



ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS METEOROLÓGICOS DE BAIXO CUSTO PARA A ESTIMATIVA DE VALORES LOCAIS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO

PERFORMANCE ANALYSIS OF A LOW-COST METEOROLOGICAL DATA ACQUISITION SYSTEM FOR ESTIMATING LOCAL EVAPOTRANSPIRATION VALUES

DOI: 10.5281/zenodo.20263445



*Isabela Alves de Almeida*¹

*José Rafael Franco*²

*Matheus Rodrigues Raniero*³

*Takechi Koizume Filho*⁴

*Carlos Gabriel dos Santos Modesto*⁵

*Isaque Miyabara Agostinho*⁶

*Enzo Dal Pai*⁷

1 Graduando Agronomia - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Botucatu – SP, Brasil. E-mail: isaalves2112@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2491-5109>.

2 Doutor em Engenharia Agrícola - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Botucatu - SP, Brasil. E-mail: jose.rafael@unesp.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7129-4304>

3 Doutor em Engenharia Agrícola - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Botucatu - SP, Brasil. E-mail: matheus.raniero@hotmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8338-488>.

4 Mestrando em engenharia Agrícola, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Botucatu - SP, Brasil. E-mail: takechi.koizume@unesp.br. ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-7740-1907>.

5 Mestrando em engenharia Agrícola, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Botucatu - SP, Brasil. E-mail: carlos.modesto@unesp.br. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-3039-4397>

6 Doutorando em engenharia Agrícola, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Botucatu - SP, Brasil. E-mail: im.agostinho@unesp.br. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-8267-531X>

7 Doutor em Engenharia Agrícola - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Botucatu - SP, Brasil. E-mail: enzo-dal.pai@unesp.br. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0570-8644>

Revista *OWL Journal*, Campina Grande - PB, v.4 n.5 (2026) - ISSN 2965-2634

A Revista *OWL Journal* está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição (CC BY)





RESUMO

Este estudo teve como objetivo desenvolver e avaliar o desempenho de um sistema de aquisição de dados meteorológicos de baixo custo, utilizando a plataforma Arduino, para estimativa local da evapotranspiração de referência (ET_o). O protótipo foi equipado com sensor DHT22 para medição de temperatura e umidade relativa, módulo RTC para registro temporal e cartão SD para armazenamento dos dados, com custo total de R\$ 68,53. As medições, realizadas entre 18/06/2024 e 05/12/2024 em Botucatu-SP, foram comparadas a dados obtidos por sensores profissionais da estação meteorológica Lageado. A ET_o foi estimada pelos métodos de Camargo (1971) e Hargreaves & Samani (1985) e comparada ao método padrão FAO Penman-Monteith. Os indicadores estatísticos demonstraram alta correlação entre os dados do protótipo e os de referência (R^2 entre 0,960 e 0,990), com menor erro para o modelo de Camargo (RMSE = 0,091; rRMSE = 2,997%). Apesar de pequenas discrepâncias atribuídas à menor precisão do sensor DHT22, o sistema mostrou-se eficiente e confiável para monitoramento climático e estimativa de ET_o, representando uma alternativa viável e acessível para agricultores, instituições de ensino e regiões com infraestrutura meteorológica limitada.

Palavras-chave: Arduino, sensores de baixo custo, evapotranspiração de referência, monitoramento climático, agricultura de precisão.

ABSTRACT

This study aimed to develop and evaluate the performance of a low-cost meteorological data acquisition system, using the Arduino platform, for local estimation of reference evapotranspiration (ET_o). The prototype was equipped with a DHT22 sensor for air temperature and relative humidity measurements, an RTC module for time recording, and an SD card for data storage, with a total cost of R\$ 68.53. Measurements, carried out between June 18 and December 5, 2024, in Botucatu-SP, were compared with data obtained from professional sensors at the Lageado weather station. ET_o was estimated using the Camargo (1971) and Hargreaves & Samani (1985) methods and compared to the FAO Penman-Monteith standard method. Statistical indicators showed a high correlation between the prototype and reference data (R^2 ranging from 0.960 to 0.990), with lower error for the Camargo model (RMSE = 0.091; rRMSE = 2.997%). Despite minor discrepancies attributed to the lower precision of the DHT22 sensor, the system proved efficient and reliable for climate monitoring and ET_o estimation, representing a viable and affordable alternative for farmers, educational institutions, and regions with limited meteorological infrastructure.

Keywords: Arduino, low-cost sensors, reference evapotranspiration, climate monitoring, precision agriculture.

1. INTRODUÇÃO

A evapotranspiração é um elemento climático importante para a agricultura. Conhecer seus valores permite o planejamento e o manejo adequados dos recursos hídricos, como





irrigações, datas de plantio e colheita, controle de enchentes, construção de barragens, manejo integrado de pragas, produção de bioenergia, entre outros (CARVALHO *et al.*, 2020; XIANG *et al.*, 2020).

A obtenção de valores de evapotranspiração é realizada por métodos diretos e indiretos. Os métodos diretos consistem no uso de lisímetros, dispositivos que medem diretamente a evapotranspiração. Já os métodos indiretos baseiam-se no uso de equações empíricas, nas quais variáveis de entrada (elementos meteorológicos diversos, como temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento, radiação solar, saldo de radiação, entre outros) são utilizadas para o cálculo da evapotranspiração (AMARAL *et al.*, 2018; CARVALHO *et al.*, 2020).

Os lisímetros são instrumentos precisos para medir a evapotranspiração, porém seu uso em campo é limitado pelo alto custo, pela complexidade operacional e pela necessidade de condições controladas, o que restringe sua aplicação fora de centros de pesquisa. Diante dessas limitações, os métodos empíricos têm sido amplamente adotados, especialmente em regiões com escassez de dados ou infraestrutura. No entanto, sua confiabilidade depende da adaptação às condições climáticas locais, sendo comum a necessidade de ajustes regionais para garantir resultados consistentes, sobretudo quando comparados ao modelo de referência FAO Penman-Monteith (SANTOS *et al.*, 2022; SOBRAL, 2024; ROSA *et al.*, 2023).

Dados meteorológicos estão disponíveis no território brasileiro, sendo fornecidos principalmente pelo INMET – Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2023). No entanto, esses dados são oriundos de estações meteorológicas de superfície. As informações geradas por uma estação possuem validade restrita às suas áreas adjacentes. Localidades desprovidas de estações utilizam ferramentas geoestatísticas (geralmente mapas) para a estimativa desses valores (LUNDGREN *et al.*, 2017). Embora válidas, essas ferramentas também estão sujeitas a erros, os quais acabam sendo incorporados à estimativa final da evapotranspiração.

A instalação de uma estação meteorológica no local configura-se como uma solução para este problema, permitindo a obtenção precisa de dados meteorológicos. Embora seja a





solução ideal, nem sempre se mostra viável. O custo de uma estação meteorológica tende a tornar essa alternativa restritiva para a maioria dos agricultores brasileiros (AMARAL *et al.*, 2018; BRETTAS *et al.*, 2019).

Aplicações agrícolas de baixo custo têm se destacado por promover a eficiência no uso de recursos tecnológicos. Plataformas acessíveis, como o Arduino, ganham espaço no campo por serem econômicas, fáceis de usar e de código aberto, facilitando a automação. Sensores de baixo custo integrados a essas plataformas possibilitam o monitoramento ambiental em tempo real, tornando mais acessível o uso de tecnologias que antes eram restritas por custos mais elevados. Assim, as tecnologias acessíveis não apenas democratizam a automação, como também tornam possíveis práticas agrícolas mais sustentáveis e eficientes em diferentes contextos produtivos (Carvalho *et al.*, 2023; Coelho *et al.*, 2020; Gaspar, 2023).

Diante desse problema, o objetivo deste trabalho é desenvolver um dispositivo de aquisição de dados meteorológicos de baixo custo, capaz de fornecer estimativas locais de evapotranspiração com maior precisão. O dispositivo será desenvolvido utilizando a plataforma Arduino, realizando medições diretas de elementos meteorológicos no local e, a partir desses dados, estimando a evapotranspiração por meio de equações, como as de Camargo, Hargreaves-Samani e Penman-Monteith.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Localização e Clima

O dispositivo foi instalado no município de Botucatu, e os dados coletados para o cálculo da evapotranspiração são referentes a esse mesmo município. Botucatu possui aproximadamente 145 mil habitantes em uma área territorial de 1.482,642 km², com os biomas Cerrado e Mata Atlântica (IBGE, 2022).

A cidade de Botucatu está localizada próxima a duas grandes represas (Barra Bonita e Jurumirim) e distante aproximadamente 221 km do Oceano Atlântico (ROSSI *et al.*, 2018).



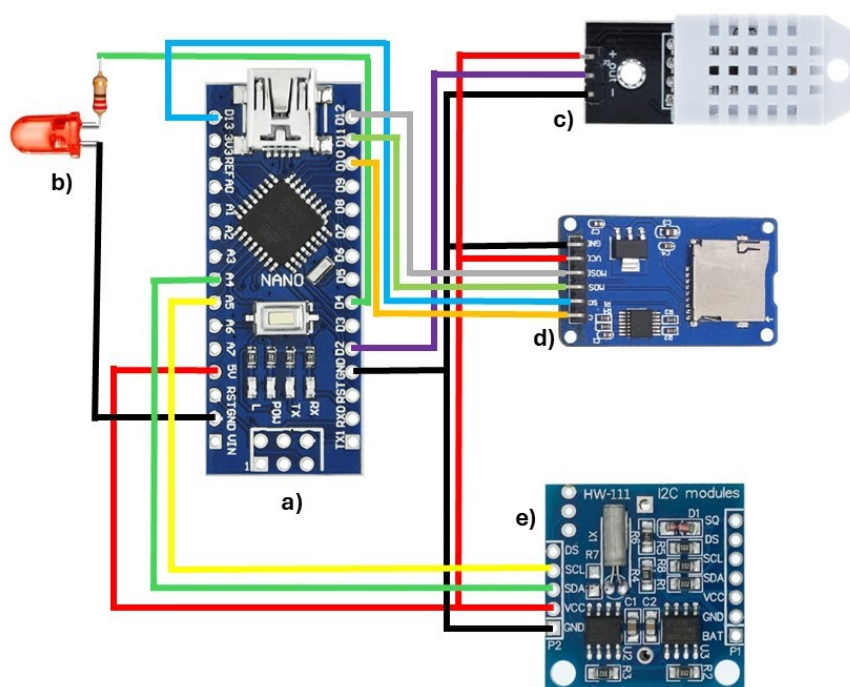


O clima atual de Botucatu pode ser classificado como “Aw”, segundo o método de Köppen. Os meses mais quentes são registrados no verão, com temperatura máxima média de 23,80 °C em fevereiro, umidade relativa máxima de 75,76% e precipitação máxima de 310,37 mm, ambas em janeiro. As temperaturas mais baixas ocorrem no inverno, com temperatura média de 18,28 °C em julho, umidade relativa mínima de 61,86% e precipitação mínima de 38,76 mm em agosto. (Franco *et al.*, 2023).

2.2 Componentes eletrônicos

Para a construção do dispositivo de medição, foram utilizados os seguintes componentes eletrônicos: Arduino Nano, cartão SD, RTC e DHT22, com os elementos dispostos conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1. Diagrama dos componentes eletrônicos utilizados: (a) Arduino Nano, (b) LED, (c) sensor DHT22, (d) módulo SD e (e) módulo RTC.



Fonte: Autores (2025).



O Arduino Nano (Figura 1a) é uma placa de prototipagem composta por um microcontrolador ATmega328P, um conversor USB-UART e componentes de alimentação e temporização. Essa placa permite a conexão direta com a protoboard.

O DHT22 (Figura 1c) é um sensor que apresenta a funcionalidade de compor dois sensores em apenas um, sendo um deles para a medição da temperatura do ar e, o segundo, de umidade relativa. Esse sensor apresenta uma faixa de medição de temperatura entre -40 a 80° Celsius e da umidade relativa entre 0 e 100%; sendo a temperatura com uma faixa de precisão de 0,1° graus e a umidade com precisão de 0,1%.

No sistema, este dispositivo foi utilizado para a aquisição de dados de temperatura e umidade relativa, sendo ambos utilizados no cálculo da estimativa da evapotranspiração.

O Real Time Clock (RTC) (Figura 1e) é um dispositivo utilizado para o controle e a manutenção precisa do horário. Ele foi utilizado com o intuito de registrar a data e a hora das medições realizadas pelos sensores, garantindo a precisão e a integridade dos dados coletados.

O Secure Digital Card (SD Card) é um tipo de cartão de memória amplamente utilizado para o armazenamento de dados em dispositivos portáteis, como câmeras digitais, computadores e videogames. Em sistemas embarcados, utiliza-se um módulo adaptador de cartão SD (Figura 1d) para conectar o cartão à plataforma de desenvolvimento, como o Arduino.

Nesse contexto, a função do cartão SD no sistema de aquisição de dados meteorológicos era armazenar os dados climáticos coletados pelos sensores. Para indicar que os dados foram salvos corretamente, um LED (Figura 1b) piscava no momento do registro.

2.3 Estação meteorológica Lageado

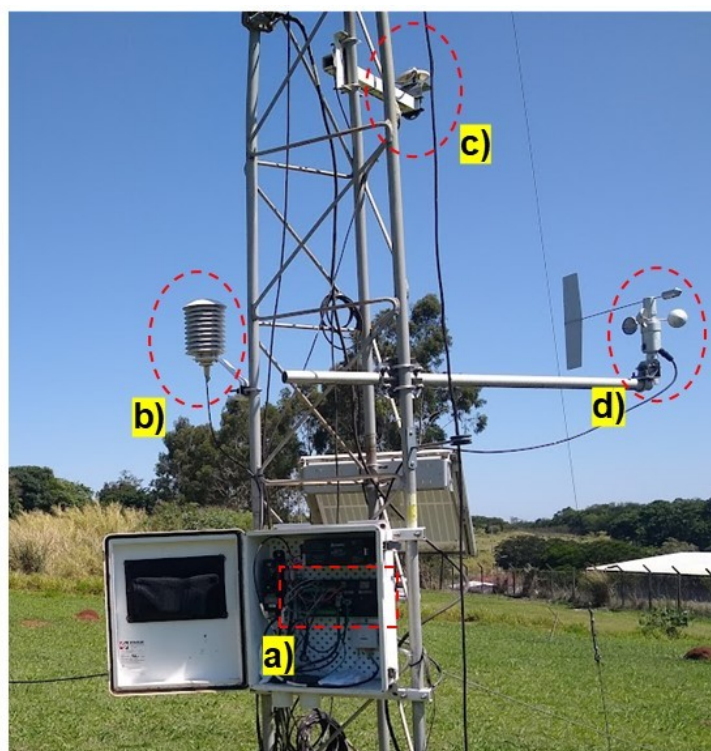
Como parâmetros de referência, utilizaram-se os instrumentos da estação meteorológica Lageado, cujos dados foram registrados simultaneamente às medições do Arduino. Esses dados foram coletados por um registrador (*datalogger*) da *Campbell*





Scientific, modelo CR1000 (Figura 2a). A temperatura e a umidade relativa média do ar (Figura 2b) foram mensuradas por um termohigrômetro da *Campbell Scientific*, modelo HC2S3. A irradiação solar de onda curta foi medida por um piranômetro (Figura 2c) da *Kipp & Zonen*, modelo CMP3. A velocidade do vento a 2 metros (Figura 2d) foi registrada por um anemômetro da *Campbell Scientific*, modelo *Met One 034B Windset*.

Figura 2. Sensores utilizados na estação meteorológica de referência: (a) CR1000, (b) HC2S3, (c) CMP3 e (d) anemômetro 034B



Fonte: Autores (2025).

2.4 Cálculo da evapotranspiração

No estudo, foram utilizados os modelos Camargo (1971) e Hargreaves & Samani (1985) para a estimativa da evapotranspiração. Os dois modelos foram escolhidos por utilizarem apenas a temperatura do ar medida.

Camargo (1971) simplificou a equação de Thornthwaite para a seguinte fórmula:

Revista *OWL Journal*, Campina Grande - PB, v.4 n.5 (2026) - ISSN 2965-2634

A Revista *OWL Journal* está licenciada com uma Licença Creative Commons Atribuição (CC BY)





$$ETo = 0,01 * Qo * T * ND \quad (1)$$

Em que: Qo é a irradiância solar no topo da atmosfera; T , a temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$); e ND , o número de dias, ambos referentes ao período considerado. Essa fórmula facilita a estimativa de ETP, pois não há necessidade de se conhecer a temperatura média anual (normal).

Hargreaves & Samani (1985) desenvolveram um modelo de estimativa da evapotranspiração para condições semiáridas, seguindo a equação:

$$ETo = 0,0023 * Qo * (Tmax - Tmin) 0,5 * (Tmed + 17,8) \quad (2)$$

Em que: Qo é a irradiância solar no topo da atmosfera; $Tmax$, a temperatura máxima do ar ($^{\circ}\text{C}$); $Tmin$, a temperatura mínima do ar ($^{\circ}\text{C}$); e $Tmed$, a temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$), no período considerado.

Os dois métodos também foram comparados com o método de Penman-Monteith (padrão FAO/1991).

2.5 Indicativos estatísticos

Para os indicadores estatísticos MBE (Eq. 3) e RMSE (Eq. 5), valores próximos de zero são desejáveis. Já os valores relativos de rMBE (Eq. 4) e rRMSE (Eq. 6) fornecem o grau de correspondência percentual proporcional à média das observações, permitindo explicar a variabilidade dos dados observados.





As equações utilizadas foram:

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^n (Y'_i - Y_i)}{n} \quad (3)$$

$$rMBE (\%) = \frac{MBE}{\bar{Y}} \times 100 \quad (4)$$

$$RMSE = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y'_i - Y_i)^2}{n} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$rRMSE (\%) = \frac{RMSE}{\bar{Y}} \times 100 \quad (6)$$

Para aplicação dessas métricas, foram comparados dados registrados pelo Arduino com dados mensurados pela estação meteorológica, sendo Y as medidas de referência da estação, Y' os dados registrados pelo Arduino, n é o número de observações, $\bar{Y}$ a média das medidas de referência e $\bar{Y}'$ a média dos dados do Arduino (Raniero *et al.*, 2020; Rincón *et al.*, 2018).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para que fosse possível realizar o experimento, foi necessária a construção do dispositivo de baixo custo para aquisição de dados meteorológicos. A construção do dispositivo foi feita em algumas etapas, sendo necessária a aquisição de determinados componentes individuais para que, em conjunto, fosse possível o funcionamento do dispositivo e, assim, determinar sua eficiência.





Figura 3. Etapas do desenvolvimento do estudo.



Fonte: Autores (2025).

Para o desenvolvimento do estudo, foram adotadas etapas metodológicas sequenciais, ilustradas no fluxograma da Figura 3: (1) montagem do protótipo, utilizando componentes eletrônicos de baixo custo para formar um sistema de aquisição de dados meteorológicos; (2) coleta de dados de temperatura e umidade relativa do ar em campo; (3) cálculo da evapotranspiração de referência (ETo) por meio dos modelos de Camargo (1971) e Hargreaves-Samani (1985); (4) aplicação de indicadores estatísticos (R, R^2 , MBE, rMBE, RMSE, rRMSE) para avaliar a performance e a precisão das estimativas geradas pelo protótipo em comparação com os dados de referência; e (5) análise dos resultados, consolidando as métricas estatísticas para discutir a viabilidade e a acurácia do sistema de baixo custo.

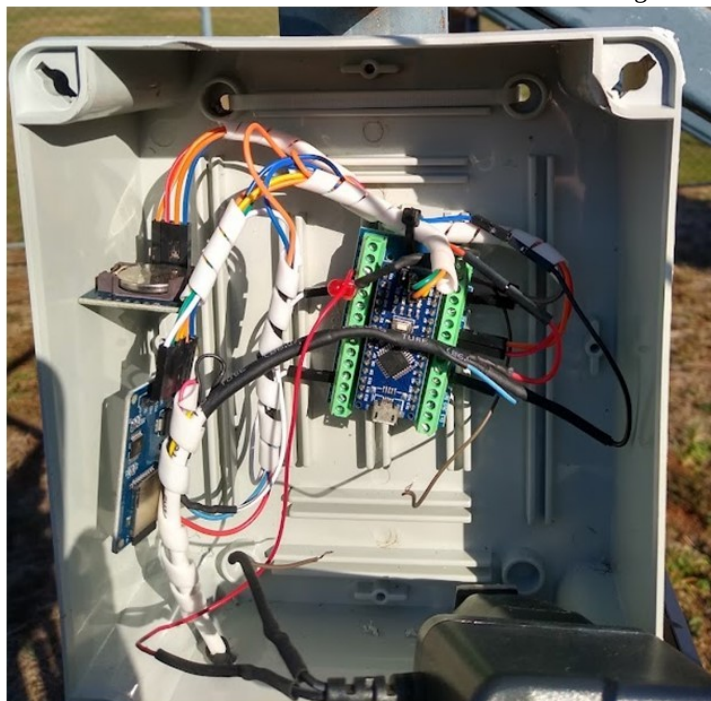
3.1 Montagem do protótipo

A Figura 4 exibe a montagem do protótipo. Um quadro elétrico (Figura 3a) foi utilizado para armazenar os componentes eletrônicos, de forma a protegê-los dos elementos climáticos e evitar sua degradação. Nessa mesma figura, observa-se o abrigo meteorológico em que foi instalado o sensor de temperatura e umidade do ar.

Conforme mostrado na Figura 4b, o abrigo meteorológico foi instalado a 1,5 metros de altura do chão e em área aberta, seguindo as recomendações da Organização Mundial de Meteorologia (OMM).



Figura 4. Montagem do protótipo: (a) quadro elétrico com os componentes eletrônicos, (b) abrigo meteorológico.



a)



b)

Fonte: Autores (2025).

3.2 Custo da montagem do protótipo

O custo estimado para a montagem do protótipo (Tabela 1), foi de R\$ 68,53. Esse valor foi calculado com base em preços pesquisados em maio de 2025 na plataforma *Aliexpress*, considerando todos os componentes eletrônicos essenciais para o funcionamento do sistema, como o Arduino Nano, sensor DHT22, RTC e demais módulos auxiliares. Em comparação com estações meteorológicas comerciais automatizadas, cujo custo pode ultrapassar milhares de reais (AMARAL et al., 2018; BRETTAS et al., 2019), o sistema desenvolvido destaca-se por seu baixo custo. Essa característica torna o protótipo acessível para agricultores, pesquisadores e instituições de ensino, especialmente em regiões com



limitações de infraestrutura meteorológica, ampliando as possibilidades de monitoramento ambiental de forma viável e econômica.

Tabela 1 – Custo estimado dos componentes utilizados na montagem do protótipo.

Componente	Valor
Arduino Nano	R\$17,69
DHT22	R\$11,59
RTC	R\$: 9,69
Módulo SD Card	R\$: 4,68
Shield	R\$: 9,90
LED	R\$: 5,60
Cartão SD	R\$: 9,38
Total	R\$: 68,53

Fonte: aliexpress, 2025.

3.3 Filtragem dos dados

Os dados foram registrados do dia 18/06/2024 a 05/12/2024. Considerando a ocorrência de dias com falha na coleta de dados no total foram coletados dados de 138 dias.

3.4 Comparações de dados de temperatura

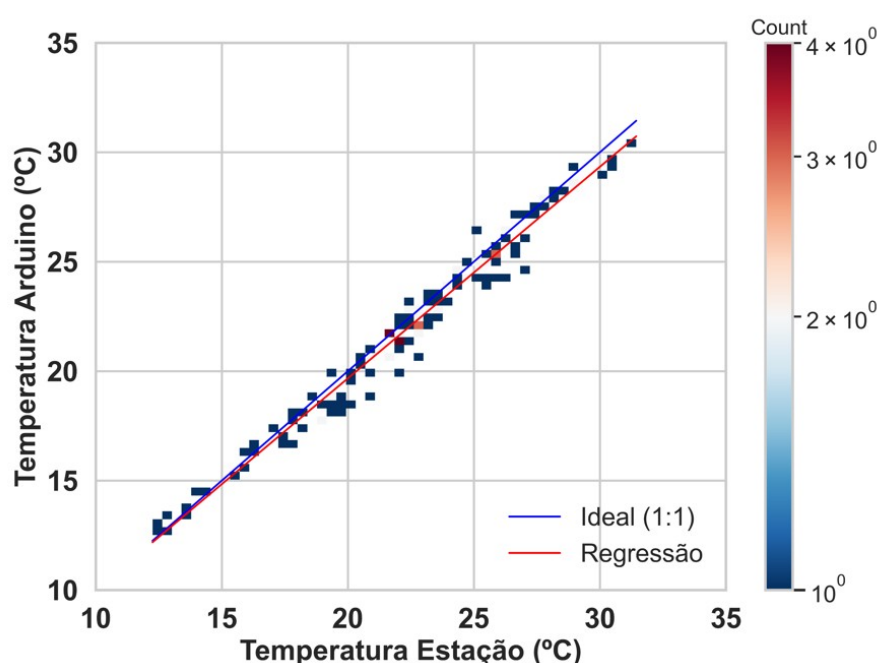
A Figura 5 apresenta a comparação entre os valores de temperatura diária medidos pelo sensor DHT22, integrado ao dispositivo de baixo custo com Arduino, e o sensor HC2S3, utilizado na estação meteorológica de referência Lageado. Observa-se que os dois conjuntos de dados apresentam comportamento similar ao longo do período analisado, refletindo a mesma tendência sazonal e variações diárias. No entanto, é possível notar pequenas discrepâncias pontuais entre as curvas, especialmente nos dias de temperatura mais elevada. Essas variações podem estar relacionadas à diferença na classe de precisão dos sensores: enquanto o HC2S3 é um sensor profissional, com alta estabilidade e baixa margem de erro, o DHT22, embora adequado para aplicações didáticas e experimentais, apresenta menor





sensibilidade térmica e pode sofrer interferência em condições de alta umidade ou calor extremo. Ainda assim, o desempenho geral do sensor DHT22 foi considerado satisfatório, sugerindo que o sistema desenvolvido é capaz de fornecer dados confiáveis de temperatura para aplicações práticas na agricultura, especialmente quando há ausência de estações meteorológicas comerciais.

Figura 5. Comparação da temperatura diária medida pelo sensor HC2S3 e DHT22



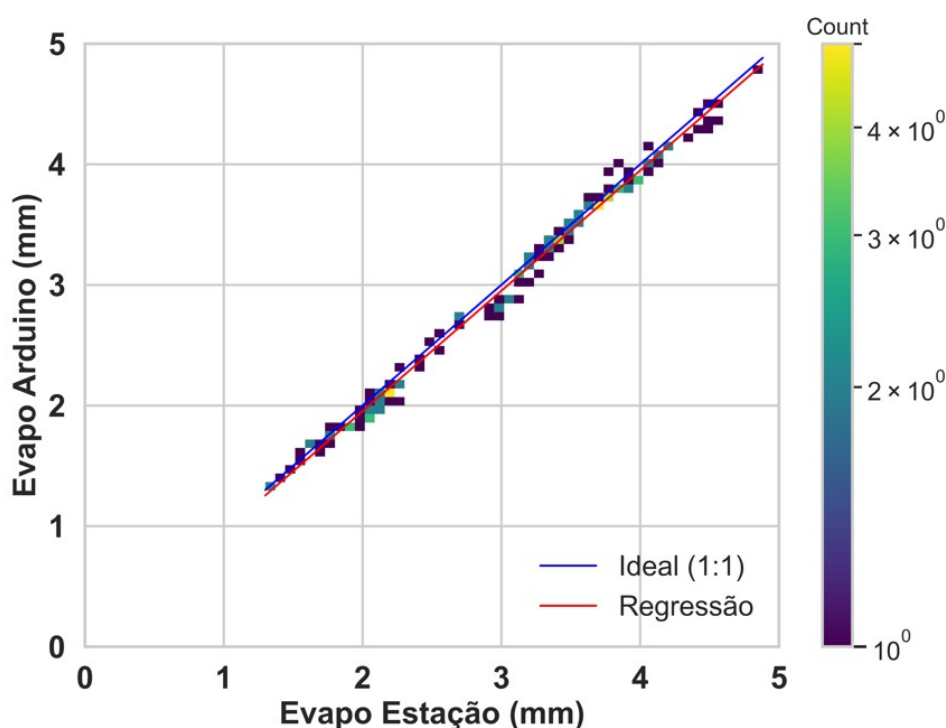
Fonte: Autores (2025).

A Figura 6 mostra a comparação entre os valores diários de evapotranspiração estimados pelo modelo de Camargo (1971), utilizando dados de temperatura média obtidos pelos sensores HC2S3 (estação de referência) e DHT22 (protótipo de baixo custo). De modo geral, observa-se uma boa correspondência entre as duas estimativas, com comportamento similar das curvas ao longo do período analisado. A convergência entre os dados indica que, mesmo com as limitações técnicas do DHT22, os valores de temperatura registrados foram suficientemente precisos para alimentar o modelo de Camargo com resultados próximos aos obtidos a partir do sensor profissional. Pequenas divergências são visíveis em dias com



temperaturas mais extremas, o que pode ser atribuído à menor resolução e estabilidade do DHT22 frente a condições ambientais adversas. Ainda assim, os resultados reforçam o potencial do sistema de baixo custo como uma alternativa viável para a estimativa local da evapotranspiração, especialmente em contextos rurais com recursos limitados.

Figura 6. Comparação da evapotranspiração diária calculada pelo método de Camargo com temperatura registrada pelo sensor HC2S3 e DHT22



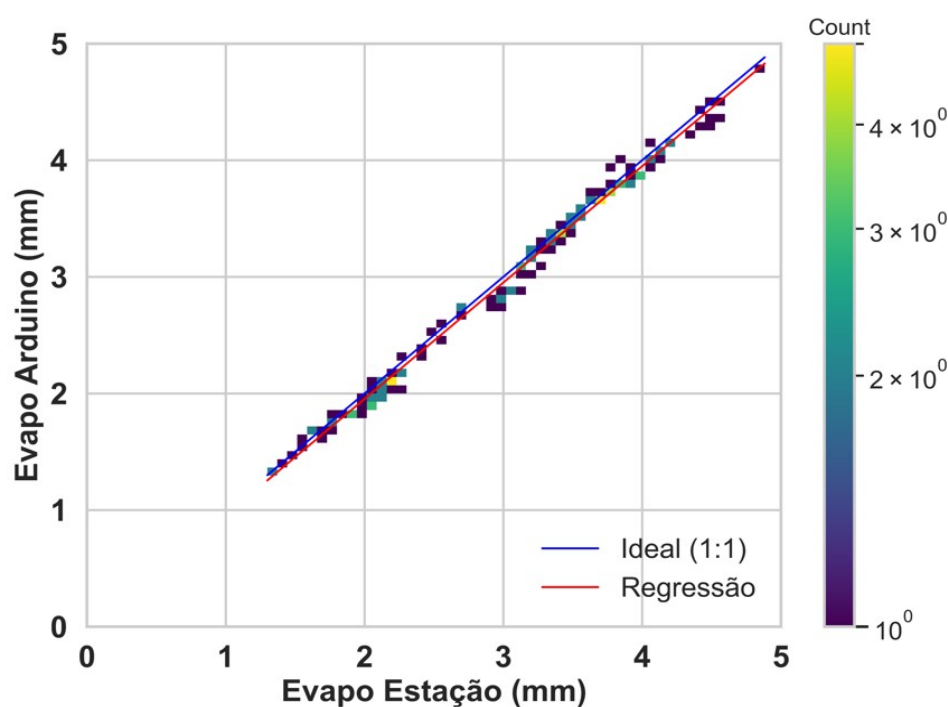
Fonte: Autores (2025).

A Figura 7 apresenta a comparação dos valores de evapotranspiração diária estimados pelo método de Hargreaves & Samani (1985), com base nas temperaturas máxima, mínima e média registradas pelos sensores HC2S3 (profissional) e DHT22 (baixo custo). Assim como observado na Figura 5, os dados estimados a partir do sensor DHT22 acompanharam de forma satisfatória a tendência das estimativas geradas com dados do HC2S3, evidenciando uma boa concordância entre os dois conjuntos de resultados. Destaca-se que o modelo de Hargreaves & Samani é mais sensível à variação entre temperaturas máxima e mínima, o que pode



amplificar eventuais imprecisões nos dados fornecidos por sensores de menor qualidade. Ainda assim, o DHT22 foi capaz de fornecer entradas suficientemente consistentes para manter a coerência na estimativa da evapotranspiração. As pequenas discrepâncias observadas, especialmente nos picos, reforçam a importância de calibração e eventual correção dos sensores de baixo custo, mas não comprometem o potencial do sistema para uso em aplicações práticas no campo.

Figura 7. Comparação da evapotranspiração diária calculada pelo método de Hargreaves & Samani com temperatura registrada pelo sensor HC2S3 e DHT22



Fonte: Autores (2025).

3.5 Análise estatística

Os valores dos principais indicadores estatísticos, calculados a partir dos dados registrados pelo protótipo de baixo custo, com foco nas medições de temperatura e nas estimativas de evapotranspiração geradas pelos modelos de Camargo e Hargreaves & Samani, são apresentados na Tabela 2.

Revista *OWL Journal*, Campina Grande - PB, v.4 n.5 (2026) - ISSN 2965-2634

A Revista *OWL Journal* está licenciada com uma **Licença Creative Commons Atribuição (CC BY)**



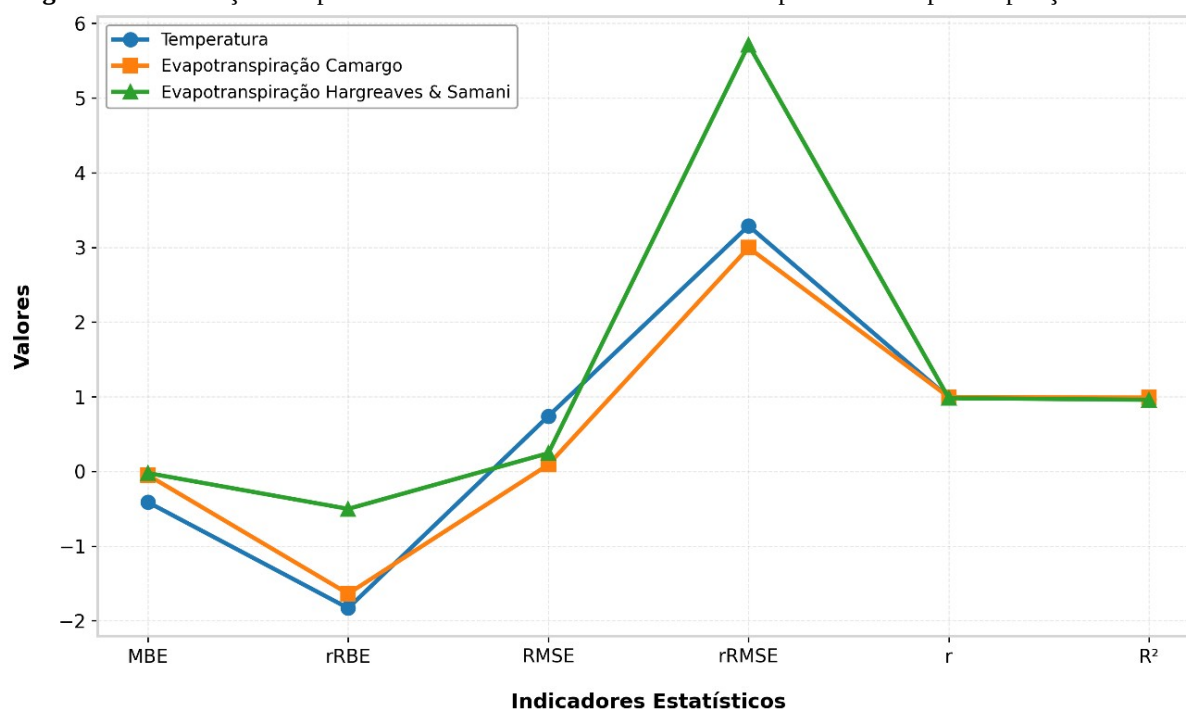


Tabela 2 – Indicadores estatísticos de temperatura e evapotranspiração estimada comparados à estação de referência.

indicadores	Temperatura	Evapotranspiração (Camargo)	Evapotranspiração (Hargreaves & Samani)
MBE	-0,412	-0,050	-0,022
rRBE	-1,830	-1,637	-0,501
RMSE	0,741	0,091	0,245
rRMSE	3,289	2,997	5,714
r	0,989	0,996	0,982
R²	0,967	0,990	0,960

Para melhor visualização e comparação desses resultados, a Figura 8 apresenta os mesmos indicadores de forma gráfica, destacando as diferenças de desempenho entre os sensores e os modelos de evapotranspiração avaliados.

Figura 8. Visualização comparativa dos indicadores estatísticos de temperatura e evapotranspiração estimada.



Fonte: Autores (2025).



A análise dos indicadores demonstra que, para as medições de temperatura, o sensor de baixo custo (DHT22) demonstrou boa acurácia em comparação ao sensor de referência (HC2S3), com rRMSE de 3,289% e R^2 de 0,967, indicando uma boa correspondência entre suas leituras. Em relação à evapotranspiração, o modelo Camargo obteve desempenho superior, apresentando menores erros (RMSE = 0,091; rRMSE = 2,997%) e maior capacidade explicativa e de correlação ($r = 0,996$; $R^2 = 0,990$), ou seja, uma melhor correspondência e menor divergência entre os valores estimados pelo protótipo e os medidos pela estação de referência. Por outro lado, o modelo Hargreaves-Samani, apesar do menor viés médio (MBE = -0,022; rRBE = -0,501), o que representa uma menor tendência de superestimar ou subestimar os dados de referência, indicou maior dispersão (rRMSE = 5,714%) e menor ajuste ($r = 0,982$; $R^2 = 0,960$) às medidas de referência, sugerindo maior variação entre as estimativas e os dados observados, possivelmente devido à menor sensibilidade do modelo às condições locais de clima e temperatura.

3.6 Comparação de resultado obtidos por outros autores e períodos de dados analisados

Os resultados obtidos neste estudo em Botucatu, com coeficientes de determinação (R^2) entre 0,960 e 0,990 para os modelos de Camargo e Hargreaves-Samani, estão de acordo com os dados reportados na literatura. Santos et al. (2022), analisando dados de janeiro de 2018 a dezembro de 2019 para o município de Nossa Senhora da Glória – SE, identificaram melhor ajuste do modelo de Hargreaves-Samani ($R^2 = 0,779$) em clima semiárido, enquanto o modelo de Camargo apresentou desempenho inferior ($R^2 = 0,6627$). Por sua vez, Rosa et al. (2023), avaliando o Triângulo Mineiro Sul com dados diários entre 1996 e 2020, verificaram maior precisão do modelo de Camargo ($R^2 = 83,4\%$) em regiões de clima tropical úmido, evidenciando que o desempenho desses modelos depende diretamente das condições locais e dos períodos analisados.





Quanto aos sistemas de aquisição de dados meteorológicos, os resultados deste trabalho, referentes ao período de 18 de junho de 2024 a 5 de dezembro do mesmo ano, em Botucatu, são reforçados por Coelho et al. (2020), Carvalho et al. (2023) e Gaspar (2023), que relataram desempenhos satisfatórios e correlações significativas entre sensores de baixo custo e sensores de estações meteorológicas profissionais, reconhecidas por sua maior precisão e uso em medições de referência. Dessa forma, confirma-se que protótipos baseados em Arduino para coleta de dados meteorológicos, quando ajustados às condições regionais, representam uma alternativa eficiente e acessível para estimativas locais de evapotranspiração, especialmente em regiões com infraestrutura limitada.

4. CONCLUSÃO

O sistema de aquisição de dados meteorológicos desenvolvido com a plataforma Arduino demonstrou ser uma alternativa viável e funcional para estimativas locais de evapotranspiração em áreas com limitação de infraestrutura meteorológica. Com custo significativamente reduzido em comparação às estações comerciais, o protótipo apresentou boa estabilidade operacional, registrando com consistência dados de temperatura e umidade relativa ao longo do período avaliado. As comparações realizadas com sensores profissionais da estação Lageado indicaram que os dados obtidos pelo sensor DHT22 foram capazes de alimentar os modelos de Camargo (1971) e Hargreaves & Samani (1985) com resultados próximos aos de referência, evidenciando a confiabilidade do dispositivo para aplicações práticas. Pequenas discrepâncias observadas podem ser atribuídas às limitações técnicas do sensor, mas não comprometem o desempenho geral do sistema. Portanto, o uso de dispositivos de baixo custo representa uma alternativa promissora para agricultores, estudantes e instituições que buscam monitoramento ambiental eficiente e acessível, especialmente em regiões carentes de dados meteorológicos de alta resolução.





5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Faculdade de Ciências Agrônômicas (UNESP) de Botucatu (SP) - Brasil.

REFERÊNCIAS

ALLEN, Richard G. *et al.* FAO Irrigation and drainage paper No. 56. Rome: **Food and Agriculture Organization of the United Nations**, v. 56, n. 97, p. e156, 1998.

AMARAL, Alisson Macendo *et al.* Construção e calibração de lisímetros de pesagem em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 12, n. 4, p. 2740-2748, 2018.

BRETTAS, P. K. M.; GUIMARÃES, E. C.; NASCIMENTO, M. R. B. M. Dados de estação meteorológica oficial subestimam o estresse por calor em bovinos leiteiros criados em ambiente tropical. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 71, p. 967-976, 2019.

CARVALHO, R. C. de; MOTA, F. D.; GABRIEL FILHO, L. R. A.; KLAR, A. E.; GRASSI FILHO, H. Lisímetro para medida da evapotranspiração na cultura do pimentão em sistema hidropônico com substrato¹. **IRRIGA**, v. 25, n. 2, p. 361–376. DOI: 10.15809/irriga.2020v25n2p361-376. 2020.

CARVALHO, A. A. O papel do arduino e sensores de baixo custo na agropecuária digital: avanços e perspectivas no Brasil. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Pós-graduação lato sensu em Recursos Hídricos para o Semiárido) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, Campus Salgueiro, Salgueiro, PE, 2023.

COELHO, Rigles Maia *et al.* Desenvolvimento e Análise do Desempenho de um Sistema Automatizado Baseado na Plataforma Arduino para Manejo da Irrigação. **Caderno de Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia**, v. 2, n. 1, p. 05-13, 2020.

FRANCO, J. R.; DAL PAI, E.; CALÇA, M. V. C.; RANIERO, M. R.; DAL PAI, A.; SARNIGHAUSEN, V. C. R.; ROMÁN, R. M. S. Atualização da normal climatológica e





classificação climática de Köppen para o município de Botucatu-SP. **IRRIGA**, n. 28, v. 1, p. 77–92.

GASPAR, P. F. N. Desenvolvimento de protótipo de aquisição de dados meteorológicos de baixo custo baseado em plataforma Arduino. 2023.

GEBLER, L., LEITE JUNIOR, M. J., RUFATO, A. D. R. Instrumentação com baixo custo e alta eficiência: o movimento "faça você mesmo" na fruticultura de precisão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE FRUTICULTURA, 27.; ENCONTRO NACIONAL SOBRE FRUTICULTURA DE CLIMA TEMPERADO, 17, 2022, Florianópolis, SC.

GORELICK, N. *et al.* Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. **Remote sensing of Environment**, v. 202, p. 18-27, 2017.

HARGREAVES, G.H.; SAMANI, Z.A. Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature. Chicago: American Society of Agricultural and Biological Engineers Meeteng, 1985.

IBGE. Brasil / São Paulo / Botucatu. Rio de Janeiro: IBGE, 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/botucatu/panorama>.

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia – www.inmet.gov.br. Acesso em Maio de 2023.

LUNDGREN, W. J. C.; SILVA, J. A. A.; FERREIRA, R. L. C. A precisão da estimativa do erro da krigagem pela validação cruzada. **Floresta e Ambiente**, v. 24, 2017.

PLATAFORMA ARDUINO – www.arduino.cc. Acesso em Maio de 2023.

RANIERO, M. R.; Calça, M. V. C., Fernando, D. M. Z.; Almeida, O. C. P.; Dal Pai, A. 2020. Software for automated reading of sunshine duration by Digital Image Processing. **IEEE Latin America Transactions**, Vol. 18, n. 9.

RINCÓN. A.; Jorba, O.; Frutos, M.; Alvarez, L.; Barrios, F. P.; Gonzáles, J. A. 2018. Bias correction of global irradiance modelled with weather and research forecasting model over Paraguay. **Solar Energy**, Vol. 170, pp. 201-211.





ROSA, G. B.; SILVA FUZZO, D. F.; FISCHER FILHO, J. A. Modelos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região sul do Triângulo Mineiro, Brasil. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 33, n. 19, p. 81–97, 2023. DOI: <https://doi.org/10.55761/abclima.v33i19.16965>.

ROSSI, T.J.; ESCOBEDO, J.F.; SANTOS, C.M.; ROSSI, L.R.; SILVA, M.B.P.; DAL PAI, E. Global, diffuse and direct solar radiation of the infrared spectrum in Botucatu/SP/Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Belfast, v. 82, Part 1, p. 448-459, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.030>.

SANTOS, R. B.; SANTOS, B. S.; SOUZA, R. T. de A.; RICARTE, T. L.; JÚNIOR, J. J. F. C. Estimativas da evapotranspiração de referência por equações empíricas para o município de Nossa Senhora da Glória – SE. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 8, n. 2, p. 147–155, 2022. DOI: <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2022v8n2ID30338>.

SILVA, A. C. M. *et al.* Estação meteorológica automática de baixo custo. **Multiverso: Revista Eletrônica do Campus Juiz de Fora - IF Sudeste MG**, v. 1, n. 1, p. 46-56, jan. 2016.

SILVA, R.B.; LEAL, L.S.; ALVES, L.S.; BRANDÃO, R.V.; ALVES, R.C.M.; KLERING, E.V.; PEZZI, R.P. Estações meteorológicas de código aberto: Um projeto de pesquisa e desenvolvimento tecnológico. **Porto Alegre: UFRGS**. 2014.

SOBRAL, A. H. S. Evapotranspiração e coeficientes de cultura do feijão-caupi BRS Inhumá, na microrregião de Teresina, PI. 2024. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2024. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/doc/1169969/1/EvapotranspiracaoCoeficienteSCulturaFeijaoCaupiBRSInhumadisetacaoAmandaSobral2024.pdf>. Acesso em: 8 jun. 2025.

STAWOWY, Marek *et al.* The Analysis and Modelling of the Quality of Information Acquired from Weather Station Sensors. **Remote Sensing**, v. 13, n. 4, p. 693, 2021.

STONE, R. J. Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models. **Solar Energy**, v. 51, n. 4, p. 289-291, 1993.





THORNTHWAITE, Charles Warren. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical review**, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948.

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. Disponível em: <<https://scientiaplena.emnuvens.com.br/sp/article/view/1742>>. 2015.

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION. Guide on the Global Observing and forecasting System. WMO-N.488, Geneva, 2008.

XIANG, k; LI, Y; HORTON, R.; FENG, H. Similarity and difference of potential evapotranspiration and reference crop evapotranspiration – a review, **Agricultural Water Management**, v. 232, ISSN 0378-3774, <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106043>.

Recebido em: 18/04/2026

Aprovado em: 03/05/2026

Publicado em: 17/05/2026

