\frac{17,62 t}{243,12+t}} \quad (29)$$

Em que:

e_w = Pressão da água;

t = Temperatura do ponto de orvalho.

$$e_i = 6,112 e^{\frac{22,46 t}{272,62+t}} \quad (30)$$

Em que:

e_i = Pressão da água saturada;

t = Temperatura do ar.

$$U_r = \left(\frac{e_w}{e_i} \right) * 100 \quad (31)$$

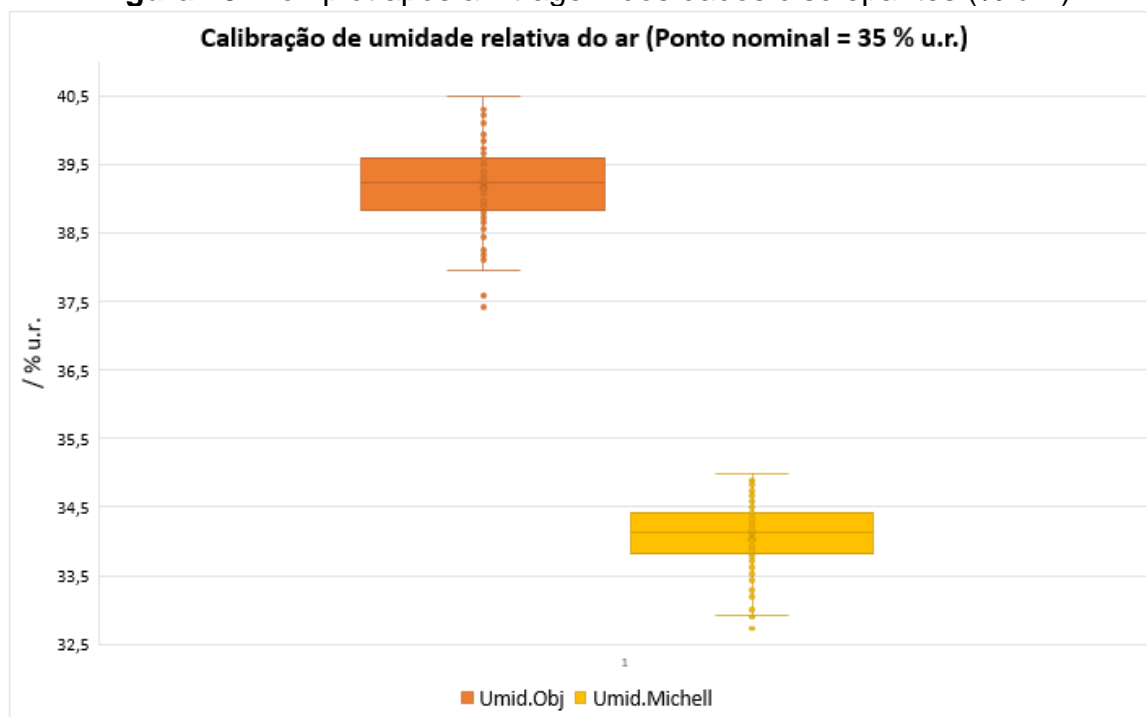
Em que:

U_r = Umidade relativa do ar.

Após as conversões dos dados selecionados para cada conjunto, foi realizada a filtragem para retirar os outliers e verificado suas distribuições normais através de histogramas com os dados filtrados de cada ensaio, repetindo os cálculos de contribuição de incertezas para cada etapa da calibração de umidade relativa. Foram obtidas sete contribuições de incertezas e sete variações de umidade relativa entre os pontos calibrados no laboratório.

A Figura 19 mostra os conjuntos de dados do padrão (Href) e do objeto sob calibração (Hobj).

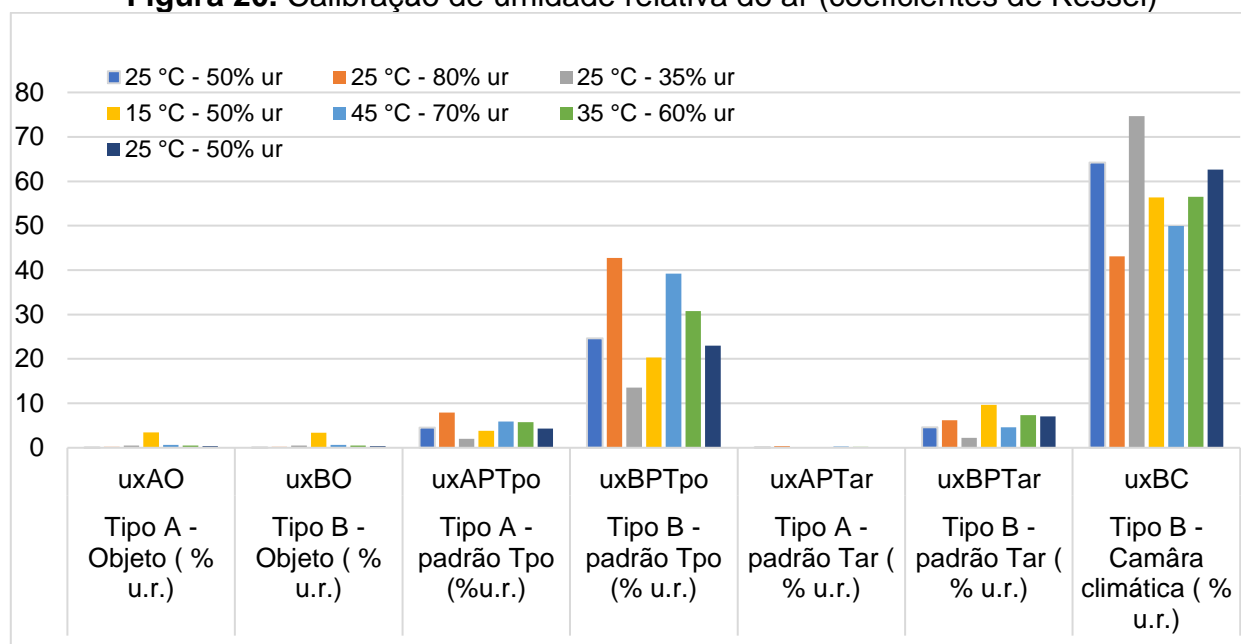
Figura 19. Box-plot após a filtragem dos dados discrepantes (% u.r.)



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

A Figura 20 mostra as contribuições de incerteza na calibração de umidade relativa do ar, sendo possível observar o quanto cada contribuição representa do total das incertezas, sendo assim é possível avaliar quais contribuições são mais representativas na calibração de umidade relativa do ar.

Figura 20. Calibração de umidade relativa do ar (coeficientes de Kessel)



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

O último passo foi realizar o cálculo de incerteza expandida de medição equivalente à incerteza padrão combinada (sendo a raiz quadrada da soma de todas as incertezas ao quadrado) multiplicada pelo fator de abrangência "k" (dependente do cálculo de graus de liberdade para cada conjunto de amostras) para uma distribuição t com graus de liberdade efetivos correspondentes a uma probabilidade de abrangência de 95,45%, determinada de acordo com os documentos "Avaliação da Incerteza de Medição na Calibração" (EA, 2022) e "Guia para a expressão da incerteza na medição" (ISO/IEC, 2008), mostrados na Tabela 3 abaixo.

Tabela 3. Resultado da calibração de umidade relativa

Umidade de Referência Href / (% u.r.)	Valor Medido Vmed / (% u.r.)	Correção H Ref - V Med / (% u.r.)	Graus de liberdade efetivo Bentley Veff -	Incerteza expandida de medição U / (% u.r.)
55,4	55,2	0,2	54	1,9
89,2	87,4	1,8	13	2,3
38,5	39,4	-0,9	52	1,7
53,8	54,5	-0,7	85	2,0
80,7	85,4	-4,8	25	2,1
66,4	70,6	-4,2	73	2,0
54,3	55,7	-1,4	67	1,9

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

4.1.3 Radiação solar global

Para a realização da calibração do piranômetro foi utilizado um Medidor de Radiação Solar *Secondary Standard* em acordo com a ISO 9060/1990, utilizado como referência, onde foi posicionado ao lado do piranômetro sob teste, horizontalmente e com as marcas de azimute voltadas para uma mesma direção, feito no laboratório da Unimetro – WSS, São Paulo. A calibração foi realizada pelo método “*Indoor*” (tipo A). Para a realização da calibração foi utilizada a Câmara de Simulação Solar Pat. 27701.

A incerteza expandida de medição obtida foi declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência ($k = 2$) o qual para uma distribuição t com V_{eff} graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza de medição foi determinada de acordo com o documento “Avaliação da Incerteza de Medição na Calibração” (EA, 2022)). Os resultados mostrados na Tabela 4 foram satisfatórios, com uma sensibilidade média de 21,37 ($\mu V/l.m^{-2}$), estando dentro da faixa de radiação latente normalmente presenciada na área experimental.

Tabela 4. Resultados da calibração do piranômetro

Medição n	Padrão de Referência / mV	Padrão de Referência /(W/m ²)	Piranômetro em Calibração / mV	Fator de calibração / (W.m ² /μV)	Sensibilidade / μV/W.m ⁻²
1	5,81	534,9	11,45	0,0467029	21,41
2	5,82	535,6	11,45	0,0467599	21,39
3	5,82	535,8	11,44	0,0468141	21,36
4	5,82	535,5	11,44	0,0468239	21,36
5	5,82	535,9	11,42	0,0469257	21,31
6	5,75	529,2	11,31	0,0467734	21,38
7	5,76	530,6	11,33	0,0468209	21,36
8	5,76	530,2	11,34	0,0467584	21,39
9	5,77	531,1	11,33	0,0468603	21,34
10	5,76	530,2	11,33	0,0468046	21,37

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

4.1.4 Velocidade do vento

A calibração do anemômetro foi realizada no Laboratório de calibração da Unimetro em São Paulo – SP. O laboratório é acreditado pelo Inmetro / Cgcre atendendo à norma ISO/IEC 17025 (ABNT/NBR, 2017).

O procedimento de calibração de anemômetros segue as recomendações de calibração e determinação de incertezas da MEASNET (2009). Trata-se de um método de correlação das leituras do instrumento em calibração e um padrão de referência certificado com rastreabilidade à Rede Brasileira de Calibração (RBC). O anemômetro a ser calibrado é instalado dentro da seção de teste do túnel de seção retangular de 630 mm x 680 mm. A velocidade de referência é medida utilizando um tubo de Pitot em conformidade com a ISO 3966/2022.

Antes do processo de coleta de dados o túnel de vento opera por 5 minutos na velocidade de referência de 10 m/s, propiciando a estabilização do escoamento e evitando a influência das variações da temperatura no atrito mecânico dos rolamentos do anemômetro. A taxa de frequência de amostras de dados é de 1 Hz com no mínimo 30 amostras por cada velocidade de referência. O procedimento é realizado de forma escalonado de subida e descida num intervalo de 4 a 16 m/s. Antes da coleta de uma determinada velocidade de referência é mantido o intervalo de 1 minuto para estabilizar as condições do escoamento na seção de teste (Measnet, 2020). Os resultados da calibração do anemômetro são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5. Resultados obtidos na calibração do anemômetro

Velocidade de Referência / m.s ⁻¹	Saída do Anemômetro / Hz	Desvio da Velocidade / m.s ⁻¹	Incerteza Total Expandida Para k=2 / m.s ⁻¹
4,04	4,90	-0,051	0,12
5,03	6,13	0,008	0,09
6,12	7,57	0,007	0,09
7,21	8,90	0,077	0,09
8,09	10,17	-0,011	0,09
9,11	11,50	-0,005	0,10
9,95	12,63	-0,028	0,11
11,21	14,23	0,015	0,12
12,01	15,33	-0,021	0,12
13,16	16,80	0,017	0,14
14,19	18,17	0,006	0,14
15,00	19,23	-0,002	0,15
16,10	20,70	-0,013	0,17

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

4.1.5 Precipitação pluviométrica

Para realização da calibração de um pluviômetro é fundamental possuir um sistema para simular a chuva, por exemplo, através de uma bomba peristáltica, fazendo o controle de vazão com suas rotações programadas e quantidade de água a ser fluida pelas pequenas tubulações.

As rotações e quantidades configuradas para simular as chuvas em nossa região em uma bomba peristáltica marca Watson-Marlow, modelo 323 foram de 4 RPM com 180 ml, 9 RPM com 180 ml, 12 RPM com 180 ml, 15 RPM com 360 ml e 9 RPM com 720 ml de água, foram realizadas séries de quinze medidas na verificação da área de captação através de um paquímetro digital com calibração dentro de sua validade e no mínimo cinco séries de medidas para cada ponto de calibração, sendo informado o valor médio.

A Figura 21 abaixo apresenta as operações com a bomba peristáltica e com o paquímetro digital.

Figura 21. A) Configuração da bomba peristáltica. / B) Medições do diâmetro da área de captação do pluviômetro



Fonte: elaborado pelo autor (2023)

Para a coleta de dados foi utilizado um data-logger calibrado da marca CAMPBELL SCIENTIFIC modelo CR-1000. Foram coletados os pulsos de saída do pluviômetro (basculadas), a massa da água utilizando uma balança digital, a temperatura da água, e as medidas de temperatura do ar, umidade relativa do ar e pressão atmosférica, utilizando um termo-barohigrômetro da marca Vaisala, modelo PTU 303. Dessa forma as fórmulas utilizadas para calcular a densidade da água (Equação 32) e a densidade do ar (Equação 33), segundo EURAMET, Guide nº 18 (2015) e EURAMET, Guide nº 19 (2018):

$$p_w = a5 \left[1 - \frac{(t + a1)^2 (t + a2)}{a3 (t + a4)} \right] \quad (32)$$

Em que:

p_w = densidade da água em g/ml;

t = temperatura da água em °C;

coeficiente a1 = -3.983035 °C;

coeficiente $a_2 = 301.797 \text{ } ^\circ\text{C}$;
 coeficiente $a_3 = 522528.9 \text{ } ^\circ\text{C}^2$;
 coeficiente $a_4 = 69.34881 \text{ } ^\circ\text{C}$;
 coeficiente $a_5 = 0.999974950 \text{ g/ml}$.

$$p_a = \frac{0,34848 p - 0,009UR e^{(0,061t)}}{273,15 + t} \quad (33)$$

Em que:

p_a = densidade do ar em kg/m^3 ;

p = pressão barométrica em hPa;

UR = umidade relativa do ar em % u.r.;

t = temperatura do ar em $^\circ\text{C}$.

Dessa forma, foi possível calcular a massa da água (precipitação da chuva simulada), conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6. Dados obtidos durante a calibração do pluviômetro

Valor Nominal rotação / RPM	Volume / ml	Densidade da água $d_{\text{água}}$ / (g.ml^{-1})	Diâmetro / mm	Massa m / g
9	180	0,997254	197	183,38
4	180	0,997254	197	182,64
12	180	0,997254	197	182,46
15	360	0,997254	197	372,50
9	720	0,997254	197	741,98

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Com os dados obtidos e através das incertezas calculadas em cada parte da planilha de calibração, foi possível alcançar os resultados que podem ser inseridos em um certificado de calibração, como incerteza expandida de medição e resolução de amostragem do objeto utilizado no cálculo da precipitação de chuvas no experimento, a incerteza expandida de medição (incerteza da calibração) relatada equivale à incerteza padrão combinada multiplicada pelo fator de abrangência “k” para uma distribuição t (distribuição normal dos dados), para um nível de confiança de 95,45%, e

foi determinada de acordo com os documentos “Avaliação da Incerteza de Medição na Calibração” (EA, 2022) e “Guia para a expressão da incerteza na medição” (ISO/IEC, 2008), visto da Tabela 7.

Tabela 7. Resultados da calibração do pluviômetro

Intensidade de chuva <i>RI</i> <i>/mm.h-1</i>	Número de basculadas <i>NB</i> <i>-</i>	Acumulado de chuva <i>Q</i> <i>/mm</i>	Incerteza expandida de medição <i>U</i> <i>/mm</i>	Sensibilidade do pluviômetro ("resolução") <i>RES</i> <i>/mm</i>	Incerteza expandida de medição <i>U</i> <i>/ (%)</i>
12,5	29	6,040	0,10	0,208	1,670
13,2	24	6,015	0,13	0,247	2,112
39,1	20	6,009	0,09	0,300	1,419
49,3	44	12,268	0,09	0,280	0,756
29,0	99	24,437	0,16	0,246	0,667

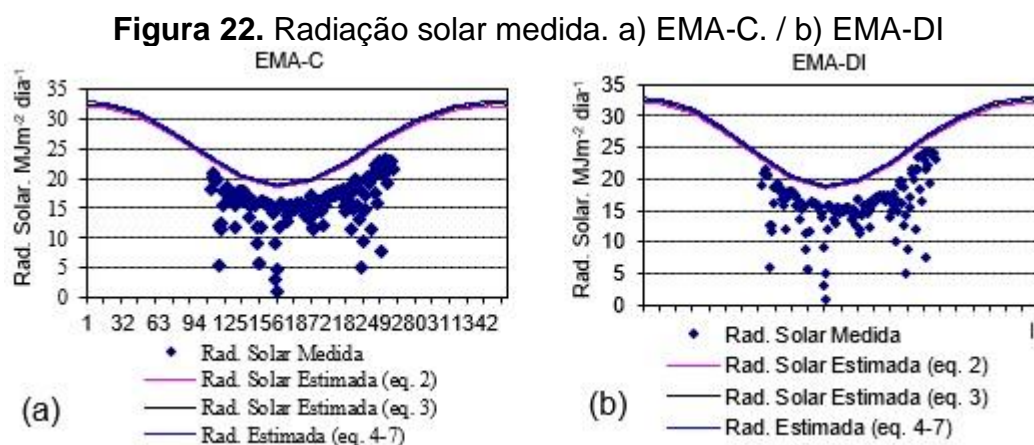
Fonte: elaborado pelo autor (2024)

As calibrações do termôhigrômetro e do pluviômetro, incluindo a análise exploratória dos dados, elaboração de planilha (ver anexo), tratamento estatístico e avaliação da incerteza de medição na calibração foram realizados pelo autor com supervisão da equipe dos laboratórios de metrologia da área de Metrologia Ambiental do INPE.

4.2 VERIFICAÇÃO DOS SENSORES DA EMA-DI

Por meio da meteorologia utilizada foi realizada a verificação dos dados meteorológicos da EMA-C e EMA-DI.

Os dados da radiação solar da EMA-C e EMA-DI seguem e subestimam a radiação solar estimadas por três equações, segundo a técnica descrita por Allen (1996). Portanto, os dados são aceitáveis e os sensores estão operando corretamente (Figura 22).

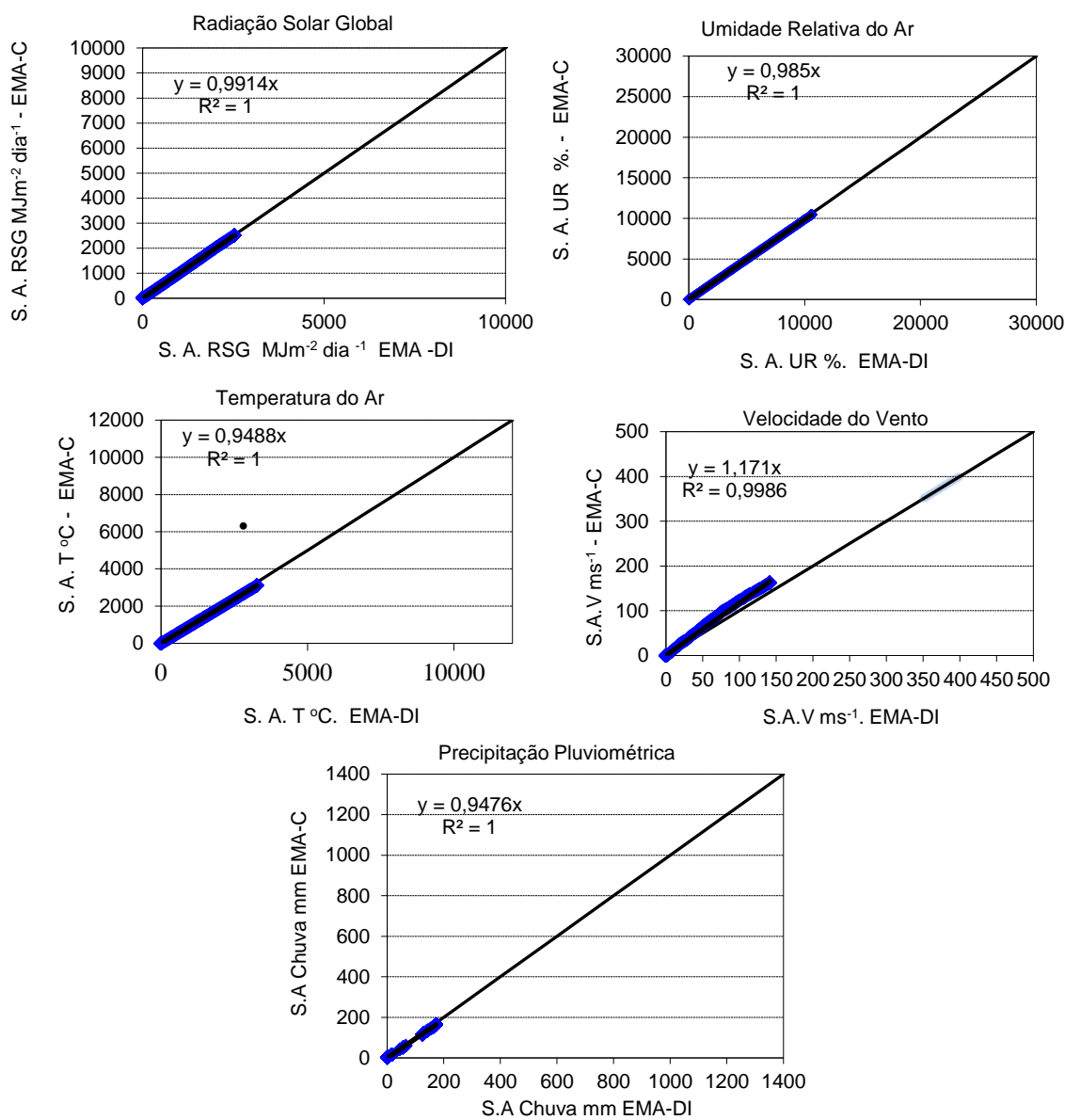


Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Os resultados ratificam as análises realizadas por Oliveira *et al.* (2015), na qual os autores avaliaram a integridade dos dados meteorológicos da estação meteorológica automática (EMA) do SINDA/INPE utilizando as técnicas descritas por Allen (1996). Os resultados deste trabalho corroboram com os de Turco e Carleto (2017) que avaliaram a integridade de dados das EMAs da Davis e da Campbell por meio das técnicas descritas por Allen (1996).

Observa-se a radiação solar global, umidade relativa do ar registradas pela EMA-DI apresentam correlações satisfatórias quando comparadas com a EMA-C. Desta forma, com base na inclinação de 45° da reta, é possível verificar boa confiabilidade dos dados. Isso significa que os sensores estão operando de forma satisfatória. Os dados de temperatura do ar, velocidade do vento e precipitação pluviométrica da EMA-DI apresentaram correlação satisfatória quando comparadas com os da EMA-C. A diferença dos sensores está associada a calibração deles, indicando que os sensores estão operando de forma satisfatória (Figura 23).

Figura 23. Soma acumulativa dos valores diários da Radiação solar global, umidade relativa do ar, temperatura do ar, velocidade do vento precipitação pluviométrica. máxima e mínima, EMA-C e EMA-DI



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Os dados da temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, radiação solar global e precipitação pluviométrica da EMA-DI, em relação a EMA-C foram avaliados por meio da diferença sistemática (d), desvio padrão estimado da diferença (s) e Confiança (c). Os dados apresentaram d e s aceitáveis, ou seja, valores próximos e 95 por cento das medidas das diferenças estão dentro de $\pm 2s$ (Tabelas 8 e 9).

Tabela 8. Verificação da temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar global da EMA-DI, em relação a EMA-C, por meio da diferença sistemática (d), desvio padrão estimado da diferença (s) e Confiança (c)

EMA	Ano	TEMPERATURA DO AR			UMIDADE RELATIVA DO AR			VELOCIDADE DO VENTO			RADIÇÃO SOLAR GLOBAL		
		d	s	c (%)	d	s	c (%)	d	s	c (%)	d	s	c (%)
EMA-DI	2023	-1,05	0,14	99,3	-1,01	0,17	94,56	0,13	0,16	95,24	-0,15	0,53	96,58

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Tabela 9. Verificação da Precipitação Pluviométrica da EMA-DI, em relação a EMA-C, por meio da diferença sistemática (d), desvio padrão estimado da diferença (s), Confiança (c)

EMA	Ano	Precipitação Pluviométrica		
		d	s	c (%)
EMA-DI	2023	-0,37	0,74	98,63

Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Por meio da Tabela 10 é possível verificar os resultados da avaliação dos dados meteorológicos da EMA-DI, em relação a EMA-C, por meio do coeficiente de assimetria e curtose. Os dados de temperatura apresentaram coeficiente de assimetria (g1) maior que zero, ou seja, distribuição assimétrica positiva (à direita). Já os dados de umidade relativa do ar, velocidade do vento, radiação solar global, precipitação pluviométrica tiveram coeficiente de assimetria (g1) menor que zero, ou seja, distribuição assimétrica negativa (à esquerda). Os dados de temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento, radiação solar global e precipitação pluviométrica apresentaram coeficiente de curtose (g2) maior que zero, ou seja, grau de achatamento baixo, curva leptocúrtica.

Tabela 10. Verificação da temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, Radiação solar global e precipitação pluviométrica da EMA-DI, em relação a EMA-C, por meio do coeficiente de assimetria e curtose de Fisher

EMA	Ano	TEMPERATURA DO AR		UMIDADE RELATIVA DO AR		VELOCIDADE DO VENTO		RADIÇÃO SOLAR GLOBAL		PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA	
		g1	g2	g1	g2	g1	g2	g1	g2	g1	g2
EMA-DI	2023	5,67	9,74	-0,15	0,47	-1,61	3,86	-0,71	0,59	-1,2	6,74

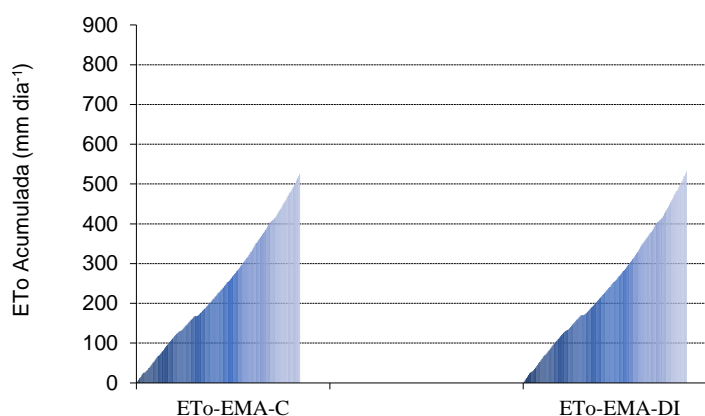
Fonte: elaborado pelo autor (2024)

4.3 AVALIAÇÃO DA ETo DA EMA-DI EM RELAÇÃO EMA-C

4.3.1 Avaliação da ETo por meio da técnica de dupla massa

A soma acumulativa da ETo da EMA-C e EMA-DI, no período outono e inverno de 2023 foi 525,71mm e 531,5 mm, respectivamente (Figura 24).

Figura 24. Soma acumulativa da ETo das EMA-C e EMA-DI



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

Os resultados obtidos mostraram a importância de estudos desta natureza, que possibilitam verificar a influência da integridade dos dados de estações automáticas na estimativa da ETo. O impacto do erro dos dados meteorológicos na estimativa da ETo também foi estudado por Estéves *et al.* (2009).

A verificação dos dados meteorológicos precisa ser feita antes dos dados serem utilizados em equações de estimativa da ETo.

Procedimentos de verificação de dados deveriam ser adotados a toda rede de estação meteorológica agrícola, para assegurar que dados com qualidade estão sendo medidos e transferidos para os usuários.

4.3.2 Avaliação da ETo considerando os erros da ETo

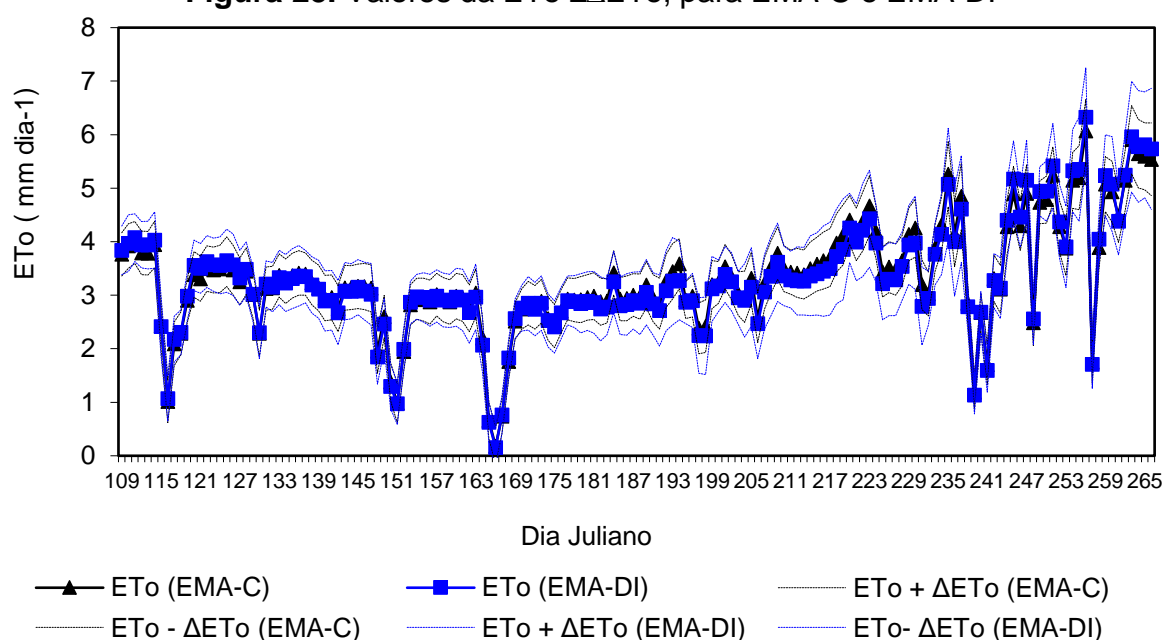
Neste item, mostramos inicialmente os resultados da aplicação da técnica de determinação de erros, determinando-se os erros estatísticos com 95% de confiança da ETo (EMA-C) e ETo (EMA-DI) pelo método de Penman-Monteith (ALLEN *et al.*, 2006).

O erro diário ($\pm\Delta ETo$) associado a estimativa da ETo (EMA-C) e ETo (EMA-DI) foi

obtido utilizando-se a equação 25 e aplicando-se a equação 21 diariamente, no período outono e inverno de 2023, em um total de 158 dias aproveitados.

A Figura 25 mostra os valores diários da $ET_o \pm \Delta ET_o$ (EMA-C, EMA-DI) para o método de Penman-Monteith (Allen et al., 2006). As acurácias dos instrumentos de medidas da temperatura do ar (T), velocidade do vento (V), umidade relativa (U) e radiação solar global (Q) causaram na ET_o (EMA-C) e ET_o (EMA-DI) erros $\pm \Delta ET_o$. Verifica-se na Figura 25 que os instrumentos de medidas utilizados para obtenção da ET_o (EM-C) e ET_o (EM-DI) causaram erros diferentes ($\pm \Delta ET_o$). A EMA-C e EMA-DI apresentaram valores médios de $ET_o \pm \Delta ET_o$ de $3,32 \pm 0,39$ (mm dia⁻¹) e $3,29 \pm 0,59$ (mm dia⁻¹), respectivamente.

Figura 25. Valores da $ET_o \pm \Delta ET_o$, para EMA-C e EMA-DI



Fonte: elaborado pelo autor (2024)

5 CONCLUSÃO

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. Portanto, recomenda-se estudos de campo para obtenção de informações da influência da incerteza na estimativa da ETo no manejo da irrigação.

Não houve diferença na ETo estimada pelas duas estações, mas houve diferença na incerteza da estimativa da ETo ($\pm\Delta ETo$) das duas estações. Dessa forma, se esse cálculo for processado com dados obtidos de sensores descalibrados, a estimativa da ETo terá incerteza maior referente a incerteza dos sensores. Portanto considera-se os métodos apresentados de nesse trabalho de grande importância em estudos de segurança hídrica realizadas em regiões com utilização de estações meteorológicas automáticas.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira De Normas Técnicas. **NBR ISO 17025**: Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração - diretrizes. Rio de Janeiro. 2017. Disponível em: <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/20966/nbriso-iec17025-requisitos-gerais-para-a-competencia-de-laboratorios-de-ensaio-e-calibracao>. Acesso em: 22 jan. 2024.
- ALLEN, R.G. Assessing integrity of weather data for reference evapotranspiration estimation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, North Carolina, 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).
- AMS. Glossário de Meteorologia. **Glossary of Meteorology**: welcome. 2022. Disponível em: <https://glossary.ametsoc.org/wiki/Welcome>. Acesso em: 22 jan. 2024.
- ASTM. American Society For Testing And Materials. **Standard Test Method for Transfer of Calibration From Reference to Field Radiometers** - ASTM E824 – 10, 2018. Disponível em: [https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?E824+10\(2018\)e1](https://compass.astm.org/EDIT/html_annot.cgi?E824+10(2018)e1). Acesso em: 10 jun. 2024.
- ASTM. American Society For Testing And Materials. Standard Practice for Determining the Operational Comparability of Meteorological Measurements - ASTM D4430 – 00 (Reapproved 2023), 2018. Disponível em: <https://www.astm.org/d4430-00r15.html>. Acesso em: 10 jun. 2024.
- BACHOUR, R., ASCE, S.M., WALKER, W.R., ASCE, F., TORRES-RUA, A.F., MCKEE, M. Assessment of Reference Evapotranspiration by the Hargreaves Method in the Bekaa Valley, Lebanon. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 139, n.11, p. 933-938, 2013.
- BARROS, V. R.; SOUZA, A.P.; FONSECA, D.C.; SILVA, L. B. D. Avaliação da evapotranspiração de referência na Região de Seropédica, Rio de Janeiro, utilizando lisímetro de pesagem e modelos matemáticos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 4, n. 2, p. 198-203, 2009.
- BENTLEY, R. E. **Uncertainty in measurement: The ISO guide, Technology transfer series monograph n 1**. National Measurement Institute of Australia, p.52-60, 2005.
- BIPM. Le. **Système international d'unités (SI)**, 9e édition, 2019. The International System of Units (SI). www.bipm.org/utis/common/pdf/si-brochure/SI-Brochure-9.pdf. Acesso em: 12 mar. 2023.
- BIPM. **JCGM 100:2008**. Avaliação de dados de medição — Guia para a expressão

de incerteza de medição, 2008.

http://www.inmetro.gov.br/noticias/conteudo/iso_gum_versao_site.pdf. Acesso em 17 jun, 2023.

BLAINSKI, E.; GARBOSSA, L.H.P.; ANTUNES, E.N. **Estações hidrometeorológicas automáticas**: recomendações técnicas para instalação. Florianópolis: Epagri, 2012, 43p. (Epagri. Documentos, 240). Disponível em: https://meteo-eau.wdfiles.com/local--files/start/recomendacoes_tecnicas_para_instalacao_de_estacoes.pdf. Acesso em: 22 jan. 2024.

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.

ÇETIN, S.; KÖKSAL, E. S. Potential use of remote sensing techniques in evapotranspiration estimates at watershed level. **Environmental Monitoring and Assessment**, Dordrecht, v. 190, n. 10, p. 601, 2018.

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.

D. R. Remote Sensing and GIS Techniques for Assessing Irrigation Performance: Case Study in Southern California. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 144, n. 6, 05018002, 2018.

DA CUNHA, A.R.; ESCOBEDO, J.F.; GALVANI, E. Avaliação de um psicrômetro de termopar de baixo custo. **Rev. Bras. Agrometeorol.**, v.9, n.1, p.16-24, 2001.

DJAMAN, K.; KOUDAHE, K.; LOMBARD, K.; O'NEIL, M. Sum of hourly vs. Daily Penman-Monteith grass-reference evapotranspiration under semiarid and arid climate. **Irrigation and Drainage Systems Engineering**, Milan, v. 7, n. 1, p. 1-6, 2018.

EA. European Accreditation. **Evaluation of the Uncertainty of Measurement in calibration**. Publication Reference: EA-4/02 M: 2022. Disponível em: <https://www.enac.es/documents/7020/635abf3f-262a-4b3b-952f-10336cdfae9e>. Acesso em: 22 jan. 2024.

ESTÉVES, J., GAVILÁN, P., BERENGENA, J. Sensitivity analysis of a PenmanMonteith type equation to estimate reference evapotranspiration in southern Spain. **Hydrological Processes**, v. 23, p. 3342-3353, 2009.

EURAMET. **Guide No. 18**. Guidelines on the Calibration of Non-Automatic Weighing Instruments, Version 4.0, p.5-12, 2015.

EURAMET. **Guide No. 19**. Guidelines on the Determination of Uncertainty in Gravimetric Volume Calibration, Version 3.0, p.4-6, 2018.

FAO. Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements** - FAO Irrigation and drainage paper 56. Roma, 1998. Disponível em: <https://www.fao.org/3/X0490E/x0490e00.htm#Contents>. Acesso em: 22 jan. 2024.

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

FILGUEIRAS, R.; MANTOVANI, E. C.; ALTHOFF, D.; DIAS, S. H. B.; CUNHA, F. F. Sensitivity of evapotranspiration estimated by orbital images under influence of surface temperature, **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 39, special issue, p. 23-32, 2019.

GUIMARÃES, P. L. O. *et al.* Avaliação metrológica de um sistema de calibração indoor para piranômetros baseado em um simulador solar. **Anais...** V Congresso Brasileiro de Energia Solar e V Conferencia Latino-Americana da ISES – São Paulo, 18 a 21 de setembro de 2012. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/2075/2058>. Acesso em: 22 jan. 2024.

GUM. Guia para a expressão de incerteza de medição. **JCGM 100:2008 (ISO GUM)** www.gov.br/inmetro/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/documentos-tecnicos-em-metrologia/gum_final.pdf. Acesso em: 10 jun. 2024.

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

INMETRO. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. **Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012)**. Duque de Caxias, RJ: INMETRO, 2012. 94 p. Disponível em: https://www.gov.br/inmetro/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/documentos-tecnicos-em-metrologia/vim_2012.pdf/view. Acesso em: 22 jan. 2024.

INMETRO. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. **O Sistema Internacional de unidades**. Tradução do Grupo de Trabalho luso-brasileiro do Inmetro e IPQ. — Brasília, DF: Inmetro, 2021. Disponível em: https://www.gov.br/inmetro/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/documentos-tecnicos-em-metrologia/si_versao_final.pdf/view. Acesso em: 22 jan. 2024.

INMETRO. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. **Avaliação de dados de medição: Guia para a expressão de incerteza de medição – GUM 2008**. Duque de Caxias, RJ: INMETRO/CICMA/SEPIN, 2012. Disponível em: https://www.gov.br/inmetro/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/documentos-tecnicos-em-metrologia/gum_final.pdf/view. Acesso em: 22 jan. 2024.

INMETRO/IPQ. **O Sistema Internacional de Unidades (SI)**. Tradução Luso-Brasileira da 9ª Edição do BIPM, 2021. Disponível em: www.gov.br/inmetro/pt

br/centrais-de-conteudo/publicacoes/documentos-tecnicos-em-metrologia/si_versao_final.pdf/view. Acesso em: 27 mar. 2023.

INMETRO/IPQ. **Vocabulário Internacional de Metrologia**: conceitos fundamentais e gerais e termos associados (VIM 2012 - JCGM 200:2012), 1ª Edição Luso-Brasileira Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: www.inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/vim_2012.pdf. Acesso em: 27 mar. 2023.

ISO. International Organization for Standardization. **ISO 3966:2020**. Measurement of fluid flow in closed conduits. 2020. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/75508.html>. Acesso em: 22 jan. 2024.

ISO. International Organization for Standardization. **ISO 9060: 2018**. Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar irradiance. 2018. Disponível em: <https://www.hukseflux.com/applications/meteorology-surface-energy-flux-measurement/new-iso-90602018-standard-do-your>. Acesso em: 22 jan. 2024.

ISO. International Organization for Standardization. **ISO 9847: 2023**. Calibration of pyranometers by comparison to a reference pyranometer, Solar energy. 2023. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/78800.html>. Acesso em: 22 jan. 2024.

ISO. ISO 9847:1992. **Solar energy** — Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer. Disponível em: www.iso.org/standard/17725.html. Acesso em: 22 jan. 2024.

ISO/IEC. **Guide 98-3:2008**. Uncertainty of measurement. Disponível em: <https://www.iso.org/standard/50461.html>. Acesso em: 22 jan. 2024.

JAMSHIDI, S.; ZAND-PARSA, S.; JAHROMI, M. N.; NIYOGI, D. Application of a Simple Landsat-MODIS Fusion Model to Estimate Evapotranspiration over a Heterogeneous Sparse Vegetation Region. **Remote Sensing**, Basel, v. 11, n. 7, p. 741, 2019.

KESSEL, R.; KACKER, R.; BERGLUND, M. Coefficient of contribution to the combined standard uncertainty. **Revista Metrologia**, v.43, n.1, p.189-195, 2006.

KHAND, K.; TAGHVAEIAN, S.; GOWDA, P.; PAUL, G. A Modeling Framework for Deriving Daily Time Series of Evapotranspiration Maps Using a Surface Energy Balance Model. **Remote Sensing**, Basel, v. 11, n. 5, p. 508, 2019.

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.

MCCABE, M. F.; MIRALLES, D. G.; HOLMES, T. R. H.; FISHER, J. B. Advances in the Remote Sensing of Terrestrial Evaporation. **Remote Sensing**, Basel, v. 11, n. 9, p. 1138, 2019.

MEASNET. Measuring-Network of Wind Energy Institutes. **Anemometer Calibration Procedure**. Version 3, December 2020. Disponível em: https://www.measnet.com/wp-content/uploads/2021/05/MEASNET_Anemometer-Calibration-Procedure_Version-3_10122020.pdf. Acesso em: 22 jan. 2024.

MEASNET. Measuring-Network of Wind Energy Institutes. **Version 1**. November 2009. Disponível em: https://www.measnet.com/wp-content/uploads/2012/04/Measnet_SiteAssessment_V1-0.pdf. Acesso em: 22 jan. 2024.

NOVAIS, J. W. Z.; HILLESHEIM, A. C.; FANK, N. C.; SIQUEIRA VARELLA OLIVEIRA, L.; SOARES DOS SANTOS BRITO, N.; DOS SANTOS OLIVEIRA ZANGESKI, D.; PEREIRA DE OLIVEIRA, B. B. Técnica de Calibração de Sensores Meteorológicos de Temperatura e Umidade Relativa do ar Utilizando um Sensor de Referência. **UNICIÊNCIAS**, v. 24, n. 1, p. 30–33, 2021. Disponível em: <https://uniciencias.pgsscogna.com.br/uniciencias/article/view/8916>. Acesso em: 22 jan. 2024.

NPL. National Physical Laboratory. **A guide to the measurement of humidity**. 1996. Disponível em: www.npl.co.uk/special-pages/guides/a-guide-to-the-measure-of-humidity-gpg103. Acesso em: 22 jan. 2024.

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. Acesso em 18 set, 2022.

PRESTON-THOMAS, H. The International Temperature Scale of 1990 (ITS-90). **Revista Metrologia**, v.27, n.1, p.3-10, 1990. Disponível em: https://www.nist.gov/system/files/documents/pml/div685/grp01/ITS-90_metrologia.pdf. Acesso em: 22 jan. 2024.

REBOITA, M. S.; KRUCHE, N. Normais Climatológicas Provisórias de 1991 a 2010 para Rio Grande, RS. **Revista Brasileira de Meteorologia**. v. 33, n.1, 2019.

REDA, A. G.; UEHARA, D. M.; REDA, A. L.L. Pesquisa de graduação: calibração dos erros de medição de pluviômetro automático de básculas para chuvasintensas no Brasil. **Anais... XXXVI COBENGE-Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia**, E.E.Mauá e EPUSP: São Paulo, SP. 09-12, setembro, 10p., 2008.

ROJAS, JB.; GILETE, S.D.; MARZON, J. Development of a lowcost weather station to measure in situ essential climate variables. **J. Earth Scie. Eng.**, n.4, p.452-461, 2014.

SANTANA, M. A. A.; GUIMARÃES, P. L. O.; ALMEIDA, E. S.; EKLIN, T. The importance of metrological metadata in the environmental monitoring. 8th Brazilian Congress on Metrology (Metrologia 2015). **Journal of Physics: Conference Series** 733 (2016) 012033. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/733/1/012033/pdf>. Acesso em: 22 jan. 2024.

SANTANA, M. A. A.; GUIMARÃES, P. L. O.; LANZA, L. G. Development of procedures for calibration of meteorological sensors. Case study: calibration of a tipping-bucket rain gauge and data-logger set. 9th Brazilian Congress on Metrology (Metrologia 2017). IOP Conf. Series. **Journal of Physics: Conf. Series** 975 (2018) 012006. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/975/1/012006/pdf>. Acesso em: 22 jan. 2024.

SANTANA, M. A. A.; GUIMARÃES, P. L. O.; LANZA, L. G.; VUERICH E. metrological analysis of a gravimetric calibration system for tipping-bucket rain gauges. **Meteorol. Appl.**, v.22, n.1, p.879-885, 2015. Disponível em: <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/met.1540>. Acesso em: 22 jan. 2024.

SANTANA, M. **Seminário:** calibração de sensores meteorológicos temperatura. Programa de Pós-graduação em Agronomia (Ciência do Solo). FCAV/UNESP-Campus de Jaboticabal. 28 set. 2020. Disponível em: <https://zenodo.org/records/4056484>. Acesso em: 22 jan. 2024.

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. Acesso em 08 fev, 2023.

SENTELHAS, P. C.; MORAIS, S. O.; PIEDADE, S. M. S.; PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; MARIN, F. R. Análise comparativa de dados meteorológicos obtidos por estações convencional e automática. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 2, p. 215-221, 1997.

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. Acesso em 20 ago, 2023.

SOUZA, P. J. O. P. et al. Produtividade e eficiência do uso da água do feijão-caupi sob deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n. 2, p.119-125, 2019.

TAGHVAEIAN, S.; NEALE, C. M.; OSTERBERG, J. C.; SRITHARAN, S. I.; WATTS, TORRES, J. D.; MONTEIRO, I. O.; DOS SANTOS, J. R.; ORTIZ, M. S. Aquisição de dados meteorológicos através da plataforma Arduino: construção de baixo custo e análise de dados. **Scientia Plena**, v. 11, n. 2, 2015. Disponível em: <https://www.scientiaplenu.org.br/sp/article/view/1742>. Acesso em: 22 jan. 2024.

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

TURCO, J.E.P.; PINOTTI JUNIOR, M.; PAVANI, L.C.; FERNANDES, E.J. Técnica para determinação de erros em métodos de estimativa da evapotranspiração de referência. **Engenharia agrícola**. Campinas, v.14, p.31-37, 1994.

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.

WAGLE, P.; GOWDA, P. H. Editorial for the Special Issue “Remote Sensing of Evapotranspiration (ET)”. **Remote Sensing**, Basel, v. 11, n. 18, p. 2146-2153, 2019.

WMO. WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. **Guidelines on climate metadata and homogenization** - WMO/TD - Nº 1186 - Geneva: WMO, 108.p, 2003 Disponível em: <https://library.wmo.int/records/item/36913-guidelines-on-climate-metadata-and-homogenization?offset=3>. Acesso em: 10 jun. 2024.

WMO. Organização Meteorológica Mundial. **Guide to Agricultural Meteorological Practices**. WMO-No. 134. Geneva, 2012. Disponível em: https://library.wmo.int/viewer/35689/download?file=WMO_No134_en.pdf&type=pdf&navigator=1. Acesso em: 22 jan. 2024.

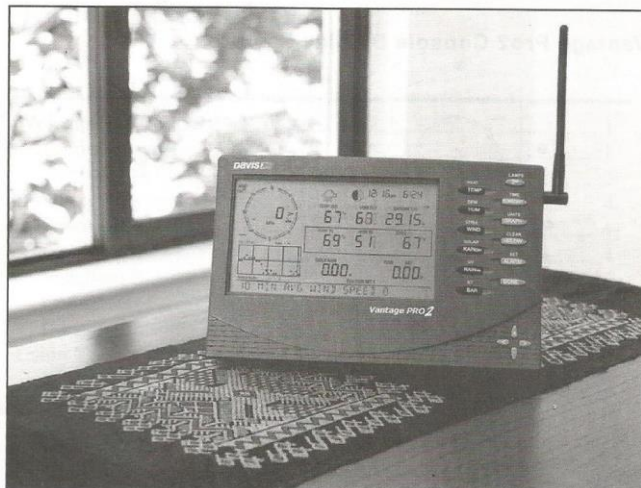
WMO. Organização Meteorológica Mundial. **Guide to Instruments and Methods of Observation (WMO-No. 8)**. Edition 2021/2018. Disponível em: https://community.wmo.int/en/activity-areas/imop/wmo-no_8. Acesso em: 22 jan. 2024.

WMO. World Meteorological Organization. **Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation: WMO-No. 8**. 2008. Disponível em: <https://www.weather.gov/media/epz/mesonet/CWOP-WMO8.pdf>. Acesso em: 22 jan. 2024.

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

WMO. World Meteorological Organization. **Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation, 2018** Edition. Disponível em: www.wmo.int/pages/prog/www/IMOP/CIMO-Guide.html. Acesso em :15 set. 2023.

ANEXOS



Vantage Pro2™ Console Manual

For Vantage Pro2™ & Vantage Pro2 Plus™ Weather Stations



Davis Instruments, 3465 Diablo Avenue, Hayward, CA 94545 • 510-732-9229 • www.davisnet.com

Weather Data Specifications

Weather Data Specifications

Note: These specifications include optional sensors that may not be installed in your Vantage Pro2 Station.

Weather Data Specifications

Variable	Required Sensors	Resolution	Range	Nominal Accuracy (+/-)
Barometric Pressure*	Included in Console	0.01" Hg; 0.1 mm; 0.1 hPa; 0.1 mb	26" to 32" Hg; 660 to 810 mm; 880 to 1080 hPa; 880 to 1080 mb**	0.03" Hg; 0.8 mm Hg; 1.0 hPa; 1.0 mb
Barometric Trend (3 hour)		Change Rates Rapidly: $\geq .06"$ H; 1.5 mm Hg; 2 hPa; 2 mb Slowly: $\geq .02"$ H; 0.5 mm Hg; 0.7 hPa; 0.7 mb	5 Arrow Positions: Rising Rapidly Rising Slowly Steady Falling Slowly Falling Rapidly	
Evapotranspiration (ET)	ISS or Temp/Hum Station & Solar Radiation sensor	0.01"; 0.25 mm	Daily to 99.99"; 999.9 mm Monthly & Yearly to 199.99"; 1999.9mm	greater of 5% or 0.01"; 0.25 mm
Inside Humidity	Included in Console	1%	10 to 90%	5% RH
Outside Humidity	ISS or Temp/Hum Station	1%	0 to 100%	3% RH; 4% above 90%
Extra Humidity	ISS or Temp/Hum Station	1%	0 to 100%	3% RH; 4% above 90%
Dew Point (overall)	ISS or Temp/Hum Station	1°F; 1°C	-105° to +130°F; -76° to +54°C	3°F; 1.5°C
Leaf Wetness	Leaf & Soil Station	1	0 to 15	0.5
Soil Moisture	Leaf & Soil Station or Soil Moisture Station	1 cb	0 to 200 cb	
Daily & Storm Rainfall	Rain Collector	0.01"; 0.25mm	to 99.99"; 999.9 mm	greater of 4% or 1 tip,
Monthly & Yearly Rainfall		0.01"; 0.25mm (1mm at totals over 2000 mm)	to 199.99"; 19,999 mm	greater of 4% or 1 tip
Rain Rate		0.01"; 0.25 mm	to 100"/hr; 1999.9 mm/hr	greater of 5% or 0.04"/hr; 1 mm/hr

* Barometric pressure readings are standardized to sea level. Elevation Range: -1500' to +12,500'; -460 to + 3810 m. Note: The console screen limits display of lower elevation to -999' when using feet as elevation unit.

** This is the reduced value after standardizing to sea level.

Weather Data Specifications

Weather Data Specifications

Variable	Required Sensors	Resolution	Range	Nominal Accuracy (+/-)
Solar Radiation	Solar sensor	1 W/m ²	0 to 1800 W/m ²	5% of full scale
Inside Temperature	Included in Console	0.1°F; 0.1°C	+32° to +140°F; 0 to +60°C	1°F; 0.5°C
Outside Temperature ***	ISS, Temp Station or Temp Hum Station	0.1°F; 0.1°C	-40° to +150°F; -40° to +65°C	1°F; 0.5°C
Extra Temperature	ISS, Temp Station, Temp Hum Station, Leaf Soil Station or Soil Station	1°F; 1°C	-40° to +150°F -40° to +65°C	1°F (0.5°C)
Heat Index	ISS or Temp/Hum Station	1°F; 1°C	-40° to +135°F; -40° to +57° C	3°F (1.5°C)
Temp-Hum-Sun-Wind index (THSW)	ISS & Solar Radiation	1°F; 1°C	-90° to +135°F; -68° to +64° C	4°F (2°C)
Time	Included in Console	1 min	24 hours	8 sec/mon
Date		1 day	month/day	8 sec/mon
UV Index	UV Radiation	0.1 Index	0 to 16	5% of full scale
UV Dose		0.1 MED < 20, 1 MED > 20	0 to 199 MEDs	5%
Wind Direction	Anemometer	1°	0 to 360°	7°
Compass Rose		22.5°	16 compass pts	0.3 compass pt
Wind Speed (large cups)		1 mph; 1 kt; 0.5 m/s; 1 km/h	2 to 150 mph; 2 to 130 kts 3 to 241 km/h, 1 to 68 m/s	greater of 2 mph/kts; 1 m/s; 3 km/h or 5%
Wind Speed (small cups)		1 mph; 1 kt; 0.5 m/s; 1 km/h	3 to 175 mph; 3 to 150 kts 1.5 to 79 m/s 5 to 282 km/h	greater of 3mph; 3 kts; 1 m/s; 5km/h or 5%
Wind Chill	ISS	1°F; 1°C	-120° to +130°F -84° to +54°C	2°F; 1°C

*** Outside temperature accuracy is based on the temperature sensor itself and not on the sensor and the passive shielding together. The solar radiation induced error for standard radiation shield: +4°F (2°C) at solar noon; for fan aspirated radiation shield: +0.6°F (0.3°C) at solar noon (insolation = 1040 W/m², avg. wind speed ≤ 2 mph (1 m/s), reference: RM Young Model 43408 Fan-Aspirated Radiation Shield).



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Certificado de calibração n^o Instituição 001/2023

NÚMERO: NOME	LIT09-LIT34-CC-10001	VERSÃO: VERSÃO	02	FOLHA: TOTAL	1/4
------------------------	-----------------------------	--------------------------	-----------	------------------------	------------

Laboratório de Calibração acreditado pela CGCR/ - Coordenação Geral de Acreditação do Instituto de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 0022

Calibration Laboratory accredited by CGCR - General Accreditation Coordination of Institute according to ABNT NBR ISO/IEC 17025, under the number CAL 0022

Objeto:	HUMIDITY & TEMPERATURE TRANSMITER
Fabricante:	Rotronics
Modelo:	HYGROCLIP 5
Número de série:	53344143
Patrimônio:	504.882
Acessórios:	-
Observações:	Não consta
Cliente:	UNESP - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho Endereço - Via de Acesso Prof. Paulo Donato Castellane s/n, Bairro Rural CEP: 14.884-900
Data de calibração:	18/02/2023
Registro(s) interno(s):	-

Cachoeira Paulista, 18 de Fevereiro de 2023.

DANIEL APARECIDO MORELLO
 DA COSTA:43617809863

Assinado de forma digital por DANIEL
 APARECIDO MORELLO DA
 COSTA:43617809863
 Data: 2024.02.11 19:24:00 -03'00'

Responsável pela calibração: Daniel Ap. Morello Costa
 CREA: 5071085690



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Certificado de calibração nº Instituição 001/2023

NÚMERO: NÚMERO:	LIT09-LIT34-CC-10001	VERSÃO: VERSION:	02	PÁGINA: PAGE:	2 / 4
--------------------	-----------------------------	---------------------	-----------	------------------	--------------

Laboratório de Calibração acreditado pela COCER - Coordenação Geral de Acreditação do Inmetro de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 0022

Calibration Laboratory accredited by COCER - General Accreditation Coordination of Inmetro according to ABNT NBR ISO/IEC 17025, under the number CAL 0022

O presente certificado de calibração é válido apenas para o objeto acima descrito, não sendo extensivo a quaisquer outros equipamentos ou lotes, ainda que similares. Este certificado de calibração somente pode ser reproduzido na sua totalidade, eventuais reproduções parciais devem ser previamente autorizadas pelo laboratório.

Recomenda-se a calibração periódica assim como a checagem intermediária.

Procedimento de calibração:

A calibração foi realizada pelo método de comparação direta com os padrões de referência de temperatura com as medidas baseadas na IPTS-90 (*International Practical Temperature Scale of 1990*). Para cada ponto de medição foram realizadas séries de 60 medições com intervalo entre as medições de 30 segundos, sendo informado os valores médios.

Condições Ambientais:

Temperatura do ar: $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$
 Umidade relativa do ar: $(40 \pm 10) \% \text{ u.r.}$
 Pressão atmosférica: $(940 \pm 3) \text{ hPa.}$



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Certificado de calibração nº Instituição 001/2023

NÚMERO:
 NUMBER:

LIT09-LIT34-CC-10001

VERSÃO:
 VERSION:

02

PÁGINA:
 PAGE:

3 / 4

Laboratório de Calibração acreditado pela COCER - Coordenação Geral de Acreditação do Inmetro de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 0022

Calibration Laboratory accredited by COCER - General Accreditation Coordination of Inmetro according to ABNT NBR/ISO/IEC 17025, under the number CAL 0022

Resultados da calibração:

CALIBRAÇÃO DE TEMPERATURA

Temperatura de Referência t_{ref} / °C	Temperatura indicada t_{ind} / °C	Correção t_{cor}, t_{ind} / °C	Incerteza da calibração U / °C	Fator de abrangência k	Graus de liberdade efetivos ν_{eff}
0,5	0,4	0,1	0,6	2,07	38
5,5	5,5	0,0	0,5	2,06	44
10,4	10,4	0,0	0,4	2,04	50
15,5	15,6	-0,1	0,3	2,03	73
25,1	25,2	-0,1	0,2	2,02	109
35,2	35,4	-0,2	0,2	2,02	113
44,8	45,0	-0,2	0,3	2,02	123

A incerteza expandida de medição relatada é equivalente à incerteza padrão combinada multiplicada pelo fator de abrangência "k" para uma distribuição t com graus de liberdade efetivos correspondentes a uma probabilidade de abrangência de 95,45%, determinada de acordo com os documentos EA-4/02 - Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration e ISO/GUM - Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement.



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Certificado de calibração nº Instituição 001/2023

NÚMERO: NUMBER:	LIT09-LIT34-CC-10001	VERSÃO: VERSION:	02	FOLHA: SHEET:	4 / 4
--------------------	-----------------------------	---------------------	-----------	------------------	--------------

Laboratório de Calibração acreditado pela CGCRE - Coordenação Geral de Acreditação do Inmetro de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 0022

Calibration Laboratory accredited by CGCRE - General Accreditation Coordination of Inmetro according to ABNT NBR ISO/IEC 17025, under the number CAL 0022

Rastreabilidade Metrológica:

EQUIPAMENTO	MARCA	MODELO	Nº SÉRIE	CERTIFICADO	VALIDADE	RASTREABILIDADE
Optical Dew Point Transmitter	MICHELL INSTRUMENTS	OPTIDEW	114446	DIMCI 0775/2022	jul/2024	NMI Brazil
Câmara Climática	CINCINNATI SUB ZERO	ZPH-16-1.5H/AC	ZP0721254	LIT09-LIT034-CC-10023	mai/2027	INPE/COMIT/MTA
Data Acquisition	AGILENT	34970A	MY44013096	LIT06-LIT09-CC-10096	jul/2024	INPE/LIT RBC (CAL 0022)

Comentários:

O objeto em calibração estava em boas condições operacionais e não foi realizado nenhum ajuste, manutenção ou alteração de configuração.

00 00 00 00 00 00



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Certificado de calibração nº 002/2023

NÚMERO: NUMBER:	LIT09-LIT34-CC-10002	VERSÃO: VERSION:	02	PÁGINA: PAGE:	1 / 3
--------------------	-----------------------------	---------------------	-----------	------------------	--------------

Laboratório de Calibração acreditado pela CGCRE - Coordenação Geral de Acreditação do Instituto de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 0022

Calibration Laboratory accredited by CGCRE - General Accreditation Coordination of Institute according to ABNT NBR ISO/IEC 17025, under the number CAL 0022

Objeto:	HUMIDITY & TEMPERATURE TRANSMITTER
Fabricante:	Rotronics
Modelo:	HYGROCLIP 5
Número de série:	53344143
Patrimônio:	504.882
Acessórios:	-
Observações:	Não consta
Cliente:	UNESP - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho Endereço - Via de Acesso Prof. Paulo Donato Castellane s/n, Bairro Rural CEP: 14.884-900
Data de calibração:	18/02/2023
Registro(s) interno(s):	-

Cachoeira Paulista, 18 de Fevereiro de 2023.

DANIEL APARECIDO MORELLO
 DA COSTA-43617809863

Assinado de forma digital por DANIEL
 APARECIDO MORELLO DA
 COSTA-43617809863
 Data: 2024.09.11 19:27:17 -03'00'

Responsável pela calibração: Daniel Ap. Morello Costa
 CREA: 5071085690



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Certificado de calibração n° 002/2023

NÚMERO: NÚMERO:	LIT09-LIT34-CC-10002	VERSÃO: VERSÃO:	02	PÁGINA: PÁGINA:	2 / 3
--------------------	-----------------------------	--------------------	-----------	--------------------	--------------

Laboratório de Calibração acreditado pela COCER - Coordenação Geral de Acreditação do Inmetro de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 0022

Calibration Laboratory accredited by COCER - General Accreditation Coordination of Inmetro according to ABNT NBR ISO/IEC 17025, under the number CAL 0022

O presente certificado de calibração é válido apenas para o objeto acima descrito, não sendo extensivo a quaisquer outros equipamentos ou lotes, ainda que similares. Este certificado de calibração somente pode ser reproduzido na sua totalidade, eventuais reproduções parciais devem ser previamente autorizadas pelo laboratório.

Recomenda-se a calibração periódica assim como a checagem intermediária.

Procedimento de calibração:

A calibração foi realizada pelo método de comparação direta com os padrões de referência de temperatura com as medidas baseadas na IPTS-90 (International Practical Temperature Scale of 1990). Para cada ponto de medição foram realizadas séries de 60 medições com intervalo entre as medições de 30 segundos, sendo informado os valores médios.

Condições Ambientais:

Temperatura do ar: (23 ± 2) °C
 Umidade relativa do ar: (40 ± 10) % u.r.
 Pressão atmosférica: (940 ± 5) hPa.

Resultados da calibração:

CALIBRAÇÃO DE TEMPERATURA

Temperatura de Referência	Temperatura indicada	Correção	Incerteza da calibração	Fator de abrangência	Graus de liberdade efetivos
HR	Hind	HR, Hind	U	k	ν_{eff}
/ %ur	/ %ur	/ %ur	/ %ur		
38,5	39,4	-0,9	1,7	2,05	50
53,8	54,5	-0,7	2,0	2,03	82
68,4	70,6	-4,2	2,0	2,03	73
80,7	85,4	-4,8	2,1	2,11	25
89,2	87,4	1,8	2,3	2,23	13



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Certificado de calibração nº 002/2023

NÚMERO: NUMBER:	LIT09-LIT34-CC-10002	VERSÃO: VERSION:	02	FOLHA: SHEET:	3 / 3
--------------------	-----------------------------	---------------------	-----------	------------------	--------------

Laboratório de Calibração acreditado pela CGCRE - Coordenação Geral de Acreditação do Inmetro de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 0022

Calibration Laboratory accredited by CGCRE - General Accreditation Coordination of Inmetro according to ABNT NBR ISO/IEC 17025, under the number CAL 0022

A incerteza expandida de medição relatada é equivalente à incerteza padrão combinada multiplicada pelo fator de abrangência "k" para uma distribuição t com graus de liberdade efetivos correspondentes a uma probabilidade de abrangência de 95,45%, determinada de acordo com os documentos EA-4/02 - *Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration* e ISO/GUM - *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*.

Rastreabilidade Metrológica:

EQUIPAMENTO	MARCA	MODELO	Nº SÉRIE	CERTIFICADO	VALIDADE	RASTREABILIDADE
Optical Dew Point Transmitter	MICHELL INSTRUMENTS	OPTIDEW	120644	DIMCI 0775/2022	jul/2024	NMI Brazil
Câmara Climática	CINCINNATI SUB ZERO	ZPH-16-1.5H/AC	ZP0721254	LIT09-LIT034-CC-10023	mai/2027	INPE/COMIT/MTA
Data Aquisition	AGILENT	34970A	MY44013096	LIT08-LIT09-CC-10096	jul/2024	INPE/LIT RBC (CAL 0022)

Comentários:

O objeto em calibração estava em boas condições operacionais e não foi realizado nenhum ajuste, manutenção ou alteração de configuração.

00 00 00 00 00 00



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Certificado de calibração nº Instituição 003/2023

NÚMERO: NUMBER:	LIT09-LIT34-CC-10003	VERSÃO: VERSION:	02	FOLHA: PAGE:	1/4
--------------------	----------------------	---------------------	----	-----------------	-----

Laboratório de Calibração acreditado pela CGCRE - Coordenação Geral de Acreditação do Inmetro de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 0022

Calibration Laboratory accredited by CGCRE - General Accreditation Coordination of Inmetro according to ABNT NBR ISO/IEC 17025, under the number CAL 0022

Objeto:	PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA
Fabricante:	HANDAR
Modelo:	444A
Número de série:	B1640005
Patrimônio:	INPE
Acessórios:	-
Observações:	Não consta
Cliente:	UNESP - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho Endereço - Via de Acesso Prof. Paulo Donato Castellane s/n, Bairro Rural CEP: 14.884-900
Data de calibração:	18/02/2023
Registro(s) interno(s):	-

Cachoeira Paulista, 18 de Fevereiro de 2023.

DANIEL APARECIDO MORELLO
DA COSTA-43617809863

Assinado de forma digital por DANIEL
APARECIDO MORELLO DA
COSTA-43617809863
Dados: 2024.09.11 19:26:41 -03'00'

Responsável pela calibração: Daniel Ap. Morello Costa
CREA: 5071085690



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Certificado de calibração nº Instituição 003/2023

NÚMERO: NUMBER:	LIT09-LIT34-CC-10003	VERSÃO: VERSION:	02	PÁGINA: PAGE:	2 / 4
--------------------	-----------------------------	---------------------	-----------	------------------	--------------

Laboratório de Calibração acreditado pela COCER - Coordenação Geral de Acreditação do Inmetro de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 0022

Calibration Laboratory accredited by COCER - General Accreditation Coordination of Inmetro according to ABNT NBR/ISO/IEC 17025, under the number CAL 0022

O presente certificado de calibração é válido apenas para o objeto acima descrito, não sendo extensivo a quaisquer outros equipamentos ou lotes, ainda que similares. Este certificado de calibração somente pode ser reproduzido na sua totalidade, eventuais reproduções parciais devem ser previamente autorizadas pelo laboratório.

Recomenda-se a calibração periódica assim como a checagem intermediária.

Procedimento de calibração:

O procedimento de calibração baseia-se na comparação indireta aos padrões de trabalho (paquímetro, balança e datalogger), utilizando-se uma bomba peristáltica como simulador de chuva e um sistema de aquisição de dados.

Condições Ambientais:

Temperatura do ar:	$(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$
Umidade relativa do ar:	$(40 \pm 10) \% \text{ u.r.}$
Pressão atmosférica:	$(940 \pm 5) \text{ hPa.}$



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Certificado de calibração nº Instituição 003/2023

NÚMERO: NUMBER:	LIT09-LIT34-CC-10003	VERSÃO: VERSION:	02	PÁGINA: PAGE:	3 / 4
--------------------	-----------------------------	---------------------	-----------	------------------	--------------

Laboratório de Calibração acreditado pela COCER - Coordenação Geral de Acreditação do Inmetro de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 0022

Calibration Laboratory accredited by COCER - General Accreditation Coordination of Inmetro according to ABNT NBR ISO/IEC 17025, under the number CAL 0022

Resultados da calibração:

CALIBRAÇÃO DE ACUMULADO DE CHUVA

Intensidade de chuva RI (mm.h ⁻¹)	Número de basculadas NB -	Acumulado de chuva Q (mm)	Sensibilidade do pluviômetro REB (mm)	Incerteza da calibração U (mm)	Fator de abrangência k	Graus de liberdade efetivos ν _{ef}
12,5	29	6,04	0,208	0,101	2,87	4
13,2	34	6,02	0,247	0,127	2,87	4
39,1	20	6,01	0,300	0,085	2,87	4
49,3	44	12,26	0,280	0,093	2,85	5
29,0	99	24,43	0,248	0,163	2,85	6

Sensibilidade (resolução)

média = 0,256 (mm)

Incerteza expandida de

medição = 2,1 (% da sensibilidade)

A incerteza expandida de medição relatada é equivalente à incerteza padrão combinada multiplicada pelo fator de abrangência "k" para uma distribuição t com graus de liberdade efetivos correspondentes a uma probabilidade de abrangência de 95,45%, determinada de acordo com os documentos EA-4/02 - *Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration* e ISO/GUM - *Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*.



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

Certificado de calibração nº Instituição 003/2023

NÚMERO: NUMBER:	LIT09-LIT34-CC-10003	VERSÃO: VERSION:	02	FOLHA: PAGE:	4 / 4
--------------------	-----------------------------	---------------------	-----------	-----------------	--------------

Laboratório de Calibração acreditado pela CGCRE - Coordenação Geral de Acreditação do Inmetro de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 0022

Calibration Laboratory accredited by CGCRE - General Accreditation Coordination of Inmetro according to ABNT NBR ISO/IEC 17025, under the number CAL 0022

Rastreabilidade Metrológica:

EQUIPAMENTO	MARCA	MODELO	Nº SÉRIE	CERTIFICADO	VALIDADE	RASTREABILIDADE
Data Logger / Temperature Probe	CAMPBELL SCIENTIFIC	CR1000M / 107	13219 / #10755 150 LT #444826	LIT09-LIT34-CC-10015	ago/2023	INPE/LIT RBC (CAL 0022)
Pressure & Humidity & Temperature Transmitter	VAISALA	PTU 303	F2910045	LIT09-LIT34-CC-10018	abril/2023	INPE/LIT RBC (CAL 0022)
Pressure & Humidity & Temperature Transmitter	VAISALA	PTU 303	F2910045	LIT11-LIT34-CC-10021	abril/2023	INPE/LIT RBC (CAL 0022)
Pressure & Humidity & Temperature Transmitter	VAISALA	PTU 307	F2910080	LIT11-LIT34-CC-10020	abril/2023	INPE/LIT RBC (CAL 0022)
Balança Digital	DIGIMED	DG 15W	10LB45/2010	LIT09-LIT09-CC-10303	nov/2024	INPE/LIT RBC (CAL 0022)
Paquímetro Digital	DIGIMESS	100.178.BL	140409	LIT11-LIT34-CC-10001	jan/2024	INPE/LIT RBC (CAL 0022)

Comentários:

O objeto em calibração estava em boas condições operacionais e não foi realizado nenhum ajuste, manutenção ou alteração de configuração.

∞ ∞ ∞ ∞ ∞ ∞ ∞



CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

No- 32155/2023

Processo
12233

CONTRATANTE

Empresa: UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JULIO DE MESQUITA FILHO
Endereço: VIA DE ACESSO PROFESSOR PAULO DONATO CASTELLANE S/N - JABOTICABAL - SP

INTERESSADO

Empresa: O MESMO
Endereço: O MESMO

IDENTIFICAÇÃO DO INSTRUMENTO

Descrição / Tipo:	ANEMÔMETRO DE COPOS	Nº Série:	Não especificado
Fabricante:	R. M. YOUNG	Patrimônio:	Não especificado
Modelo	03001	Identificação:	Não especificado
Faixa de Medição	0 a 50 m/s	Resolução:	0,01 m/s

DADOS GERAIS DA CALIBRAÇÃO

Data da Calibração:	18/04/2023	Data da Emissão:	18/04/2023
Próxima Calibração:	Definida pelo cliente		
Certificado de Calibração No.	32155/2023		
Local da Calibração	Laboratório da Unimetro		

PADRÕES DE REFERÊNCIA UTILIZADOS NA CALIBRAÇÃO

Instrumento	Identificação	Série	Certificado RBC (*)	Validade
Tubo de Pitot	PAT. 05149	nc	187 398-101	04/11/2026
Transdutor de Pressão	PAT. 25306	1522502	212207/22	03/06/2023
Barômetro	PAT. 07272	X1120011	E20042/23	11/01/2024
Termo-Higrômetro	PAT. 24349	G1450107	E10042/23	13/01/2024
Datalogger	PAT. 05160	32795	E32160/22	05/07/2023

(*) RBC (Rede Brasileira de Calibração)

CONDIÇÕES DO PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO

Condições de Bloqueio		Condições Ambientais de Calibração	
Seção do Túnel de Vento (m ²)	0,442	Temperatura do Ar (°C)	23,44
Seção do Anemômetro (m ²)	0,010	Pressão Atmosférica (hPa)	919,49
Razão de bloqueio	0,021	Umidade Relativa (% u.r)	59,85
		Massa Específica do Ar (kg/m ³)	1,072

Túnel de Vento UNIMETRO

Seção de teste fechada (650 mm x 680 mm) escoamento com fluxo em aspiração e ventilador axial.

UNIMETRO

Pag. 1 de 3

Rua Senador Carlos Teixeira de Carvalho, 661 - São Paulo - SP - Cep: 01535-010
Tel: 55 (11) 3275-0444 | 2922-4571 | WhatsApp (11) 93242-3785 - 99832-5678
E-mail: laboratorio@unimetro.com.br | Site: www.unimetro.com.br



CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO

O procedimento de calibração de anemômetros UNIMETRO PC-011 segue as recomendações de calibração e determinação de incertezas da MEASNET V.1 (1977) e ABNT NBR 61400-12 (2012) Anexo F. Trata-se de um método de correlação das leituras do instrumento em calibração e um padrão de referência certificado com rastreabilidade a RBC (Rede Brasileira de calibração). O anemômetro a ser calibrado é instalado dentro da seção de teste do túnel de seção retangular de 630 mm x 680 mm. A velocidade de referência é medida utilizando um tubo de Pitot em conformidade com a ISO 3966. Antes do processo de coleta de dados o túnel de vento opera por 5 minutos na velocidade de referência de 10 m/s, propiciando a estabilização do escoamento e evitando a influência das variações da temperatura no atrito mecânico dos rolamentos do anemômetro. A taxa de frequência de amostras de dados é de 1 Hz com no mínimo 30 amostras por cada velocidade de referência. O procedimento é realizado de forma escalonado de subida e descida num intervalo de 4 a 16 m/s. Antes da coleta de uma determinada velocidade de referência é mantido o intervalo de 1 minuto para estabilizar as condições do escoamento na seção de teste.

OBSERVAÇÕES

- ✓ A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição da velocidade multiplicada pelo fator de abrangência $k = 2$, que para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.
- ✓ O presente certificado de calibração é valido apenas para o instrumento de medição acima caracterizado, não sendo extensivo a quaisquer outros instrumentos de medição, ainda que similares
- ✓ Não esta autorizada a reprodução parcial deste certificado sem prévia autorização da Unimetro.
- ✓ O Laboratório de calibração Unimetro tem como referência para suas atividades a Norma NBR ISO/IEC 17025.

Responsável pela calibração:

Wilson Severino Silva dos Santos
Signatário Autorizado

UNIMETRO

Pag. 2 de 3

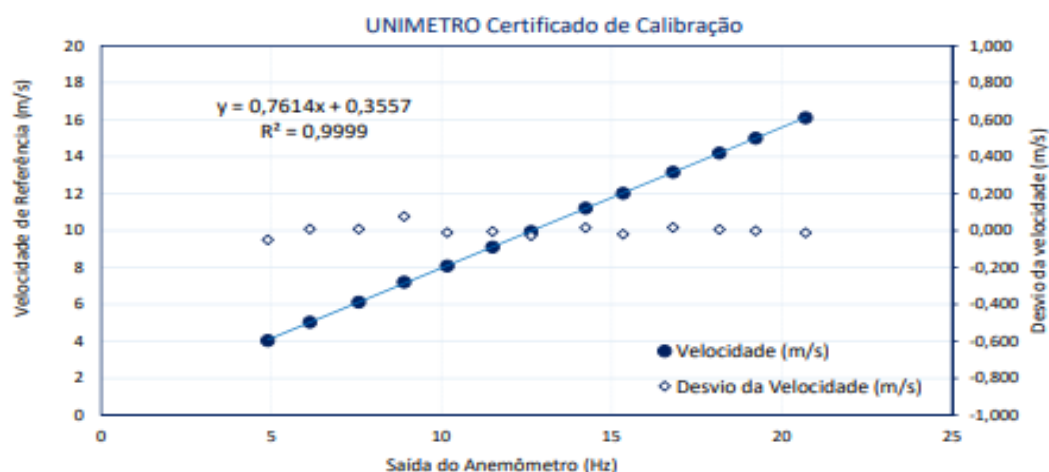
Rua Senador Carlos Teixeira de Carvalho, 661 - São Paulo - SP - Cep: 01535-010
Tel: 55 (11) 3275-0444 | 2922-4571 | WhatsApp (11) 93242-3785 - 99832-5678
E-mail: laboratorio@unimetro.com.br | Site: www.unimetro.com.br



CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO

Velocidade de Referência (m/s)	Saída do Anemômetro Frequencia (Hz)	Desvio da Velocidade ΔV (m/s)	Incerteza Total Expandida (K=2) (m/s)
4,04	4,90	-0,051	0,12
5,03	6,13	0,008	0,09
6,12	7,57	0,007	0,09
7,21	8,90	0,077	0,09
8,09	10,17	-0,011	0,09
9,11	11,50	-0,005	0,10
9,95	12,63	-0,028	0,11
11,21	14,23	0,015	0,12
12,01	15,33	-0,021	0,12
13,16	16,80	0,017	0,14
14,19	18,17	0,006	0,14
15,00	19,23	-0,002	0,15
16,10	20,70	-0,013	0,17



RESULTADOS DA REGRESSÃO LINEAR

Coefficiente Angular	0,7614 (m/s)/Hz
Coefficiente Linear	0,3557 (m/s)
Coefficiente de Correlação	0,99997 [-]
Erro Padrão da Regressão	0,031 (m/s)
Desvio Padrão do Coef. Angular	0,00175 (m/s)/Hz
Desvio Padrão do Coef. Linear	0,024 (m/s)

Pag. 3 de 3

Fim

UNIMETRO

do Certificado

Rua Senador Carlos Teixeira de Carvalho, 661 - São Paulo - SP - Cep: 01535-010
 Tel: 55 (11) 3275-0444 | 2922-4571 | WhatsApp (11) 93242-3785 - 99832-5678
 E-mail: laboratorio@unimetro.com.br | Site: www.unimetro.com.br



Certificado de Calibração

Processo nº
12481

32689/2023

pág. 1/2

CONTRATANTE	
Empresa	UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JULIO DE MESQUITA FILHO
Endereço	VIA DE ACESSO PROFESSOR PAULO DONATO CASTELLANE S/N - JABOTICABAL - SP
Interessado	
Empresa	O MESMO
Endereço	O MESMO

IDENTIFICAÇÃO DO INSTRUMENTO			
Descrição:	PIRANÔMETRO	Nº Série:	14391
Fabricante:	KIPP & ZONEN	Patrimônio:	Não especificado
Modelo:	CM3	Identificação:	Não especificado

CALIBRAÇÃO			
Data da Calibração:	Data da emissão:	Proxima Calibração:	Local da Calibração:
20/06/2023	20/06/2023	Definido pelo cliente	Laboratório Unimetro

INSTRUMENTOS UTILIZADOS: Padrão(ões) Rastreável (eis) à ISO-CAL USA (Acreditada à American Association for Laboratory Accreditation - A2LA) e à Rede Brasileira de Calibração (RBC) do INMETRO.			
Descrição	Nº Certificado	Validade	Rastreabilidade
Piranometro	320308-128792	09/03/2024	ISO-CAL USA – ISO 17025 (A2LA Cert. No. 4099.01)
Multímetro	E22160/02	01/07/2023	RBC/INMETRO

*Sensibilidade do padrão 10,86 ± 0,13 µW/W/m²

PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO:
A calibração foi realizada conforme o procedimento interno PC-040 SENSOR DE RADIAÇÃO SOLAR

DESCRIÇÃO DA CALIBRAÇÃO: A Unimetro - W.S.S dos Santos Instrumentos de Medição, certifica que o instrumento mencionado neste documento, passou em nossos ensaios de calibração, e se encontra dentro das condições citadas neste documento. Para a realização dos ensaios foi utilizado um Medidor de Radiação Solar Secondary Standard em acordo com a ISO 9060 spectrally flat Class A calibrado como referência o qual foi posicionado ao lado do Piranômetro sob teste horizontalmente e com as marcas de azimute voltadas para uma mesma direção. A coleta e tratamento de dados foram realizados conforme o método "Indoor" type A1 descrito nas normas de referência citadas neste certificado. Para a realização dos ensaios foi utilizada Câmara de Simulação Solar Pat. 27701.

NORMA DE REFERÊNCIA:

ISO 9847:2023 Solar energy - Calibration of field pyranometers by comparison to a reference pyranometer, International Organization for Standardization

UNIMETRO - W.S.S Dos Santos Instrumentos de Medição
Rua Senador Carlos Teófilo de Carvalho, 661 - Cambuci - São Paulo - SP - Cep 01515-010
Tel. (11) 3273-0444 - (11) 2922-4571 / WhatsApp (11) 93242 3783 / E-mail: laboratorio@unimetro.com.br



Certificado de Calibração

Processo nº
12481

pág. 2/2

CONDIÇÕES DURANTE O ENSAIO

Posição (ângulo de inclinação das medidas):	0° (± 0,5)	Tempo de estabilização da câmara de simulação Solar : 2 minutos
Temperatura da Câmara de simulação solar:	27,1 °C (± 2)	
Umidade da Câmara:	61,8 % U.R (± 2)	

CONDIÇÕES AMBIENTAIS

TEMPERATURA (± 2°C)	20	UMIDADE (± 2%u.r.)	61,8	PRESSÃO (± 5mBar)	933,8
---------------------	----	--------------------	------	-------------------	-------

RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO

Medição	Padrão de Referência	Padrão de Referência	Piranômetro em Calibração	Fator de calibração	Sensibilidade
n	Output mV	(W/m ²)	Output mV	W.m ⁻² /µV	µV/W.m ⁻²
1	5,81	534,9	11,45	0,046702069	21,41
2	5,82	535,6	11,45	0,046759999	21,39
3	5,82	535,8	11,44	0,046814113	21,36
4	5,82	535,5	11,44	0,046823948	21,36
5	5,82	535,9	11,42	0,046925771	21,31
6	5,75	529,2	11,31	0,04677341	21,38
7	5,76	530,6	11,33	0,046820946	21,36
8	5,76	530,2	11,34	0,046758414	21,39
9	5,77	531,1	11,33	0,046860332	21,34
10	5,76	530,2	11,33	0,046804647	21,37

Média Piranometro em calibração (mV)	11,39	Desvio Padrão (mV)	0,06
Média Fator de Calibração (W.m ⁻² /µV) (F)	0,046804455	Desvio Padrão (F)	0,00
Média Sensibilidade (µV/W.m ⁻²) (S)	21,37	Desvio Padrão (S)	0,03

O ensaio foi realizado utilizando o simulador de luz solar configurado a:	534,37 W/m ²
---	-------------------------

INCERTEZA DE MEDIÇÃO

Incerteza Expandida (U)	1,29%	k= 2
--------------------------------	--------------	------

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência (k=2) o qual para uma distribuição t com 96 graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02

O presente certificado de calibração é válido apenas para o instrumento de medição acima caracterizado, não sendo extensivo a quaisquer outros instrumentos de medição, ainda que similares.

O Laboratório de calibração Unimetro tem como referência para suas atividades a Norma NBR ISO/IEC 17025: 2017.

Fernanda Vitta
Técnico Executante


Wilson Santos
Responsável pelo Laboratório

fim do certificado

UNIMETRO - W.S.S Dos Santos Instrumentos de Medição
Rua Senador Carlos Teófilo de Carvalho, 561 - Cambuci - São Paulo - SP - Cep 01535-010
Tel. (11) 3275-0444 - (11) 3922-4571 / WhatsApp (11) 93242-3785 / E-mail: laboratorio@unimetro.com.br