UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Botucatu

FCA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS
UNESP | BOTUCATU

GIOVANA STUCCHI

VALIDAÇÃO DE MEDIDAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO COLETADAS POR MEIO DE UM LISÍMETRO DE LENÇOL FREÁTICO CONSTANTE

Botucatu - SP

2024

GIOVANA STUCCHI

VALIDAÇÃO DE MEDIDAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO COLETADAS POR MEIO DE UM LISÍMETRO DE LENÇOL FREÁTICO CONSTANTE

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Orientador(a): Profa. Dra. Valéria Cristina Rodrigues Sarnighausen

Botucatu - SP

2024

Stucchi, Giovana
S932v Validação de medidas de evapotranspiração coletadas por meio de um lisímetro de lençol freático constante / Giovana Stucchi. -- Botucatu, 2024
106 p. : il., tabs., fotos, mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu
Orientadora: Valéria Cristina Rodrigues Sarnighausen

1. Agrometeorologia. 2. Climatologia. 3. Manejo de Recursos Hídricos. 4. Lisimetria. 5. Irrigação. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Botucatu

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título:

VALIDAÇÃO DE MEDIDAS DE EVAPOTRANSPIRAÇÃO COLETADAS POR MEIO DE UM LISÍMETRO DE LENÇOL FREÁTICO CONSTANTE

AUTORA: GIOVANA STUCCHI

ORIENTADORA: VALERIA CRISTINA RODRIGUES SARNIGHAUSEN

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Engenharia Agrícola, pela Comissão Examinadora:

Prof.ª Dr.ª VALERIA CRISTINA RODRIGUES SARNIGHAUSEN (Participaçao Presencial)
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciencias Agronomicas de Botucatu UNESP

Pesquisador Dr. MARCUS VINÍCIUS CONTES CALÇA (Participaçao Presencial)
Tecnologia da Informação / Escola Senai Luiz Massa

Prof. Dr. SERGIO AUGUSTO RODRIGUES (Participaçao Presencial)
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciencias Agronomicas - Unesp

Botucatu, 01 de julho de 2024.

À Deus, aos meus pais, à minha avó, à minha tia e a todos aos meus amigos que me apoiam.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus que me permitiu chegar até aqui.

Aos meus pais que sempre me apoiaram e continuam ao meu lado em todos os momentos.

À minha tia e minha avó que me apoiam sempre.

À professora Dra. Valeria Cristina Rodrigues Sarnighausen, pela orientação, apoio, paciência e exemplo de professora.

Ao professor Dr. Leandro Grava de Godoy, que me acompanhou e orientou na graduação, me incentivou a iniciar as atividades na pós-graduação e me apoiou em seguir a área que eu tinha maior aptidão acreditando no meu potencial.

Aos professores Dr. Marcelo Vieira Ferraz, Dra. Kelly Botigeli Sevegnani, e especialmente ao Dr. Marcelo Domingos Chamma Lopes, que me orientaram em algum momento durante a graduação, tendo sido chaves para meu desenvolvimento profissional.

Aos professores Dr. Enzo Dal Pai, Dr. Eduardo Nardini Gomes, Dr. Sergio Augusto Rodrigues, Dr. Alexandre Dal Pai e Dr. Marcus Vinícius Contes Calça por aceitar participar das bancas de qualificação e defesa do mestrado.

A todos os professores e funcionários da FCA e da FCAVR, que sem eles não poderia ter chegado até aqui, em especial aos que estão acompanhando meu mestrado, do Departamento de Bioprocessos e Biotecnologia, Firmo Sousa Campos, Raquel Francisco Rubio, Jackson Eliezer Neves Batalha, José Eduardo Gomes Montanha, Marcelo Felipe Matias e do Departamento de Solos, Jair Vieira, José Carlos Coelho e Felipe Leite Lourenço.

A todos os amigos que me apoiaram e acompanham a minha jornada, aos amigos da graduação, Antonio Gabriel Pontes dos Reis, Maria Carolina Costa Torres, Otavio Matheus de Oliveira, Gabriel Dias Neves, André Fonseca, Audrey Harumi Imasato, Tamarys Saory Hayashida Machado, Gabriela Grein da Silva, Marco Aurelio Amado Pacheco, Letícia Lourenço Ferreira da Conceição, e aos amigos da pós Paula Luísa Bombarda Andrade Furlan, Cauê Bastos Tertuliano dos Santos, Marcos Roberto Ruybal Bica.

À CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela bolsa de estudos concedida.

“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original”

Albert Einstein

RESUMO

A determinação da evapotranspiração desempenha papel crucial na definição do balanço hídrico, especialmente na agricultura irrigada. Sua mensuração pode ser realizada por meio de métodos diretos, como o uso de lisímetros, ou por abordagens indiretas, como a modelagem matemática, entre as quais está a aplicação do modelo de Penman-Monteith (PM), recomendado pela FAO, indicado para medida de evapotranspiração. O objetivo geral deste estudo é realizar a validação de medidas de evapotranspiração coletadas por meio de um lisímetro de lençol freático constante. O estudo foi conduzido no período de maio a novembro de 2023. Foram realizados ajustes no lisímetro de lençol freático constante conforme necessário, para posteriormente coletar os dados de evapotranspiração. Com os dados obtidos ao longo do período de estudo, comparou-se estes dados com a evapotranspiração estimada pelo modelo matemático de Penman-Monteith, aplicando os indicadores de validação de raiz do erro quadrático médio (RMSE), erro médio absoluto (MAE), índice de Willmott (d), erro absoluto médio (MBE), coeficiente de correlação de Pearson (r), erro absoluto médio relativo (rMBE), erro quadrático médio relativo (rRMSE) e o coeficiente de confiança (c). Durante o período estudado, houve uma tendência de precipitação abaixo do esperado, conforme dados de literatura, exceto em outubro, que registrou um volume 86% acima do esperado, possivelmente devido ao fenômeno "El Niño" que afeta a região desde 2023. As temperaturas do ar também estiveram acima das esperadas principalmente para os meses de setembro com incremento de 16% e de 12% em novembro. A velocidade do vento foi menor que o esperado em uma média de 41% para o período, característica associada ao "El Niño", enquanto a umidade relativa do ar e a radiação solar se mantiveram dentro do esperado, com exceção de outubro, com a umidade relativa do ar 16% acima do esperado e a radiação solar 15% abaixo do esperado, correlacionando-se aos dados de precipitação do período. Ao comparar-se os dados do lisímetro com o método de Penman-Monteith, pode-se concluir que o uso do lisímetro oferece uma medição direta de evapotranspiração local, sendo o valor de evapotranspiração obtida pela equação de Penman-Monteith uma estimativa para um dado local. A equação de Penman-Monteith, embora amplamente utilizada, demonstra variações significativas quando comparada com as medidas de lisimetria, ao longo dos meses, alternando entre subestimação e superestimação dos dados de água no solo. Para Botucatu, o mês em que as medidas de lisimetria e dados de estimativa estiveram próximos foi de agosto, com -2,28% de subestimativa e o mais discrepante entre as medidas foi de outubro com 46,39% de superestimativa, identificando que a sazonalidade deve ser analisada ao se realizar ajustes para o uso do método de PM para o município.

Palavras-chave: agrometeorologia; climatologia; manejo de recursos hídricos, lisimetria; irrigação.

ABSTRACT

The determination of evapotranspiration plays a crucial role in defining the water balance, especially in irrigated agriculture. Its measurement can be carried out through direct methods, such as the use of lysimeters, or through indirect approaches, such as mathematical modeling, among which the application of the Penman-Monteith (PM) model, recommended by the FAO, is indicated for measuring evapotranspiration. The general objective of this study is to validate evapotranspiration measurements collected through a constant water table lysimeter. The study was conducted from May to November 2023. Adjustments were made to the constant water table lysimeter as necessary to subsequently collect evapotranspiration data. With the data obtained throughout the study period, these data were compared with the evapotranspiration estimated by the Penman-Monteith mathematical model, applying the validation indicators of root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), Willmott index (d), mean bias error (MBE), Pearson correlation coefficient (r), relative mean bias error (rMBE), relative root mean square error (rRMSE), and the confidence coefficient (c). During the study period, there was a trend of below-expected precipitation, according to literature data, except in October, which recorded a volume 86% above the expected, possibly due to the "El Niño" phenomenon affecting the region since 2023. Air temperatures were also above expected, especially in September with an increase of 16% and in November with an increase of 12%. Wind speed was lower than expected, averaging 41% for the period, a characteristic associated with "El Niño", while relative humidity and solar radiation remained within expected ranges, except for October, with relative humidity 16% above expected and solar radiation 15% below expected, correlating with the precipitation data for the period. Comparing the lysimeter data with the Penman-Monteith method, it can be concluded that the use of the lysimeter offers a direct measurement of local evapotranspiration, while the evapotranspiration value obtained by the Penman-Monteith equation is an estimate for a given location. The Penman-Monteith equation, although widely used, shows significant variations when compared with lysimeter measurements over the months, alternating between underestimation and overestimation of soil water data. For Botucatu, the month in which lysimeter measurements and estimate data were closest was August, with a -2.28% underestimation, and the most discrepant month was October, with a 46.39% overestimation, indicating that seasonality should be analyzed when making adjustments for the use of the PM method for the municipality.

Keywords: agrometeorology; climatology; water resources management, lysimetry; irrigation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Representação esquemática do Ciclo Hidrológico. 28

Figura 2. Representação do lisímetro de lençol freático constante. 40

Figura 3. Representação do lisímetro de pesagem mecânica. 41

Figura 4. Representação de um lisímetro de drenagem. 42

Figura 5 - Localização do município de Botucatu, no mapa do estado de São Paulo. 46

Figura 6 - Estação Lisimétrica da Faculdade de Ciências Agronômicas, Câmpus de Botucatu. 48

Figura 7 - Representação do lisímetro de lençol freático constante. 49

Figura 8 - Sensor de nível para acionamento do sistema de drenagem (A) e bóia de nível para controle da reposição de água (B). 50

Figura 9 - Bomba d'água Better 650. 50

Figura 10 - Escala graduada de vidro, componente acoplado ao tanque medidor do lisímetro de lençol freático constante. 51

Figura 11 - Lisímetro de lençol freático constante instalado na estação de lisimetria na Fazenda Lageado Botucatu, São Paulo. 52

Figura 12 - Dados de precipitação (mm) no período de maio a novembro de 2023.. 67

Figura 13 - Dados da temperatura máxima, mínima e média do ar no período de maio a novembro de 2023. 69

Figura 14 - Dados da umidade relativa máxima, mínima e média do ar no período de maio a novembro de 2023. 71

Figura 15 - Dados de velocidade do vento a 2 metros de altura fornecidos pela EMA no período de maio a novembro de 2023. 73

Figura 16 - Radiação solar no período de maio a novembro de 2023. 75

Figura 17 - Dados da EMA de Botucatu, no período de maio a novembro de 2023, aplicados ao modelo Penman-Monteith. 76

Figura 18 - Dados da evapotranspiração (mm/dia) fornecidos pelo lisímetro de lençol freático constante da Estação lisimétrica de Botucatu, no período de maio a novembro de 2023. 78

Figura 19 - Comparação dos dados de evapotranspiração diária obtida por diferentes métodos, para Botucatu, no período de maio a novembro de 2023..... 80

Figura 20 - Comparação dos dados de evapotranspiração acumulada mensal, obtida por diferentes métodos, para Botucatu, no período de maio a novembro de 2023. 81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela com os valores de temperatura média do ar observada, média histórica e desvios (diferença entre o valor registrado e a média histórica) em julho, agosto, setembro e outubro de 2023. 35

Tabela 2. Descrição das variáveis medidas e modelos dos sensores presentes na EMA 48

Tabela 3 - Faixas de valores do Coeficiente de confiança (c). 62

Tabela 4 - Dados médios mensais de temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação solar, velocidade do vento a 2 metros e precipitação acumulada fornecido pela EMA no período de maio a novembro de 2023. 64

Tabela 5 - Medidas descritivas, média, mediana, desvio padrão e coeficiente de variação, para os valores meteorológicos de temperatura do ar, velocidade do vento à 2 metros, radiação solar, umidade relativa do ar e, precipitação. 65

Tabela 6 - Comparação da precipitação acumulada (mm) do período amostrado (2023) com a média da série de 1991 a 2020. 66

Tabela 7 - Comparação da temperatura média do ar (°C) do período amostrado (2023) com a temperatura média do ar em 2021 e da série histórica de 1991-2020 (Franco *et al*. 2023). 70

Tabela 8 - Comparação da umidade relativa média do ar (%) do período amostrado (2023) com umidade relativa média do ar em 2021 e da série histórica de 1991-2020 (Franco *et al*. 2023). 72

Tabela 9 - Comparação da velocidade do vento a 2 metros (m/s) do período amostrado (2023) com o estudado por Sarnighausen *et al*. (2021). 73

Tabela 10 - Radiação solar média do período amostrado e do período de 1997-2005 (Inácio, 2009). 75

Tabela 11 - Comparação da evapotranspiração (mm) do período amostrado (2023) com a evapotranspiração em 2021 77

Tabela 12 - Evapotranspiração média diária e acumulada mensal obtida pelo lisímetro de lençol freático constante. 79

Tabela 13 - Valores de evapotranspiração acumulada mensal, obtidos por diferentes métodos para Botucatu, no período de maio a novembro de 2023..... 79

Tabela 14 - Medidas descritivas para os valores da evapotranspiração mensuradas pelo lisímetro de lençol freático constante e Penman-Monteith..... 82

Tabela 15 - Indicativos estatísticos entre os dados diários do lisimetro de lençol freático constante, comparados a Penman-Monteith. 83

Tabela 16 - Indicativos estatísticos entre os dados do lisimetro de lençol freático constante, comparados a Penman-Monteith em um arranjo de 8 dias..... 84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico
Aw	Clima tropical de savana
CAD	Capacidade de água disponível
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CC	Capacidade de campo
CENAD	Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres
DBB	Departamento de Bioprocessos e Biotecnologia
DJ	Dia juliano
Dr	Doutor
Dra	Doutora
EMA	Estação Meteorológica Automática
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ENOS	El Niño-Oscilação Sul
ET	Evapotranspiração
et al.	entre outros
etc	e outras coisas
ETc	Evapotranspiração da cultura
ETo	Evapotranspiração de Referência
ETP	Evapotranspiração Potencial
ETR	Evapotranspiração Real
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura
FCA	Faculdade de Ciências Agronômicas
FCAVR	Faculdade de Ciências Agrárias do Vale do Ribeira
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPMET	Instituto de Pesquisas Meteorológicas
Kc	Coeficiente de Cultivo
LLFC	Lisímetro de Lençol Freático Constante
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
Ods	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

OMM	Organização Meteorológica Mundial
ONU	Organização das Nações Unidas
PC	Período Chuvoso
PM	Modelo de Penman–Monteith
PMP	Ponto de Murcha Permanente
PVC	Policloreto de Vinila
SP	São Paulo
SSPA	Sistema solo-planta-atmosfera
TSM	Temperatura da superfície do mar
UNESCO	Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura
UNESP	Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
UR	Umidade Relativa do ar
WMO	Organização Mundial de Meteorologia

LISTA DE SÍMBOLOS

cm	Centímetro
ha	Hectare
kPa	Kilopascal
km	Quilômetro
km²	Quilômetro quadrado
m	Metro
m²	Metro quadrado
mm	Milímetro
m/s	Metro por segundo
MJ	Megajoule
Pcal	Petacalorias (referentes à 1015 calorias)
US$	Dólar Americano (moeda oficial dos EUA)
º	Grau
ºC	Temperatura na escala Celsius
%	Porcentagem

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 25

2 REVISÃO DE LITERATURA 28

2.1 O ciclo hidrológico 28
2.1.1 Relação das mudanças climáticas com o ciclo da água 29
2.1.2 Relação das mudanças climáticas com a agricultura irrigada 30

2.2 Disponibilidade de água 33
2.2.1 Fenômeno climático “El Niño” 34

2.3 A água no solo 36

2.4 Estações Agrometeorológicas 37
2.4.1 Estação Meteorológica 37
2.4.2 Estação Radiométrica 38
2.4.3 Estação Lisimétrica 39
2.4.3.1 Lisímetro de Lençol freático Constante 40
2.4.3.2 Lisímetro de Pesagem 41
2.4.3.3 Lisímetro de Drenagem 42

2.5 Modelos de evapotranspiração 43
2.5.1 Modelo de Penman Monteith 45

3 MATERIAL E MÉTODOS 46

3.1 Localização e caracterização da área experimental 46

3.2 Instalação e condução do experimento 49

3.3 Aquisição e processamento de dados 52

3.4 Aplicação dos modelos matemáticos para mensurar a evapotranspiração. 55
3.4.1 Penman-Monteith (PM) 55

3.5 Indicadores de validação do desempenho do lisimetro de lençol freático connstante 59

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 64

4.1 Dados da Estação Meteorológica Automática (EMA) 64
4.1.1 Precipitação 66

4.1.2 Temperatura do ar 68
4.1.3 Umidade relativa do ar 70
4.1.4 Velocidade do Vento 72
4.1.5 Radiação Solar 74

4.2 Estimativa de Evapotranspiração por meio do método de Penman-Monteith..... 76

4.3 Dados de evapotranspiração do lisímetro de lençol freático constante 78

4.4 Comparação dos dados de evapotranspiração entre o LLFC e PM..... 79

4.5 Análise dos indicadores de validação..... 82

5 CONCLUSÃO..... 86

REFERÊNCIAS 87

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o nono maior país em termos de irrigação, com 8,5 milhões de hectares irrigados, correspondendo a 3,2% da área agrícola brasileira. Estima-se que o país tenha um potencial de irrigação em 55 milhões de hectares, mas atualmente apenas 15,45% desse potencial é utilizado (Rodrigues, 2022). Os principais desafios para o desenvolvimento da irrigação no Brasil incluem a falta de infraestrutura, a escassez de água e o alto custo da energia elétrica. No entanto, o governo federal, em parceria com os Estados, está trabalhando para superar esses obstáculos e aumentar a área irrigada no país para 10 milhões de hectares até 2030 (Soares *et al*., 2021).

A irrigação desempenha um papel fundamental na agricultura, permitindo que os agricultores produzam alimentos mesmo em regiões com clima seco ou durante períodos de seca. Além de aumentar a produtividade das culturas e reduzir os preços dos alimentos, a irrigação oferece benefícios econômicos e ambientais significativos. Desempenha contribuição para a conservação da água, redução da erosão do solo, melhoria da qualidade da água e ajuda a mitigar os efeitos das mudanças climáticas. Além disso, a irrigação impulsiona a diversificação da produção agrícola, agrega valor e contribui para o desenvolvimento contínuo do setor agrícola (Soares *et al*., 2021; CNA, 2024).

No entanto, problemas como o desperdício de água podem ocorrer quando o sistema de irrigação não é bem dimensionado ou quando o manejo de irrigação não leva em consideração os dados climáticos locais, bem como as necessidades específicas de cada cultura. Para realizar a irrigação de forma apropriada, é fundamental considerar fatores climáticos da região, o tipo de solo, a qualidade da água e outros aspectos, a fim de proporcionar um crescimento adequado das plantas e, consequentemente, aumentar sua produtividade (Silva; Neves, 2020).

De acordo com a Agência Nacional das Águas (ANA, 2024), não existem estatísticas oficiais sobre a extensão do desperdício de água na agricultura brasileira. Segundo o técnico extensionista Thiago Hackmann, cerca de 30% da água utilizada na irrigação de hortaliças em São José dos Pinhais é desperdiçada (AEN, 2023). Isso pode estar relacionado à eficiência dos sistemas de irrigação, que varia de 80% a 90% na irrigação localizada, de 60% a 80% na aspersão e de 50% a 70% na irrigação de

superfície, com possíveis perdas de 10% a 50%, dependendo do sistema utilizado (Keller; Bliesner, 1990; Lima *et al*., 2012).

A aplicação dos dados de evapotranspiração de diferentes culturas possibilita que o uso da água na irrigação seja mais eficiente. Esses dados podem ser encontrados de diversas formas, incluindo o uso de lisímetros (Machado *et al*., 2014).

Os lisímetros são utilizados para medir a evapotranspiração em escala de milímetros (mm), equivalente a litros por metro quadrado (m^2). Essa medição considera a quantidade de água evaporada e transpirada pelo solo e pelas plantas (Vicentin, 2018). A evapotranspiração é um fator crucial para o uso racional da irrigação, pois auxilia na determinação da quantidade de água necessária para irrigar uma cultura de forma eficiente (Silva; Neves, 2020).

Para garantir a precisão dos dados, os lisímetros devem ser calibrados e analisados regularmente (Vicentin, 2018). Além disso, é possível comparar os dados gerados pelos lisímetros com os dados obtidos por estações meteorológicas, utilizando modelos matemáticos para estimativa (Ruezzene *et al*., 2021). Essa comparação ajuda a identificar possíveis ajustes nos lisímetros e assegura a confiabilidade das informações (Almeida, 2022).

Um tipo específico de lisímetro, o lisímetro de lençol freático constante, é especialmente valioso para a agricultura sustentável. Esse dispositivo mede a contribuição do lençol freático para a evapotranspiração. Ele consiste em uma câmara enterrada no solo, com uma planta se desenvolvendo dentro dela. A câmara mantém contato direto com o lençol freático, e a variação do nível da água é usada para estimar a evapotranspiração (Pellison *et al*., 2023). Essa abordagem contribui para o uso eficiente da água e reduz o impacto ambiental da agricultura.

O lisímetro de lençol freático constante tem grande potencial de apoio em estudos que envolvem a identificação dos dados de diferentes culturas, incluindo aquelas que ainda não foram implantadas no Brasil (Costa, 2017; Ramalho, 2019). Além disso, ele é útil para ajustar o referencial da pesquisa aplicada em relação à demanda hídrica de uma cultura específica, bem como para o desenvolvimento de técnicas de irrigação mais eficientes. Também desempenha um papel importante na avaliação do impacto das mudanças climáticas na agricultura e no desenvolvimento de novas cultivares mais resistentes à seca (Villela; Moares; Pereira, 2016; Assis, 2019). Vale ressaltar que o lisímetro de lençol freático constante é uma ferramenta relevante para a pesquisa experimental (Miranda; Yoder; Souza, 1999).

As medidas diárias de evapotranspiração são úteis para identificar perdas de água ao longo do dia, auxiliando agricultores e pesquisadores na compreensão das necessidades hídricas de uma cultura (Santos, 2023). Para calcular a evapotranspiração, são comumente utilizados modelos matemáticos amplamente reconhecidos, como o modelo de Penman-Monteith (Siqueira, 2020).

No município de Botucatu, as principais atividades agrícolas incluem o cultivo de cana-de-açúcar, laranja, florestas de eucaliptos e pastagem (Lemes; Reboita; Rodrigues, 2020). Essas culturas estão constantemente recebendo novas variedades com o objetivo de aumentar a produtividade. No entanto, algumas características precisam ser adaptadas ao clima local, e, portanto, é fundamental analisar continuamente o consumo de água como referência, especialmente devido às mudanças climáticas aceleradas (RBMC, 2024).

O objetivo geral deste estudo é realizar a validação de medidas de evapotranspiração coletadas por meio de um lisímetro de lençol freático constante. Fez-se necessário os objetivos específicos para a sua realização:

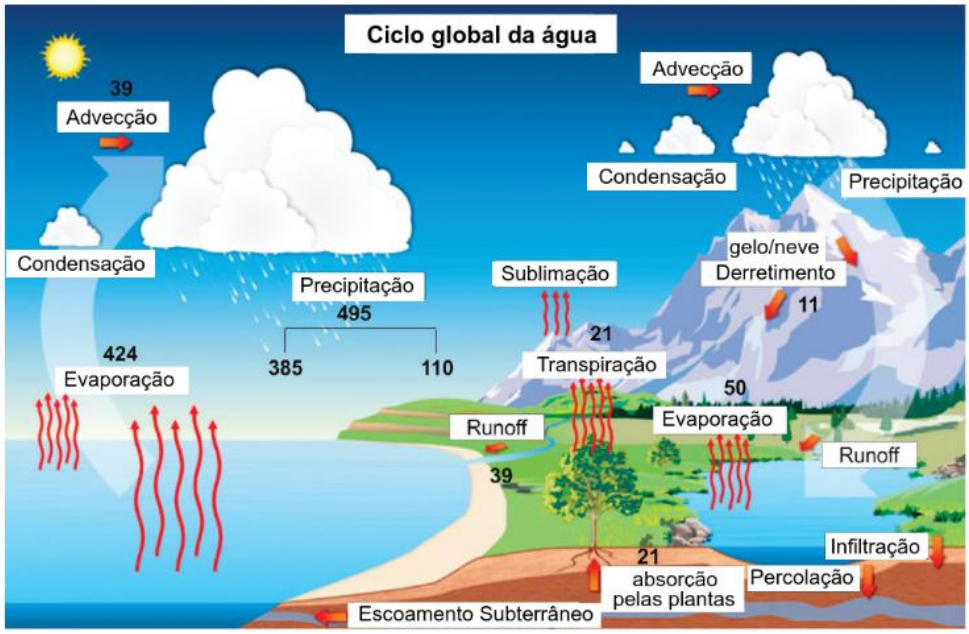
- Obtenção de estimativas da evapotranspiração para Botucatu - SP por meio do modelo matemático de Penman-Monteith a partir de dados meteorológicos;
- Realizar análise comparativa entre as medidas diretas de evapotranspiração, obtidas pelo lisímetro de lençol freático constante, e os dados estimados a partir do modelo de Penman-Monteith;
- Tornar o lisímetro de lençol freático constante um instrumento operacional, para a obtenção adequada de medidas diretas de evapotranspiração, identificando as relações de subestimativa e superestimativa do método de PM.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O ciclo hidrológico

O ciclo hidrológico (Figura 1) é um fenômeno global em que toda a água existente no planeta Terra circula continuamente em toda a sua extensão, impulsionada pela energia solar associada à gravidade e a rotação terrestre (Silveira, 2001). Segundo Soares (2005), o ciclo hidrológico é o fenômeno que opera processos interdependentes, assim como as transformações entre os estados sólido, líquido e gasoso, ocasionando toda a renovação da água no planeta.

Figura 1 - Representação esquemática do Ciclo Hidrológico.



Fonte: Tatsch, 2020.

O processo de renovação da água pode ocorrer principalmente de duas maneiras: da superfície para a atmosfera, através da evaporação, que mantém o ciclo contínuo da água na Terra; ou da atmosfera para a superfície, quando a água retorna na forma de precipitação, seja líquida ou sólida. A água que evapora dos oceanos e da superfície terrestre se integra à atmosfera, formando pequenas gotas que, ao se juntarem, precipitam-se novamente tanto nos oceanos quanto nos continentes. Durante sua trajetória na superfície terrestre, essa água pode ser interceptada pela vegetação, evaporar, infiltrar-se no solo, acumular-se em depressões ou escoar pela

superfície em direção aos canais de drenagem, formando o escoamento superficial (Paes Junior, 2013).

De acordo com Lima (2008), o ciclo da água envolve vários processos hidrológicos, como a evaporação, precipitação, interceptação, transpiração, infiltração, percolação, escoamento superficial, entre outros processos de absorção e eliminação de vapor de água.

Em condições naturais, o ciclo da água tende a se manter em equilíbrio. No entanto, a crescente urbanização das bacias hidrográficas tem causado modificações significativas em sua dinâmica. Nas áreas urbanizadas, a impermeabilização do solo, a canalização de rios e a remoção da vegetação são fatores que intensificam os processos de erosão e inundações. Esses fatores, por sua vez, provocam impactos ambientais que comprometem o balanço hídrico, devido às alterações no ciclo hidrológico (Fritzen; Binda, 2011).

2.1.1 Relação das mudanças climáticas com o ciclo da água

As mudanças climáticas estão acelerando o ciclo da água, causando tempestades mais intensas e secas mais longas. Isso ocorre porque o aumento das temperaturas está fazendo com que mais água evapore dos oceanos e da terra, e o derretimento do gelo nos polos está liberando mais água doce nos oceanos (Olmedo; Turiel, 2022).

De acordo com pesquisadores (Dias; Pessoa, 2020; Bailey *et al*., 2021; Owen *et al*., 2021; Lizano-Araya; Lizano-Rodríguez, 2022; Subramanian *et al*., 2023), os efeitos da mudança climática no ciclo da água incluem:

- Aumento da evaporação da água dos oceanos em cerca de 4% por década;
- Tempestades mais intensas, com maior precipitação e ventos mais fortes;
- Secas mais longas e mais graves;
- Aumento do nível do mar em cerca de 3 mm por ano.

As secas estão aumentando em todo o mundo devido às mudanças climáticas. O aumento das temperaturas está fazendo com que a água evapore mais rapidamente dos solos, secando as plantações e esgotando as fontes de água. As secas também estão causando incêndios florestais, que podem liberar grandes quantidades de gases

de efeito estufa na atmosfera e contribuir ainda mais para as mudanças climáticas (Pires, 2022).

Segundo Lund *et al*. (2018); Omranian; Sharif; Tavakoly, (2018); Buanango, Ferreira e Oliveira (2020); Windsor (2021); Torrez *et al*. (2021), diferentes localidades no globo terrestre estão sendo afetadas com as mudanças climáticas:

- A Austrália está enfrentando uma seca que está causando grandes prejuízos para a agricultura e a pecuária;
- A África Ocidental está enfrentando uma seca que está causando fome e deslocamento de pessoas;
- Tempestades nos Estados Unidos se tornaram mais intensas nos últimos anos. Em 2017, o furacão Harvey causou mais de US$ 125 bilhões em danos nos Estados Unidos;
- A seca na Califórnia já dura mais de uma década. A seca causou quebra de safra, escassez de água e incêndios florestais;
- O nível do mar está subindo. A elevação do nível do mar está ameaçando comunidades e ecossistemas costeiros.

As mudanças climáticas são um problema sério que está tendo um impacto significativo no ciclo da água. A agenda 2030 é um plano de ação global para alcançar o desenvolvimento sustentável até 2030. Ela foi adotada por todos os 193 Estados-membros da ONU em 2015, incluindo o Brasil. A Agenda é composta por 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que são interligados e indivisíveis. Os ODS abrangem as dimensões social, ambiental e econômica do desenvolvimento sustentável (Barbieri, 2020; Pinheiro *et al*., 2022), sendo, portanto, um acordo internacional para identificação de mudanças para ações que sejam efetivas tanto para sobrevivência humana como para sua manutenção em termos de utilização de recursos naturais.

2.1.2 Relação das mudanças climáticas com a agricultura irrigada

As mudanças climáticas estão afetando a agricultura irrigada devido ao aumento da temperatura do ar, a redução das chuvas e o aumento das secas, que dificulta uma adequada aplicação da irrigação, ocasionando redução na produtividade

agrícola, aumento dos custos de produção e até mesmo à perda de safras. Além disso, a qualidade da água também vem sendo afetada, já que está se tornando mais quente e mais salobra, afetando a eficiência da aplicação da irrigação (Silva, 2019; Naitzel, 2023).

Os impactos das mudanças climáticas na agricultura irrigada são significativos e podem ter um impacto negativo na segurança alimentar. É importante que os agricultores e os governos tomem medidas para se adaptar às mudanças climáticas e reduzir os seus impactos na agricultura (Buainain, Garcia e Vieira, 2016; Thorstensen; Zuchieri, 2021).

Em estudo de Elliott *et al*. (2014), os resultados mostraram que a disponibilidade de água de irrigação futura é projetada para diminuir em algumas regiões, como o oeste dos Estados Unidos, a China e o sudoeste da Ásia, devido ao aumento das temperaturas do ar e da evapotranspiração. Isso poderia levar à reversão de 20-60 milhões de hectares de terras irrigadas para o manejo de sequeiro, com uma perda de 600-2900 Pcal (petacalorias, unidade referente à 1015 calorias) de produção de alimentos.

Em outras regiões, como o norte/leste dos Estados Unidos, partes da América do Sul, grande parte da Europa e o sudeste da Ásia, a disponibilidade de água de irrigação futura é projetada para aumentar, devido ao aumento das chuvas. Isso poderia permitir um aumento na irrigação, exigindo investimentos substanciais em infraestrutura de irrigação (Elliot *et al*., 2014).

No Nordeste brasileiro, onde apenas 5% das áreas agrícolas utilizam irrigação, os impactos são particularmente relevantes. O aumento da temperatura global tende a aumentar o consumo de água pelas culturas, resultando em maiores perdas por evaporação e reduzindo a eficiência do uso da água na irrigação. Além disso, a região depende principalmente das chuvas para a agricultura, e a reserva de água no solo pode ser insuficiente para garantir altas produtividades. Com as mudanças climáticas, a disponibilidade hídrica pode se tornar ainda mais crítica. Agricultores e pesquisadores precisam adotar práticas sustentáveis, como o manejo eficiente da água, uso de tecnologias de irrigação inteligentes e cultivares resistentes ao estresse hídrico, para enfrentar esses desafios e garantir a segurança alimentar e a sustentabilidade no Nordeste brasileiro (Sousa *et al*., 2023).

Um estudo da Agência Nacional de Águas (ANA) aponta que a disponibilidade de água pode diminuir mais de 40% em bacias hidrográficas do Norte, Nordeste,

Centro-Oeste e parte do Sudeste até 2040 (ANA, 2024). Além disso, aumentos na frequência e intensidade de eventos climáticos extremos, como inundações, alagamentos, deslizamentos e secas, são projetados para o Sudeste da América do Sul, onde o Brasil está localizado (Oliveira; Prado; Monteiro, 2022).

No final de abril de 2024, o estado do Rio Grande do Sul enfrentou uma catástrofe sem precedentes devido às chuvas intensas que provocaram cheias nos rios e enchentes inéditas em várias cidades. Cerca de 80% dos 497 municípios gaúchos estavam em estado de emergência, com mais de cem mortos e mais de 200 mil pessoas desabrigadas. Essa tragédia, aparentemente causada por chuvas fortes, está ao menos em parte relacionada às mudanças climáticas. A Organização das Nações Unidas (ONU) apontou que o aquecimento das águas do Pacífico e do Atlântico Sul, incluindo o fenômeno El Niño, contribuiu para essa catástrofe no Sul do Brasil. Além disso, a enchente de 2024 no Guaíba, em Porto Alegre, foi histórica. O nível do rio ultrapassou a marca de 83 anos atrás, chegando a 5,35 metros, mais de dois metros acima do nível de alerta. Essa cheia superou todas as marcas anteriores, incluindo a enchente de 1941, que havia atingido 4,76 metros. Antes da enchente de 2024, a maior cheia registrada na história do Guaíba foi justamente a de 1941. Os impactos dessa inundação foram significativos na região, exigindo respostas rápidas das autoridades (Guimarães, 2024; Meinerz, 2024; Zocchi, 2024; ONU, 2024).

Algumas das medidas que podem ser tomadas para se adaptar às mudanças climáticas incluem (Bianchi; Germino; Silva, 2016; Rodrigues; Domingues; Christofidis, 2017; Pereira; Silva; Carbonari, 2017):

- Usar variedades de plantas mais resistentes ao calor e à seca;
- Melhorar a eficiência da irrigação;
- Desenvolver novas tecnologias para a agricultura irrigada;
- Investir em pesquisa e desenvolvimento na área da agricultura irrigada;

Ao tomar essas medidas, os agricultores e os governos podem ajudar a mitigar os impactos das mudanças climáticas na agricultura irrigada e garantir a segurança alimentar.

2.2 Disponibilidade de água

A disponibilidade de água é influenciada pelo clima, especialmente no Brasil, notadamente pelo ciclo anual de chuvas e vazões variáveis entre diferentes bacias. A variabilidade climática interanual, ligada a fenômenos como El Niño, La Niña e variações na temperatura da superfície do mar do Atlântico, também desempenha um papel importante. Ademais, os riscos associados às mudanças climáticas, sejam elas de origem natural ou humana, têm provocado grande preocupação entre cientistas, políticos, a mídia e a população em geral (Schöngart; Junk, 2020).

As atuais tendências de exploração, degradação e poluição dos recursos hídricos atingiram níveis alarmantes e, se não forem revertidas, poderão comprometer a oferta de água no futuro próximo. De acordo com estimativas das Nações Unidas, as mudanças climáticas resultarão na expulsão de 135 milhões de pessoas de suas terras devido ao avanço dos desertos. Além disso, o rápido crescimento das populações urbanas agrava a ameaça global de escassez de água (Marengo, 2008).

Em um estudo conduzido pelos autores Rodrigues, Senna e Cataldi (2019), foi considerado um cenário no qual toda a área de Caatinga no Nordeste brasileiro seria substituída por deserto. Os resultados indicaram uma redução na precipitação em quase todos os meses do ano, especialmente na área da Caatinga. A evapotranspiração também diminuiu, particularmente durante a estação chuvosa. O escoamento superficial aumentou, sugerindo uma menor absorção de água pelas raízes das plantas. A variável mais afetada foi a temperatura do ar, com elevações de até 6 °C em algumas regiões e um aumento médio de aproximadamente 3 °C na área da Caatinga. Adicionalmente, foi identificado um mecanismo restaurador associado à convergência de umidade, que, no entanto, mostrou-se insuficiente para evitar a redução da precipitação no Nordeste brasileiro. Esses resultados destacam a importância de medidas de adaptação para mitigar os impactos da desertificação, como práticas agrícolas sustentáveis e gestão eficiente dos recursos hídricos. A desertificação é um desafio socioeconômico e ambiental significativo na região, exigindo ações coordenadas para preservar o ecossistema e garantir a resiliência das comunidades locais.

Em relação a provisão de água para cidades, existem três aspectos principais que tornam o problema complexo: disponibilidade, qualidade e entrega de água. Isso ocorre devido a disponibilidade de água estar diminuindo em muitas regiões do mundo

devido à mudança climática, crescimento populacional e urbanização. A qualidade da água está se deteriorando em muitas cidades devido à poluição industrial e agrícola. A entrega de água é ineficiente em muitas cidades, devido a vazamentos e perdas nas redes de distribuição. No entanto, alguns investimentos são necessários para controle da situação (McDonald *et al*., 2011):

- Investimento em tecnologias de conservação de água;
- Melhoria da qualidade da água através do tratamento de efluentes;
- Redução das perdas de água nas redes de distribuição;
- Desenvolvimento de sistemas de alerta precoce para secas e inundações;
- Promoção da gestão integrada dos recursos hídricos.

Os impactos das mudanças climáticas no fornecimento de água nas cidades, ocasiona eventos extremos e a variabilidade climática, o que afeta a disponibilidade de água. Estratégias como infraestrutura verde, tecnologias eficientes de uso da água e mudanças comportamentais para enfrentar esses desafios, são abordagens necessárias para garantir o abastecimento sustentável de água nas cidades (Ferreira Filho, 2020).

2.2.1 Fenômeno climático “El Niño”

El Niño representa a fase quente de uma grande oscilação acoplada entre o oceano e a atmosfera no Oceano Pacífico tropical, conhecida como El Niño-Oscilação Sul (ENOS). Durante essa fase, a temperatura da superfície do mar (TSM) no Pacífico central e oriental está acima da média (Grimm; Aceituno, 2015).

No Brasil o “El Niño” apresenta inverno mais quente e primavera mais chuvosa que o normal no Sul, primavera mais seca e mais quente na maior parte do Sudeste, além de seca no Norte e Nordeste do Brasil (Grimm; Aceituno, 2015).

O Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), em ação conjunta com o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), Agência Nacional das Águas (ANA) e o Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres (CENAD) desenvolveram o boletim mensal referente ao “Painel El Niño 2023-2024”, com a finalidade de apresentar o monitoramento e previsões sobre o fenômeno, assim como os possíveis impactos (INMET, 2023b).

O boletim nº 3 (INMET, 2023b), informa que desde junho de 2023 as condições observadas de temperaturas da superfície do mar apontam um padrão típico do El Niño, chegando a temperaturas 3 ºC acima do convencional. No Brasil, a região Sul é a que vem sendo mais afetada apresentando chuvas intensas, inundações e deslizamentos de terra. No entanto, a região Norte vem sendo impactada pela seca, ocasionando prejuízos nas navegações, agricultura e energia elétrica. A previsão é que para os próximos meses as condições causadas pelo fenômeno climático continuem ocorrendo, além de causar chuvas irregulares nas regiões Sudeste e Centro Oeste apresentando níveis de água mais baixos, e déficit hídrico no Nordeste (Azevedo, 2023).

No entanto, além das conhecidas interferências no ciclo hidrológico do Brasil nesse período, o El Niño em 2023 apresentou outro fator preocupante. Conforme a própria notícia do INMET (2023c), a temperatura média do ar atingiu recorde no Brasil pelo quarto mês seguido (Tabela 1), ficando acima da média histórica de todas as estações nacionais do INMET desde 1961, nos meses de julho, agosto, setembro e outubro.

Tabela 1 - Tabela com os valores de temperatura média do ar observada, média histórica e desvios (diferença entre o valor registrado e a média histórica) em julho, agosto, setembro e outubro de 2023.

Meses	Temperatura do ar observada	Temperatura do ar média	Desvio Padrão
		ºC	
Junho	23,0	21,9	1,0
Agosto	24,3	22,9	1,4
Setembro	25,8	24,2	1,6
Outubro	26,4	25,2	1,2

Fonte: INMET (2023c).

Esses meses foram marcados por ondas de calor extremo, com o pico do fenômeno previsto para dezembro de 2023, continuando até abril 2024, além de condições anômalas até outubro de 2024, apresentando as temperaturas mais altas desde a década de 60 (INMET, 2023b).

Ademais, de acordo com o último boletim semanal do National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), indicou que a anomalia de temperatura da superfície do mar era de 1,9ºC na denominada região Niño 3.4, no Pacífico Equatorial

Central, podendo atingir a categoria de Super El Niño. Essa região é considerada referência para determinação da ocorrência do fenômeno climático El Niño, e da sua intensidade. Em regra, a classificação do El Niño ocorre de acordo com as faixas de temperatura, onde: El Niño fraco (+ 0,5 ºC e + 0,9 ºC), moderado (+ 1 ºC e + 1,4 ºC), forte (+ 1,5 ºC a + 2,0 ºC), e muito forte (acima de +2 ºC) (Sias, 2023).

O cenário do El Niño em maio de 2024 apresentou mudanças. A parte atmosférica do El Niño, que é a fase quente do padrão climático El Niño-Southern Oscillation (ENSO), apresenta redução, com a parte oceânica enfraquecida. Preveem-se que as condições serão neutras em relação ao ENSO em junho de 2024, e tendendo-se a começar se apresentar fase fria do ENSO entre junho e agosto de 2024 (NOAA Climate.org, 2024).

2.3 A água no solo

A dinâmica da água no solo é um processo contínuo que regula o movimento dos elementos químicos envolvidos na formação e evolução dos solos, na disponibilidade de nutrientes para as plantas e na satisfação da demanda hídrica (Maciel Netto *et al*., 2000; Pinheiro; Teixeira; Kaufmann, 2009). Esse movimento depende diretamente das propriedades físico-hídricas do solo e pode ser descrito pela taxa de infiltração e pela condutividade hidráulica. Este último parâmetro indica a facilidade com que o fluido percola através do solo (Wang; Yates; Ernst, 1998; Pinheiro; Teixeira; Kaufmann, 2009).

A disponibilidade de água é o fator ambiental mais crucial para o crescimento das plantas e a produtividade agrícola na maioria das regiões, pois determina o grau de aptidão climática das áreas para diferentes culturas. Tanto a deficiência quanto o excesso de água devem ser considerados no manejo agrícola e frequentemente requerem intervenção humana, como a irrigação, para corrigir ou minimizar esses problemas. O manejo da água na agricultura exige um entendimento aprofundado das relações hídricas no sistema solo-planta-atmosfera (SSPA). Isso inclui a caracterização dos processos relacionados à água em equilíbrio e em movimento dentro do SSPA, uma área de conhecimento ampla, pois os componentes solo, planta e atmosfera são estruturalmente muito diferentes e interagem de diversas maneiras com a água (Coelho Filho *et al*., 2011).

A capacidade de água disponível (CAD) no solo é uma característica física de retenção de água que varia com o tipo de solo e com seu manejo agrícola. Em teoria, a CAD representa a quantidade máxima de água que o solo é capaz de reter contra a força da gravidade desconsiderando a água que as raízes não conseguem extrair, devido a sua extrema retenção no solo. Portanto, esse conceito de CAD estabelece dois limites práticos de retenção de água pelos solos para fins agronômicos, ou seja, a capacidade de campo (CC) e o ponto de murcha permanente (PMP). A CC é determinada como o limite superior de armazenamento de água, onde o solo está plenamente abastecido de água, não podendo ser confundido com solo saturado. Já a PMP é quando o nível de água está bem abaixo da CC, determinado como limite mínimo de água no solo, sendo excedido esse limite, a planta tende a murchar irreversivelmente, não conseguindo mais extrair água do solo (Pereira; Sediyama; Villa Nova, 2013).

2.4 Estações Agrometeorológicas

A obtenção sistemática de dados meteorológicos em um ambiente de pesquisa é essencial para fornecer suporte aos estudos de processos que dependem direta ou indiretamente das condições agrometeorológicas em escalas diárias e mensais (Bergamaschi *et al*., 2012).

Existem três categorias de estações que são necessárias para descrever as interações térmicas e de massa (água) entre solo, planta e atmosfera, denominadas estação meteorológica, estação radiométrica e estação lisimétrica.

2.4.1 Estação Meteorológica

Uma estação meteorologia pode ser mecânica ou automatizada, sendo composta por equipamentos que tem como finalidade monitorar e registrar as condições climáticas através da utilização de sensores configuráveis para as análises de parâmetros atmosféricos.

A obtenção de dados é realizada através da análise das variáveis medidas como a pressão, umidade relativa do ar, precipitação, temperatura do ar, radiação solar, velocidade e direção do vendo (Montanha, 2022).

A importância dessas estações meteorológicas adequadamente monitoradas em relação ao pleno funcionamento de sensores e demais dispositivos, é evidente nas redes de acesso livre de dados, como o INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) e o IPMET (Instituto de Pesquisas Meteorológicas) (Sapucci *et al*., 2008). Essas redes desempenham um papel fundamental na tomada de decisões, na emissão de alertas e na produção de boletins sobre eventos meteorológicos (Martins, 2013).

Essas redes fornecem informações em tempo real sobre condições climáticas e meteorológicas, permitindo que agências governamentais, instituições de pesquisa, empresas e o público em geral tenham acesso a dados precisos para tomar decisões (Morais; Braga, 2023). Alertas de eventos meteorológicos extremos, como tempestades, enchentes ou ondas de calor, são emitidos com base nas informações coletadas por essas estações (Nogueira *et al*., 2011).

No âmbito global, as redes de acesso livre de dados meteorológicos contribuem para a previsão do tempo, o monitoramento de mudanças climáticas e a formulação de políticas de adaptação e mitigação (Cornetta, 2022). As informações obtidas dessas estações desempenham um papel crítico na proteção de vidas, propriedades e na promoção da resiliência das comunidades diante dos desafios climáticos em constante evolução (Bensunan, 2006).

2.4.2 Estação Radiométrica

Uma estação radiométrica é composta por equipamentos que tem como finalidade medir a radiação solar incidente e refletida, fornecendo informações valiosas sobre a energia solar que atinge a superfície da Terra (Liu, 2015).

No Brasil, a disponibilidade de estações radiométricas é relativamente limitada. Essas estações desempenham um papel crucial na coleta de dados relacionados à radiação solar e térmica, sendo peças-chave para o cálculo de modelos de evapotranspiração que dependem do saldo de radiação solar como uma grandeza física fundamental.

A escassez de estações radiométricas no Brasil pode resultar em lacunas nos dados necessários para calcular com precisão a evapotranspiração e entender os padrões climáticos locais. A falta de dados radiométricos pode limitar a capacidade de fazer previsões confiáveis sobre a disponibilidade de água, as condições agrícolas e outros aspectos relacionados ao clima. Portanto, a expansão e o fortalecimento da rede de estações radiométricas no Brasil desempenham um papel fundamental na melhoria das estimativas de evapotranspiração e na compreensão mais profunda dos processos climáticos em nível regional e nacional.

O saldo de radiação solar é uma medida da diferença entre a radiação solar incidente e a radiação térmica solar disponível na superfície terrestre (Martins; Pereira; Echer, 2004). Esse saldo de energia é um componente essencial para calcular a evapotranspiração, que é o processo combinado de evaporação da água da superfície do solo e transpiração das plantas para a atmosfera (Sediyama, 1996).

2.4.3 Estação Lisimétrica

Uma estação lisimétrica tem como finalidade medir a evapotranspiração de referência (ETo), podendo ser composta por até três tipos de lisímetros (pesagem, drenagem e lençol freático constante). A escolha do lisímetro depende de fatores como o clima, custo de construção, finalidade da utilização, espécie cultivada, e a tecnologia aplicada para o funcionamento (Campeche *et al*., 2011).

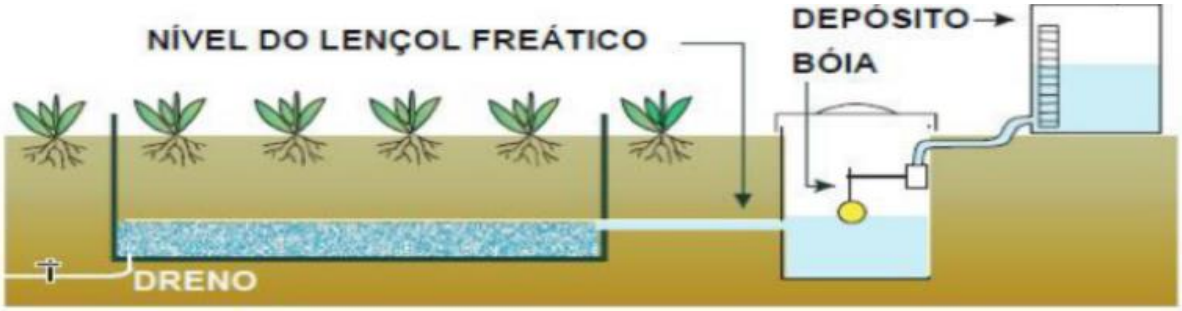
Os dados gerados através desse tipo de estação são úteis para um melhor conhecimento do requerimento hídricos das culturas agrícolas ao longo de seu ciclo produtivo. Os lisímetros partem do princípio de que um determinado volume de solo vegetado (normalmente grama ou alfafa) é isolado, objetivando o monitoramento e controle da entrada e saída de água, que gerará medidas precisas de evapotranspiração (Carvalho *et al*., 2007).

A seguir estão discriminados os tipos de lisímetros:

2.4.3.1 Lisímetro de Lençol freático Constante

Os lisímetros de lençol freático constante (Figura 2) quando comparado aos demais modelos, é o que apresenta menor dificuldade de manuseio, fornecendo os dados de evapotranspiração do cultivo de interesse diante da determinação do volume de água que sai do sistema de alimentação (tanque medidor) dos lisímetros (Pereira *et al*., 2007).

Figura 2. Representação do lisímetro de lençol freático constante.



Fonte: Souza (2023).

Cada lisímetro de lençol freático constante é composto de uma caixa d'água, tanque intermediário e tanque medidor, tendo como finalidade determinar a evapotranspiração por meio da diferença do nível de água presente entre os tanques. A primeira etapa que garante o sucesso do funcionamento desse tipo de equipamento é a correta obtenção de um monólito de solo nivelado, tendo em seu fundo uma lâmina livre que permite o constante reabastecimento de água na cultura (Pellison, 2018).

O nível do lençol freático é determinado na caixa d'água, que está constantemente nivelada ao nível da água do tanque intermediário. Portanto, quando ocorrer o processo de evapotranspiração o nível da caixa d'água diminui, fazendo com que a água seja reposta ao solo através do processo de capilaridade do solo, onde consecutivamente fará com que o nível do tanque intermediário diminua. Com essa diminuição, a boia mecânica de nível aciona a saída de água do tanque medidor para o tanque intermediário, fazendo com que o nível do lençol freático entre a caixa d'água e o tanque intermediário se mantenha constante. O volume de água reposta é marcado em um vidro em escada graduada que compõem o tanque medidor, sendo possível através dessa medida determinar a evapotranspiração diária (Pellison *et al*., 2023).

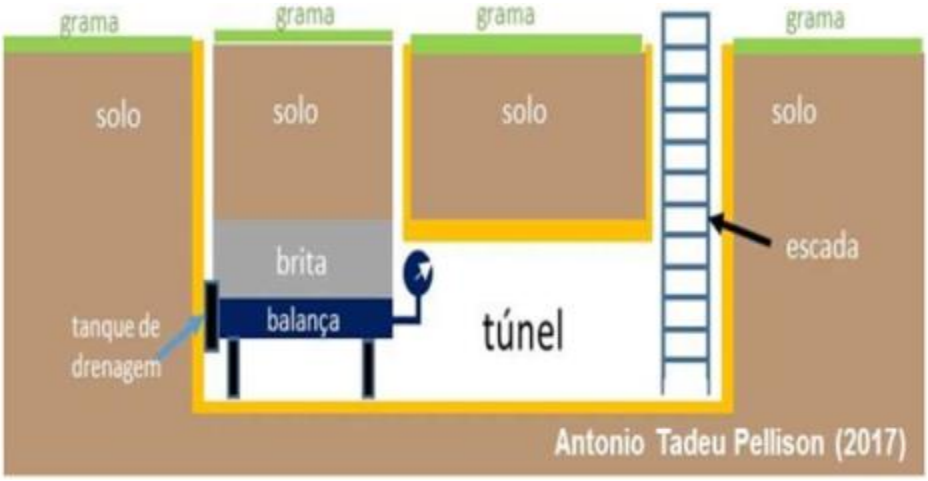
Quando ocorre precipitação, o nível do lençol freático aumenta, e com isso, aciona o sistema de nível, composto por uma boia que funciona como sensor de nível. A finalidade do sistema é ativar a bomba de recalque, realizando a drenagem da água em excesso. Essa drenagem é necessária para que não afete a leitura do lisímetro após o período da chuva, já que demoraria dias para o nível do lençol freático diminuir. Manter a água sempre no nível do lençol freático quer dizer que o solo está sempre na sua capacidade de campo, portanto, a melhor condição de cultivo (Pellison *et al*., 2023).

2.4.3.2 Lisímetro de Pesagem

O lisímetro de pesagem tem como finalidade determinar a evapotranspiração através da medição da variação de peso de um bloco de solo diariamente, diante da entrada e saída de água do sistema. Essa medição é realizada por meio de uma célula de carga que monitora a dinâmica da água no solo. Além da evapotranspiração da cultura cultivada, é possível obter o coeficiente de cultivo de interesse (kc) através da utilização desse equipamento (Poss *et al*., 2004; Sousa, 2021).

O lisímetro de pesagem (Figura 3) é considerado o melhor equipamento dentre os lisímetros, medindo com exatidão a evapotranspiração de referência, além de servir para a realização da calibração de modelos (Howell *et al*., 1991; Medeiros, 2012).

Figura 3. Representação do lisímetro de pesagem mecânica.



Fonte: Pellison (2018).

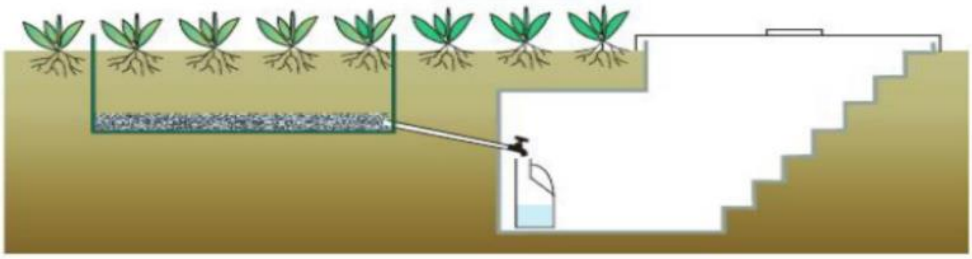
Ajustes devem ser realizados na calibração do intervalo de sensibilidade das células de carga, para que seja obtida uma correta variação de massa do sistema, antes que a ET (mm) seja realmente computada (Gomes Júnior, 2021). Após a determinação do intervalo de tempo, a quantidade de água coletada (em massa) pelo sistema de drenagem deve ser subtraída da variação total de massa. Eventos de precipitação intensa, principalmente em regiões tropicais, em conjunto com vendavais, devem ser considerados quando estiver procedendo uma análise lisimétrica (Schmidt *et al*., 2013; Gomes Júnior, 2017).

Através da variação do peso em um bloco de solo, determina-se a evapotranspiração em um lisímetro de pesagem, quando ligada a entrada e saída de água do tanque (Campeche *et al*., 2011). A obtenção do peso do tanque é realizada utilizando uma balança de carga, que permite maior precisão em períodos curtos, acompanhando assim a evapotranspiração em função do potencial de água no solo, através da incidência de energia e da hora do dia (Varejão-Silva, 2006).

2.4.3.3 Lisímetro de Drenagem

O lisímetro de drenagem (Figura 4) tem como finalidade estabelecer a evapotranspiração da cultura através de reservatórios colocados nos solos. A medição é realizada através da subtração da água aplicada na irrigação, pela água drenada que é obtida no final do sistema, no orifício de saída canalizado embaixo do tanque (Bernardo; Soares; Mantovani, 2008)

Figura 4. Representação de um lisímetro de drenagem.



Fonte: Souza (2023).

O sistema é considerado relativamente lento, sendo necessário pelo menos de cinco a sete dias para a obtenção de seus dados, decorrente do processo de infiltração da água até o orifício de saída (PELLISON, 2018).

2.5 Modelos de evapotranspiração

A evapotranspiração (ET) é o processo relacionado à perda combinada de água, envolvendo a evaporação do solo e a transpiração das plantas. Esse fenômeno é crucial para o equilíbrio hídrico de uma bacia hidrográfica, especialmente para o cálculo das necessidades de irrigação na agricultura (Frota, 2006).

A evapotranspiração de referência (ETo) representa a taxa de evapotranspiração de uma superfície de referência (grama ou alfafa) sob condições meteorológicas ideais, enquanto a evapotranspiração potencial (ETP) é a quantidade máxima de água que poderia ser evaporada e transpirada por uma vegetação específica se a água estivesse abundantemente disponível, representando a demanda atmosférica máxima de água (Tucci; Beltrame, 2001).

Já a evapotranspiração real (ETR) refere-se à quantidade real de evapotranspiração que ocorre em uma área específica, levando em consideração as condições reais de umidade do solo, cobertura vegetal e clima local, e geralmente é igual ou menor que a ETP. A evapotranspiração da cultura (ETc) é a evapotranspiração de uma cultura específica, calculada multiplicando a ETo por um coeficiente de cultura (Kc), que varia ao longo do ciclo de crescimento da planta.

A vegetação controla fatores como albedo, rugosidade, afetando a umidade do solo e a transferência de água para a atmosfera. Dependendo das condições meteorológicas e das condições das plantas, diferencia-se a evapotranspiração potencial (ETP) e a evapotranspiração real (ETP) (Rezende, 2023).

Como a evapotranspiração representa a perda total de água pelo sistema, sua determinação deve ser realizada com extrema precisão para garantir a reposição adequada e manter o sistema de cultivo em condições ideais de interação com o ambiente. A planta retém aproximadamente de 1 a 2% da água que consome, portanto, um maior consumo de água está correlacionado a um melhor desempenho da planta (Ometto, 1981).

Os dados de evapotranspiração desempenham um papel crucial em diversas aplicações, como irrigação, abastecimento urbano, indústria e dimensionamento de sistemas que utilizam águas residuais, entre outros (Jensen; Burman; Alen, 1990; Sediyama, 1998; Allen *et al*., 1998). Os fatores que afetam a evapotranspiração são geralmente categorizados em três grupos (Allen *et al.*, 1998; Pellison, 2018):

- Fatores climáticos: incluem radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento;
- Fatores da cultura: englobam tipo de cultura, variedade, estágio de desenvolvimento, altura, rugosidade, capacidade de reflexão, cobertura do solo e características das raízes;
- Fatores ambientais e de manejo: abrangem salinidade do solo, fertilidade, presença de camadas impermeáveis, incidência de pragas e doenças, cobertura vegetal, densidade de plantio e conteúdo de água no solo.

A evapotranspiração real (ETR) é difícil de ser medida devido ao longo período de observação necessário e aos custos elevados associados, já que envolve um processo complexo e altamente dinâmico, com a participação de organismos vivos, como solo e plantas. Por outro lado, a evapotranspiração potencial (ETP) pode ser estimada através de modelos baseados em princípios físicos e relações empíricas, proporcionando uma abordagem rápida e suficientemente precisa, o que permite obter medições confiáveis na maioria dos casos.

Dentre os métodos comumente utilizados para medir a evapotranspiração, estão as abordagens indiretas, que englobam métodos baseados em temperatura do ar, radiação solar, método combinado e balanço hídrico (Tucci; Beltrame, 2001).

Entre os métodos indiretos baseados na temperatura do ar estão as equações de Thornthwaite (1945), Thornthwaite e Blaney-Criddle, Camargo e Camargo (2000), Hargreaves-Samani por Hargreaves e Allen (2003). Já os métodos baseados na radiação solar há o exemplo da equação de Jesen-Haise (1963). O método combinado é também conhecido como equações de Penman (1956), Monteith (1965), Doorenbos e Pruitt (1975), Doorenbos e Kassam, (1994), Penman-Monteith FAO 56 por Allen *et al*. (1998). Por fim, o balanço hídrico objetiva quantificar a as macrovariáveis e seu comportamento ao longo do tempo, estudando os seguintes fatores: precipitação, umidade do solo, evaporação e vazão (Pivetta *et al*., 2010).

As medidas diretas podem ser obtidas por lisímetros, sondas de nêutrons, evapotraspirômetros e medidas de umidade do solo (Ometto, 1981).

Existem diversas formas de encontrar a evapotranspiração, e alguns métodos funcionam melhor para determinadas regiões. Ao levar em consideração a região estudada, deve-se atentar a metodologia que será utilizada.

O modelo de Penman Monteith, normalmente é adotado pelas estações meteorológicas como referência mundial da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO).

2.5.1 Modelo de Penman Monteith

O método de Penman-Monteith (PM), apresentado no Boletim 56 da FAO, foi estabelecido como o método-padrão para determinar a evapotranspiração de referência (ETo), por sua capacidade de se aproximar da evapotranspiração padrão da grama em diferentes locais e por sua precisão comparativamente maior em relação a outros métodos (Xing *et al*., 2008; Alencar; Sediyama; Mantovani, 2015). No entanto, é importante notar que em algumas condições climáticas, pode haver uma margem de erro de até 30% (Widmoser, 2009; Alencar; Sediyama; Mantovani, 2015).

Este método exige dados de radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento (Sousa, 2021). Portanto, ele também é utilizado para validar outros métodos (Sousa, 2021).

O método de Penman-Monteith - FAO é considerado o mais apropriado para medições de evapotranspiração de referência porque se baseia em princípios físicos e leva em conta todos os fatores climáticos que influenciam a evapotranspiração de referência (Lee; Najim; Aminul, 2004).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e caracterização da área experimental

O estudo foi instalado e conduzido no período de maio a novembro de 2023, na estação lisimétrica do Departamento de Bioprocessos e Biotecnologia - DBB, localizado na Faculdade de Ciências Agronômicas da (UNESP) Câmpus de Botucatu, nas coordenadas geográficas 22º84’72” S e 48º43’17” W, e coleta de dados da estação meteorológica automática (EMA) do Departamento de Engenharia Rural e Socioeconomia na Faculdade de Ciências Agronômicas, ambas estações estando uma ao lado da outra.

O município de Botucatu (Figura 5) está localizado no Centro-Sul do estado de São Paulo, Brasil, apresentando grande variação de altitude entre 400 a 500 m na região mais baixa (depressão periférica) e de 700 a 900 m no Planalto Ocidental Paulista (Dal Pai *et al*., 2016; Silva *et al*., 2017).

Figura 5 - Localização do município de Botucatu, no mapa do estado de São Paulo.



Fonte: IBB (2018).

Botucatu apresentou população crescente de 1,07% ao ano referente à média até 2021. Estima-se 149 mil habitantes e uma área territorial de aproximadamente 1.482,642 km² (IBGE, 2023). Possui como principal atividade a agropecuária, o cultivo da cana-de-açúcar, laranja, florestas de eucaliptos e pastagens, tendo como bioma Cerrado e Mata Atlântica (Dal Pai *et al*., 2016; Rossi *et al*., 2018; Lemes; Reboita; Rodrigues, 2020).

De acordo com a classificação climática de Köppen e Geiger (1928), o município de Botucatu, é classificado em “Aw” (Franco *et al*., 2023), caracterizado como clima tropical de savana, com estação seca bem definida e estação chuvosa no verão, de novembro a abril, e nítida estação seca no inverno, de maio a outubro (julho é o mês mais seco).

Conforme as normais climatológicas identificadas no período de 1991 a 2020, o município apresenta médias de temperaturas mínima de 18,28 ºC em julho, média de temperatura máxima de 23,80 ºC em fevereiro e temperatura média do ar de 21,34 ºC. A umidade relativa máxima do ar é de 75,76% em janeiro, mínima de 61,86% em agosto e média anal de 70%. A precipitação média anual é de 107 dias ao ano, com precipitação acumulada de 1.534,47 mm (Franco *et al*., 2023).

O solo da área de estudo, onde foi instalado o lisímetro de lençol freático para medidas experimentais de evapotranspiração, é classificado como Latossolo (vermelho/roxo) distroférrico, com textura franca argilo-arenosa.

As duas estações possuem sua superfície vegetada coberta por Grama Batatais (*Paspalum notatum* var. notatum), atendendo as diretrizes rigorosas da World Meteorological Organization (WMO) e da Food and Agriculture Organization (FAO), que tem como finalidade garantir a precisão e a consistência dos dados coletados (Pereira, 2019). Conforme as recomendações, a área é coberta por gramado mantido a uma altura de 10 cm, com plena capacidade hídrica, sem escassez nutricional e sem ocorrência de doenças.

Os dados da EMA que foram obtidos para o estudo foram a temperatura do ar, umidade relativa do ar, precipitação e velocidade do vento a 2 metros. Na Tabela 2 está a descrição das variáveis medidas e os modelos dos sensores presentes na Estação meteorologia.

Tabela 2. Descrição das variáveis medidas e modelos dos sensores presentes na EMA.

Variável Medida	Sensor (modelo)	Empresa
Temperatura do ar (Tar; ºC)	PT 100 TTD, IEC 751 13 classe B	Campbell Scientific®
Umidade Relativa do ar (UR; %)	Rotronic Hygromer IN-1	Campbell Scientific®
Precipitação (P; mm)	TB4 Rain Gauge	Campbell Scientific®
Velocidade do Vento (U_2; m/s)	MET One 034B Wind Set	Campbell Scientific®

Fonte: Elaborado pelo autor.

A estação lisimétrica (Figura 6) possui área retangular (15,6 m x 25,6 m), resultando em 399,36 m², apresentando uma declividade de 2%. Na área são cinco lisímetros de lençol freático constante instalados. Um dos lisímetros de lençol freático constante foi reinstalado e recalibrado ao longo do estudo para auxílio quanto às medidas experimentais de evapotranspiração.

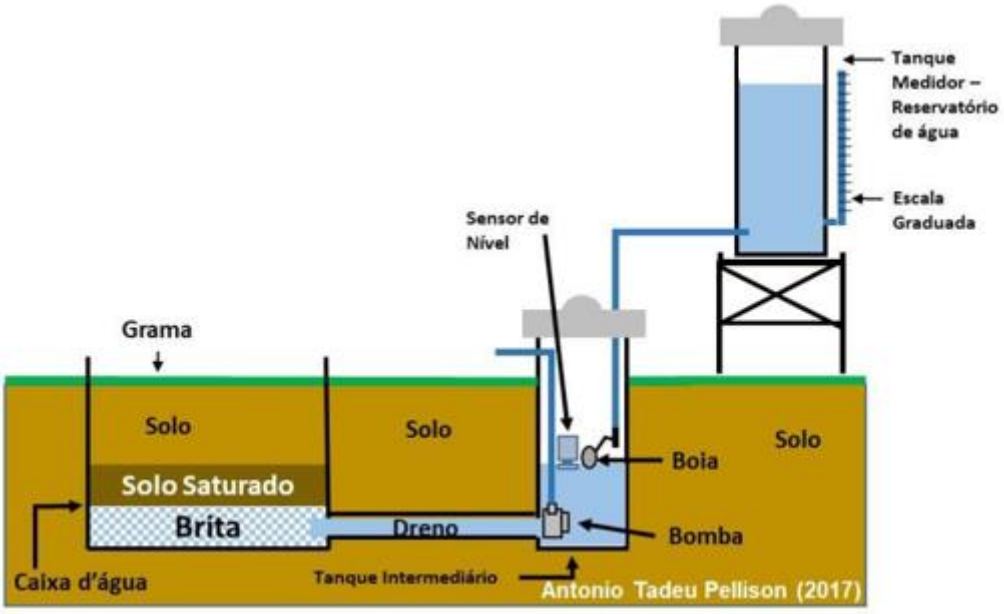
Figura 6 - Estação Lisimétrica da Faculdade de Ciências Agronômicas, Câmpus de Botucatu.



Fonte: Pellison (2018).

Os lisímetros de lençol freático constante (Figura 7), quando comparado aos demais tipos de lisímetros (drenagem e de pesagem), é o que apresenta menor dificuldade de manuseio, fornecendo os dados de evapotranspiração do cultivo de interesse diante da determinação do volume de água que sai do sistema de alimentação (tanque medidor) do lisímetro (Pereira; Angelocci; Sentelhas, 2007).

Figura 7 - Representação do lisímetro de lençol freático constante.



Fonte: Pellison (2018).

Um lisímetro de lençol freático constante mede a evapotranspiração (ET) de uma área ao manter constante o nível do lençol freático, simulando condições naturais de umidade do solo. Seus componentes principais incluem uma caixa d'água com solo, um tanque intermediário responsável por drenar e repor a água da caixa d'água, mantendo assim o nível do lençol freático constante, e por fim o tanque medidor que repõe a água evapotranspirada pelo sistema em um período, normalmente diário, indicando através da escala graduada a sua medida em milímetro (mm). As medições diárias são realizadas por serem fundamentais para a gestão de recursos hídricos na agricultura.

3.2 Instalação e condução do experimento

Para a instalação do lisímetro de lençol freático, considerou-se seus componentes principais: uma caixa d'água de 500 litros, um tanque medidor, um tanque intermediário, e a drenagem realizada por bombeamento.

A caixa d'água apresenta 0,58 m de altura, 1,22 m de diâmetro superior e 0,95 m de diâmetro inferior. É conectada ao tanque intermediário através de um tubo de PVC, para poder manter o nível freático a 25 cm da superfície.

O tanque medidor e o tanque intermediário foram conectados utilizando uma mangueira plástica. O tanque intermediário manteve o nível do lençol freático pelo princípio dos vasos comunicantes. Neste foi instalado um sensor de nível (Figura 8A) que tem como finalidade acionar a bomba d'agua caso ocorra precipitação, o que ocasiona a elevação do nível da água.

Figura 8 - Sensor de nível para acionamento do sistema de drenagem (A) e bóia de nível para controle da reposição de água (B).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o acionamento da bomba de recalque (Figura 9) a água que corresponde ao excedente do nível do lençol freático é drenada, portanto, mantem a caixa d'água e o tanque intermediários sempre no mesmo nível, correspondente a 25 cm abaixo da superfície.

Figura 9 - Bomba d'água Better 650.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Essa drenagem é necessária para que não afete a leitura do lisímetro após o período da chuva, já que demoraria dias para o nível do lençol freático diminuir. Manter a água sempre no nível do lençol freático quer dizer que o solo está sempre na sua capacidade de campo, portanto, a melhor condição de cultivo (Pellison *et al*., 2023).

No entanto, quando o nível da água baixar na caixa d'água decorrente da evaporação do solo e/ou transpiração da cultura (grama), o tanque intermediário respectivamente baixará o seu nível, pois estará realizando indiretamente a reposição de água ao sistema, através da capilaridade do solo. Sempre que o nível baixar no tanque intermediário, o tanque medidor deverá repor a água. Para isso, foi instalada uma bóia (Figura 8B) que controla o nível da água no tanque intermediário. Por tanto, quando o nível baixa no tanque intermediário, a bóia de nível permite que seja reposta a água necessária para o que o sistema mantenha o nível do lençol freático a 25 cm da superfície.

Essa água reposta no sistema é dimensionada na escala graduada (Figura 10) de vidro acoplado ao tanque medidor. As medidas geradas foram anotadas manualmente, diariamente sempre às 8 e 9 horas da manhã. Com a diferença de um dia para o outro, foi possível determinar a quantidade de água consumida diariamente pelo sistema.

Figura 10 - Escala graduada de vidro, componente acoplado ao tanque medidor do lisímetro de lençol freático constante.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Todos os dias, além de verificar a leitura da escala graduada de vidro, todos os componentes do lisímetro de lençol freático constante (Figura 11) eram verificados. Essa vistoria diária é necessária para detectar eventuais problemas que algum dos componentes pode apresentar. Assim que detectado qualquer problema, medidas cabíveis eram realizadas para uma manutenção adequada do equipamento como um todo, evitando-se o desequilíbrio do nível do lençol freático, que em momentos de manutenção acabavam por não se apresentar constante, consecutivamente podendo afetar a leitura da escala graduada, a qual reflete a adequada leitura do nível de água consumido naquele período de manutenção.

Figura 11 - Lisímetro de lençol freático constante instalado na estação de lisimetria na Fazenda Lageado Botucatu, São Paulo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.3 Aquisição e processamento de dados

Os dados obtidos diariamente referentes as medidas da escala graduada em centímetros do lisímetro de lençol freático constante, compuseram um banco de dados do período de maio a novembro de 2023.

Os dados diários da leitura da escala graduada representam o quanto de água o sistema consumiu de água no período de 24 horas, a partir da sua leitura anterior. O lisímetro de lençol freático constante tem por finalidade medir a evapotranspiração

diária, sendo assim, a quantia mensurada é correspondente à evapotranspiração do sistema.

Para a obtenção dos dados de evapotranspiração a partir dos dados obtidos pela escala graduada, se fez necessário aplicar alguns critérios. O conhecimento das dimensões dos componentes do equipamento foi necessário para determinar a sua equivalência.

As dimensões da caixa d'água e do tanque medidor precisaram ser determinadas, já que uma tem a finalidade de fornecer água ao SSPA, enquanto o tanque medidor tem a finalidade de repor a água no sistema do lisímetro de lençol freático como um todo, portanto, repõe-se a água consumida pelo SSPA na caixa d'água. Consecutivamente, um componente abastece o outro, e, portanto, é necessário realizar a sua equivalência de medidas.

As dimensões da caixa d'água são de 122 cm de largura, e 58 cm de altura. O tanque medidor tem 29,5 cm de largura e 80 cm de altura.

Utilizando as medidas equivalentes ao diâmetro do tanque medidor de 29,5 cm e da caixa d'água de diâmetro superior de 122 cm e inferior de 95 cm, determinou-se a respectiva área (Equação 1) de cada um.

$$A = \pi r^2 \quad (1)$$

Sendo:
A: área; r: raio.

Em seguida, conforme metodologia de Pellison (2018), fez-se necessário encontrar o fator de conversão (Equação 2), para equivaler o volume de água reduzido no tanque medidor com o volume de água resposto na caixa d'água. Essa equivalência de água (Equação 3) entre as estruturas foi obtida utilizando os seus respectivos volumes (Equação 4), visto que o volume deslocado no tanque é o mesmo que foi consumido pelo lisímetro (consumo da grama e solo), porém como área de superfície e altura são diferentes, o fator f de conversão foi utilizado.

$$f = \frac{V1}{V2}\ 10$$

(2)

$$\Delta V1 = \Delta V2 \quad (3)$$

$$V = A\ H \quad (4)$$

Sendo:
V1: volume do tanque medidor; V2: volume da caixa d'água; f: fator de conversão; H: altura.

O fator de conversão entre ambos os componentes foi determinado em 0,61 mm. Esse fator foi utilizado na Equação 5, multiplicando com a leitura diária (LD) obtida na escala graduada de vidro. A determinação da leitura para o caso específico do estudo atual, foi realizada aplicando a subtração a leitura do dia 2 pela da leitura do dia 1, devido a escala graduado estar com a medição de 0 cm na parte superior e 50 cm na parte inferior. Sugere-se que para eventuais futuros estudos, sejam incorporadas escalas graduadas onde a leitura se inicie pelo volume máximo do tanque se encerrando no mínimo, inversamente ao aplicado nesse estudo, pois assim, facilitará a aplicação da equação, sem gerar dúvidas quanto ao valor aumentar na escala e não diminuir, como ocorre nesse estudo.

$$ET = (LD2 - LD1)\ f \quad (5)$$

Sendo:
ET: evapotranspiração (mm); LD1: leitura do dia 1 (mm); LD2: leitura do dia 2 (mm).

Portanto, os valores diários eram obtidos em cm pela escala graduado, no entanto era convertido para mm para padronizar com as medidas das demais metodologias aplicadas no estudo. Com isso, gerou-se médias diárias e médias mensais.

3.4 Aplicação dos modelos matemáticos para mensurar a evapotranspiração.

Após encontrados os dados de evapotranspiração (ET) por meio da leitura diária do lisímetro de lençol freático constante, fez-se necessário mensurar os valores de evapotranspiração de referência (ETo) diária, obtida pelo modelo de Penman-Monteith, para posteriormente calcular sua média mensal.

3.4.1 Penman-Monteith (PM)

No estudo, o modelo de Penman-Monteith (PM) foi utilizado como referência para medir a evapotranspiração, exigindo a determinação dos componentes da equação antecipadamente. O fluxo de calor no solo (G; MJ/m2.dia), de acordo com Allen *et al*. (1998), foi considerado como nulo (G ≈ 0). Essa suposição é válida ao se trabalhar com dados estimados de ETo pelo modelo PM-FAO 56 em escala diária, onde G é tratado como zero.

A temperatura do ar reflete a energia presente no ambiente, variando ao longo do dia entre dois extremos, definidos como temperatura mínima e máxima do ar. Além das variações diárias, há mudanças de temperatura do ar ao longo do ano, influenciadas pela posição da Terra em relação à radiação solar (Vieira; Piculli, 2009). A temperatura média diária do ar (T) foi calculada aplicando uma média simples, conforme especificado pela Equação 6, de acordo com os critérios do modelo.

$$T = \frac{Tmáx + Tmín}{2} \quad (6)$$

Sendo:
T: Temperatura média do ar diária (ºC); Tmáx: Temperatura máxima do ar diária (ºC); Tmín: Temperatura mínima do ar diária (ºC).

Para a determinação da temperatura do ar são utilizados sensores que tem a capacidade de determiná-la. Os dados utilizados de temperatura máxima e mínima do ar são fornecidos pela EMA, assim como o a umidade relativa do ar.

A umidade relativa do ar é a interação entre a quantidade de água presente na atmosfera em forma de vapor sem que ocorra precipitação, com o seu ponto de saturação. Está diretamente ligada ao ciclo hidrológico, já que o processo de evaporação de superfícies, através do processo de transpiração realizado pelas plantas e animais, realizando assim a transferência de vapor de água para a atmosfera (Ynoue *et al*., 2017). A umidade relativa do ar é observada em estações meteorológicas por meio de aparelhos como higrômetros, termo-higrômetros e psicrômetros (Montanha, 2022). A umidade relativa média do ar (UR) foi determinada aplicando a média simples, atendendo critérios do modelo, conforme Equação 7:

$$\mathrm{UR} = \frac{\mathrm{URmáx+URmín}}{2} \quad (7)$$

Sendo:

UR: Umidade relativa média do ar diária (ºC); URmáx: Umidade relativa máxima do ar diária (ºC); URmín: Umidade relativa mínima do ar diária (ºC).

A pressão de saturação à temperatura de bulbo seco (es) e a pressão atual de vapor d'água (ea), podem ser determinadas pelas Equações 8 e 9:

$$\mathrm{es} = 0{,}6108\ \exp^{\frac{(7{,}5\ \mathrm{T})}{237{,}3+\mathrm{T}}} \quad (8)$$

$$\mathrm{ea} = \mathrm{es}\frac{\mathrm{UR}}{100} \quad (9)$$

Sendo:

T: temperatura de bulbo seco diário (°C); ea: pressão atual de vapor d'água diário(kPa); es: pressão de vapor de saturação à temperatura de bulbo seco diário(kPa); UR: umidade relativa do ar diário (%).

A declividade da curva de pressão de vapor (s) foi determinada aplicando a Equação 10:

$$s = \frac{4098\ es}{(T+237,3)^2} \quad (10)$$

Sendo:
es: pressão de saturação à temperatura de bulbo seco diária (kPa); T: temperatura média diária do ar (°C).

Os deslocamentos horizontais de uma massa de ar caracterizam-se como vento, ocorrendo sempre de uma área de maior pressão atmosférica para uma área de menor pressão atmosférica, transportando características como a temperatura do ar e a precipitação. A direção e velocidade são quantificadas através de variações das condições presentes na atmosfera, temporais e espaciais, apresentando uma estreita correlação com o relevo, que impacta a velocidade do vento (Varejão-Silva, 2006; Mendonça; Danni-Oliveira 2007; Ynoue *et al*., 2017; Montanha, 2022). A velocidade do vento (U2) é medida por meio de um anemômetro, podendo ser medido em metros por segundo, quilômetros por hora ou em nós.

Os modelos de evapotranspiração, como o modelo de Penman-Monteith, usam o saldo de radiação solar juntamente com outras variáveis meteorológicas, como temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e pressão atmosférica, para medir a quantidade de água que é evaporada e transpirada da superfície para a atmosfera. Essas medições são essenciais para várias aplicações, incluindo a gestão da água, a agricultura, a previsão do tempo, a climatologia e a pesquisa ambiental (Sarnighausen *et al*., 2021).

O balanço de radiação solar ou saldo de radiação solar sobre a superfície é a contabilização líquida de toda a energia radiante presente no sistema solo-atmosfera, resultando na radiação líquida solar (Rn), utilizada nos processos de aquecimento e resfriamento do solo e do ar, evaporação da água, processos fisiológicos dos seres vivos, como a fotossíntese e a transpiração nos vegetais (Dantas *et al*., [20--]).

Os dados de saldo de radiação solar foram obtidos através da literatura (IQBAL., 1983), onde é necessário saber o dia juliano para encontrar o fotoperíodo (Equação 11). A declinação solar (Equação 12), o calor sensível (Equação 13), O fator de correção da excentricidade da orbita terrestre (Equação 14), ângulo zenital (Equação 15), radiação solar no topo da atmosfera (Equação 16), distância relativa Terra-Sol (Equação 17), o ângulo horário solar diário horizontal (Equação 18),

radiação solar de ondas curtas em condições de céu aberto (Equação 19), balanço de ondas longas (Equação 20), balanço de ondas curtas (Equação 21), radiação solar líquida total diária (Equação 22).

$$F = \frac{360\ DJ}{365} \tag{11}$$

$$\delta = 0{,}3964 + 3{,}631\text{sen}(F) - 22{,}97\cos(F) + 0{,}03838\text{sen}(2F) - 0{,}3885\cos(2F) + 0{,}07659\text{sen}(3F) - 0{,}1587\cos(3F) - 0{,}01021\cos(4F) \tag{12}$$

$$H = \text{arc}\cos(-\text{tg}(\phi)\,.\,\text{tg}(\delta)) \tag{13}$$

$$EXC = 1 - 0{,}0009467\text{sen}(F) - 0{,}01671\cos(F) - 0{,}0001489(2F) - 0{,}00002917\text{sen}(3F) - 0{,}0003438\cos(4F) \tag{14}$$

$$Z = \text{sen}(\delta)\text{sen}(\phi) + \cos(\delta)\cos(\phi)\,\text{sen}(H) \tag{15}$$

$$Ra = Gsc\ \ Z\ \ dr\ \ Tsw \tag{16}$$

$$dr = 1 + 0{,}33\cos\left(\frac{2\pi}{365}DJ\right) \tag{17}$$

$$Tsw = 0{,}75\ \ 2(10^{-5})\,Z \tag{18}$$

$$Rso = (a + b)Ra \tag{19}$$

$$BOL = 4{,}903\ \ 10^{-9}\left(\frac{(Tmáx+273{,}15)^4+(Tmín+273{,}15)^4}{2}\right)\left(0{,}14\sqrt{ea} - 0{,}34\right)\left(0{,}1 + 0{,}9\frac{Rnl}{RSO}\right) \tag{20}$$

$$BOC = (1 - \alpha)\,Rnl \tag{21}$$

$$Rn = BOC + BOL \tag{22}$$

Sendo:

DJ: Dia juliano; F: fotoperíodo; δ: declinação solar (radianos); ϕ: -22,85 referente a latitude geográfica; δ: declinação solar (radianos); EXC: fator de correção da excentricidade da orbita terrestre; Z: ângulo zenital (º); Ra: radiação solar no topo da atmosfera (MJ m-2 dia-1); Gsc: constante, 0,0820 (MJ m-2 min-1); dr: distância relativa Terra-Sol; a: 0,273 (fator de intercepto); b: 0,471 (coeficiente angular); Rso: radiação solar de ondas curtas em condições de céu aberto (MJ.m-2.d-1); BOL: balanço de ondas longas (MJ.m-2.d-1); Tmáx: temperatura máxima do ar (ºC); Tmín: Temperatura mínima do ar (ºC); ea: pressão atual de vapor d'água (kPa); Rnl: radiação solar refletida pela superfície (MJ.m-2.d-1); α: 0,23 referente a coordenada geográfica do local do experimento; Rn: radiação solar líquida total diária (MJ.m-2.d-1); BOC= balanço de ondas curtas (MJ.m-2.d-1).

Com todos os componentes determinados, torna-se possível aplicar a Equação 23, que expressa o modelo de Penman-Monteith para a obtenção da evapotranspiração diária.

$$\mathrm{ETo} = \frac{0{,}408\ s\ (\mathrm{Rn}-\mathrm{G})+\left(\gamma\frac{900}{\mathrm{T}+273}\right)\mathrm{U2}\ (\mathrm{es}-\mathrm{ea})}{s+(\gamma\ (1+0{,}34\ \mathrm{U2}))} \quad (23)$$

Sendo:

ETo: evapotranspiração de referência (mm); Rn: radiação solar líquida total diária ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$); G: fluxo de calor no solo ($MJ.m^{-2}.d^{-1}$); γ: constante psicrométrica de -0,063 Kpa $ºC^{-1}$; T: temperatura média do ar (ºC); U2: velocidade do vento a 2 m ($m.s^{-1}$); es: pressão de saturação de vapor (kPa); ea; pressão parcial de vapor (kPa); s: declividade da curva de pressão de vapor na temperatura do ar (kPa).

3.5 Indicadores de validação do desempenho do lisimetro de lençol freático connstante

Para verificar o desempenho das medidas obtidas de evapotranspiração diária e mensal por diferentes métodos, foram utilizados indicadores de validação como a

raiz do erro quadrático médio (RMSE – Equação 24), erro médio absoluto (MAE – Equação 25), índice de Willmott (d – Equação 26), erro absoluto médio (MBE – Equação 27), coeficiente de correlação de Pearson (r – Equação 28), MBE relativo (rMBE – Equação 29), RMBE relativo (rRMBE – Equação 30), coeficiente de confiança (c – Equação 31), e o erro relativo (Equação 32).

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Y_i - Y_i^{'}\right)^2}{n}} \tag{24}$$

$$\mathrm{MAE} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left|Y_i - Y_i^{'}\right| \tag{25}$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Y_i^{'} - Y_i\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}\left(\left|Y_i^{'} - Y\right| + \left|Y_i - Y\right|\right)^2}\right] \tag{26}$$

$$\mathrm{MBE} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(Y_i^{'} - Y_i\right) \tag{26}$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Y_i^{'} - x\right)\left(Y_i - Y\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(Y_i^{'} - x\right)^2 \sum_{i=1}^{n}\left(Y - Y_i\right)^2}} \tag{28}$$

$$\mathrm{rMBE}(\%) = \frac{\mathrm{MBE}}{\bar{Y}}\ 100 \tag{29}$$

$$\mathrm{rRMSE}(\%) = \frac{\mathrm{RMBE}}{\bar{Y}}\ 100 \tag{30}$$

$$c = r\ d \tag{31}$$

$$\text{Erro relativo} = \frac{\text{Valor estimado} - \text{Valor verdadeiro}}{\text{Valor verdadeiro}}\,100 \tag{32}$$

Sendo:

Yi´ : valor estimado da evapotranspoiração pelo modelo de Penman-Monteith; Yi : valor obtido pelo lisimetro; Y : média dos valores de interesse; x: média dos valores de evapotranspiração estimada pelos modelos empíricos; MBE: erro absoluto médio; RSME: raiz do erro quadrático médio; rMBE: erro absoluto médio relativo; rRSME: raiz

do erro quadrático médio relativo; d: índice de concordância de Wilmott (1985) com valores entre 0 (concordância nula) e 1 (concordância perfeita); r: coeficiente de correlação de Pearson; MAE: erro médio absoluto; $ETest$: valores a serem testados; $ETobs$: valores medidos no local; N: números de pares de observações.

Os valores de MAE, MBE e RMSE indicam a incerteza dos modelos, onde quanto mais próximo o valor de zero, melhor o desempenho dos modelos analisados. O valor de MBE descreve o desvio das médias, com valores positivos indicando superestimativa e valores negativos à subestimativa dos dados. Entretanto, um valor negativo cancela um valor positivo (TERAMOTO *et al*., 2020). Se não encontrados valores negativos, o MAE é a diferença absoluta média entre os dados observados e estimados, não sofrendo alterações em seu resultado, decorrente de outlier nos valores analisados (MARINHO *et al*., 2022).

O índice RMSE pode obter valores significativos em sua magnitude, devido a sua sensibilidade a outlier. Entretanto é considerado um excelente indicador de desempenho (ULIANA *et al*., 2020).

Os valores relativos rMBE e rRMSE fornecem o grau de correspondência percentual proporcional à média da observação (Rincón *et al*., 2018; Raniero, 2020).

O índice de Willmott *et al*. (1985), indica o índice de concordância, com seus valores variando entre 0 (nenhuma concordância) e 1 (concordância perfeita).

O valor de coeficiente de Person é definido entre -1 e +1, indicando o nível de associação entre duas variáveis. O sinal de negativo indica que as variáveis são inversamente relacionadas. Já o sinal positivo indica uma relação direta das variáveis analisadas. Quanto mais próximo ao valor 1, maior correlação (FIALLOS, 2021).

O resultado do coeficiente de confiança (c) é um valor sem dimensão, podendo variar entre 0 e 1, com o resultado 1 representando um ajuste completo e 0 a total falta de ajuste do modelo (Tabela 3).

Tabela 3 - Faixas de valores do Coeficiente de confiança (c).

C	Desempenho
>0,85	Ótimo
0,76-0,85	Muito bom
0,66-0,75	Bom
0,61-0,65	Mediano
0,51-0,60	Sofrível
0,41-0,50	Mau
<0,40	Péssimo

Fonte: Elaborado pelo autor.

Serão analisados também dados de média (Equação 32), desvio padrão (Equação 33), e coeficiente de variação (Equação 34) de todos os dados obtidos ao longo do período de estudo.

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^{n} x_1}{n} \tag{32}$$

$$\theta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (x_i - \mu)^2}{n}} \tag{33}$$

$$C.V. = \frac{\theta}{\mu}\ 100\% \tag{34}$$

Sendo:
x: valor de interesse para encontrar a mediana; μ: média; n: número total de dados; θ: desvio padrão; C.V.: coeficiente de variação.

Também será analisada a mediana, que é o valor central em um conjunto de dados ordenados. Se o número de observações for ímpar, a mediana é simplesmente o valor da posição da mediana (Equação 35), no entanto, se o número de observações for par, a mediana é a média dos dois valores centrais (Equação 36).

$$Md = x_{\left(\frac{n+1}{2}\right)} \tag{35}$$

$$Md = \frac{\left(x_{\left(\frac{n}{2}\right)} + x_{\left(\frac{n}{2}+1\right)}\right)}{2} \tag{36}$$

Sendo:

Md: mediana; x: valor de interesse para encontrar a mediana; n: número total de dados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Durante o período de maio a novembro de 2023, foram analisados os dados coletados sobre precipitação, velocidade do vento a 2 metros de altura, temperaturas máxima, mínima e média do ar, além da umidade relativa máxima, mínima e média, obtidos pela EMA. Esses dados foram utilizados para cálculo da evapotranspiração pelo modelo matemático de Penman-Monteith.

O lisimetro de lençol freático constante foi calibrado ao longo do tempo, com períodos de manutenção, e por fim foi avaliado quanto à concordância ao modelo de Penman-Monteith, por meio de medidas diárias de evapotranspiração.

4.1 Dados da Estação Meteorológica Automática (EMA)

Os dados meteorológicos utilizados para o período do estudo foram fornecidos pela Estação Meteorológica Automática (EMA) do Departamento de Engenharia Rural e Socioeconômico da Faculdade de Ciências Agronômicas da (UNESP), Câmpus de Botucatu (Tabela 4).

Tabela 4 - Dados médios mensais de temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação solar, velocidade do vento a 2 metros e precipitação acumulada fornecido pela EMA no período de maio a novembro de 2023.

Anos	Precipitação (acumulada)	Umidade Relativa do ar (media)	Temperatura do ar (média)	Velocidade do Vento a 2 metros	Radiação Solar (média diária)
	(mm)	(%)	(ºC)	(m/s)	(MJ/m².dia)
Maio	16,76	73,00	19,50	0,99	14,75
Junho	56,64	70,24	18,10	0,73	13,34
Julho	30,23	68,63	18,57	1,00	14,01
Agosto	9,90	63,86	20,94	1,22	15,35
Setembro	72,64	62,47	24,09	1,24	18,87
Outubro	211,08	79,62	23,16	1,22	16,75
Novembro	117,09	70,83	25,17	1,38	22,20

Fonte: Elaborado pelo autor.

No período de estudo, o mês com maior precipitação acumulada foi outubro com 211,08 mm, e o menor em agosto com 9,90 mm, sendo o esperado para o município de Botucatu, assim como o mês que apresentou maior temperatura do ar foi novembro com 27,17 ºC, e o menor foi em junho com 18,10 ºC.

Na Tabela 5 constam informações referentes às medidas descritivas importantes para diferentes variáveis meteorológicas, incluindo temperatura do ar, velocidade do vento, radiação solar, umidade relativa do ar e precipitação do período experimental.

Tabela 5 - Medidas descritivas, média, mediana, desvio padrão e coeficiente de variação, para os valores meteorológicos de temperatura do ar, velocidade do vento à 2 metros, radiação solar, umidade relativa do ar e, precipitação.

Medida	Média	Mediana	Desvio Padrão	C.V.
Temperatura do ar (ºC)	21,26	21,27	3,86	18,16
Velocidade do Vento a 2 metros (m/s)	1,10	0,90	0,82	74,42
Radiação Solar (MJ/m².dia)	16,38	16,05	5,51	33,65
Umidade Relativa do ar (%)	69,29	69,86	12,34	17,81

C.V.: Coeficiente de Variação. **Fonte**: Elaborado pelo autor.

Os dados da Tabela 5 mostram a variabilidade dos dados referentes aos parâmetros meteorológicos ao longo do período experimental indicando seus respectivos coeficientes de variação, que caracteriza dispersões dos dados em relação à média. De acordo com Castanheira (2023), isso indica uma maior instabilidade ou variação relativa dos dados, principalmente em relação a precipitação e velocidade do vento a 2 metros de altura, variáveis essas de extrema importância para o cálculo de evapotranspiração e que corrobora com o esperado para o período analisado devido à sazonalidade em questão.

A seguir, cada uma das variáveis é analisada:

4.1.1 Precipitação

Observa-se na Tabela 4 que a mediana é muito menor que a média, ocorrendo devido a presença de alguns valores muito altos, que ocasiona no aumento da média. O desvio padrão é superior à média dos dados, evidenciando que os dados do período analisado estão mais dispersos em relação à média, indicando variabilidade dos mesmos. Esta variabilidade é confirmada em vista do valor do coeficiente de variação que reforça a baixa confiabilidade da média calculada. Desse modo, tal valor de média não representa os valores de precipitação do período, devido à grande variabilidade dos dados em consequência da sazonalidade presente no período de estudo.

A precipitação acumulada (Tabela 6) no período amostrado foi de 514,44 mm, com 16,76 mm em maio, 56,64 mm em junho, 30,33 mm em julho, 9,90 mm em agosto, 72,64 mm em setembro, 211,08 mm em outubro e 117,09 mm em novembro.

Tabela 6 - Comparação da precipitação acumulada (mm) do período amostrado (2023) com a média da série de 1991 a 2020.

Anos	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro
				(mm)			
1991-2020	79,69	54,84	41,85	38,60	80,72	113,03	140,01
2023	16,76	56,64	30,33	9,90	72,64	211,08	117,09

Fonte: Franco *et al*. (2023).

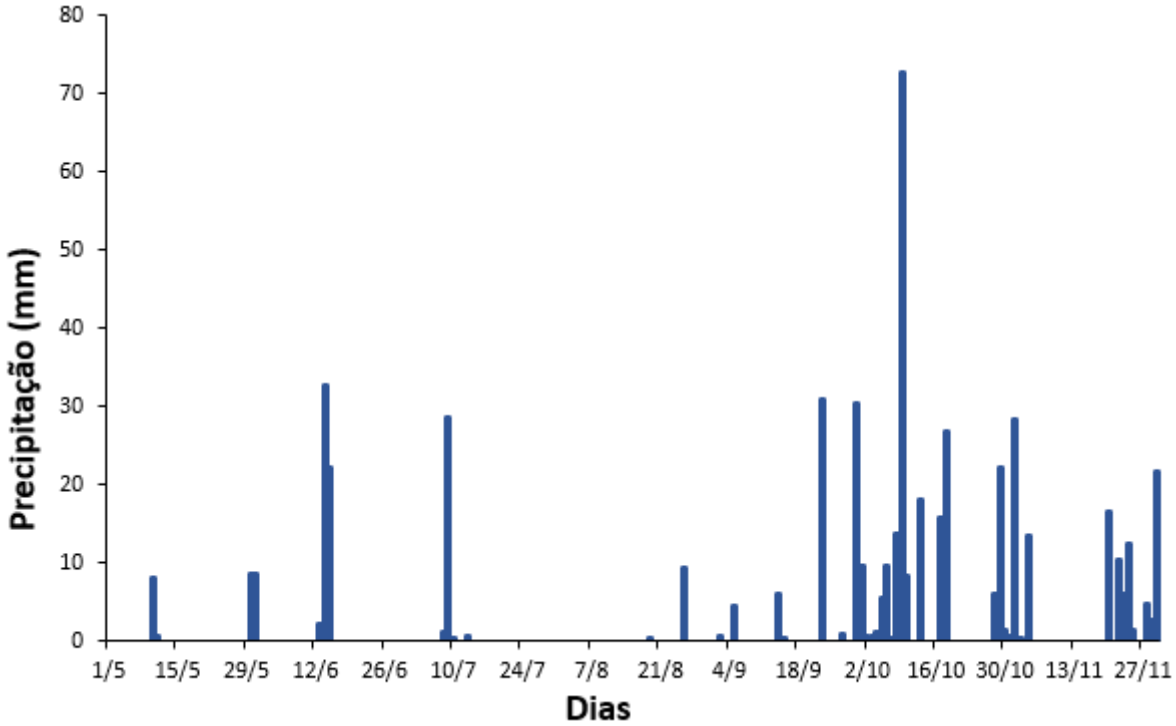
Dessa forma, nos dias e períodos em que a precipitação estava presente, as medidas de evapotranspiração foram ajustadas ou descartadas. Períodos longos de precipitação fazem com que normalmente as medidas de evapotranspiração sejam ignoradas, já que com o solo saturado o equipamento não realiza a reposição de água, e consecutivamente não ocorre medição. Em curtos períodos de precipitação, o ajuste é feito ao analisar a medida do dia e o quanto houve de precipitação no mesmo dia e a medida do dia posterior.

Utilizando uma série histórica de 1991 à 2020, Franco *et al*. (2023) observaram que a distribuição da precipitação pluviométrica mensal mensurado para o município de Botucatu foi de 79,69 mm em maio, 54,84 mm em junho, 41,85 mm em julho, 38,60 mm em agosto, 80,72 mm em setembro, 113,03 mm em outubro e 140,01 mm em novembro, com precipitação acumulada de 548,75 mm para esses meses (Tabela 6).

As maiores precipitações acumuladas foram observadas em outubro e novembro, tanto para o período estudado, como para o período histórico (Franco *et al*., 2023). O mesmo ocorreu para as menores precipitações acumuladas, observadas para ambos, em julho e agosto. Além disso, quando comparadas as precipitações acumuladas, observa-se que a precipitação acumulada do período de estudo foi de 514,44 mm, enquanto que a precipitação acumulada da série histórica foi de 548,75 mm, indicando uma precipitação 6,3% abaixo da série histórica.

Segundo Cunha e Martins (2009), em Botucatu ocorrem deficiências hídricas o que corrobora com o observado no período estudado (Figura 12) nos meses de abril, julho e agosto, e o período chuvoso se concentra nos meses de primavera-verão, com índices hídricos relativamente elevados.

Figura 12 - Dados de precipitação (mm) no período de maio a novembro de 2023.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Comparando os dados observados em estudo de Franco *et al*. (2023) com os dados obtidos no período amostrado deste estudo, observa-se que a precipitação de maio a novembro está 6,3% abaixo do esperado, com exceção de outubro, que choveu 86% acima do esperado para o mês. Isso pode estar relacionado ao fenômeno

climático “El Niño”, que ocorre desde 2023, e de acordo com Varotsos *et al*. (2024), tem previsão de se prolongar até meados de 2024, quando se encerra o verão no hemisfério sul.

De acordo com Alves *et al*. (2005) e Paiva (1997), o período chuvoso (PC) na região Sudeste do Brasil concentra-se entre os meses de outubro a março, quando ocorrem mais de 80% do total anual de chuvas. No entanto, quando o “El Niño” ocorre, algumas regiões do estado de São Paulo podem ser afetadas por estiagens e secas. Tende-se com esse fenômeno ter o aumento do PC, que resulta em enchentes e deslizamentos de terras, como também aumento da temperatura do ar durante a ocorrência do fenômeno, assim como alteração do comportamento do vento nesse período (Minuzzi *et al*., 2006).

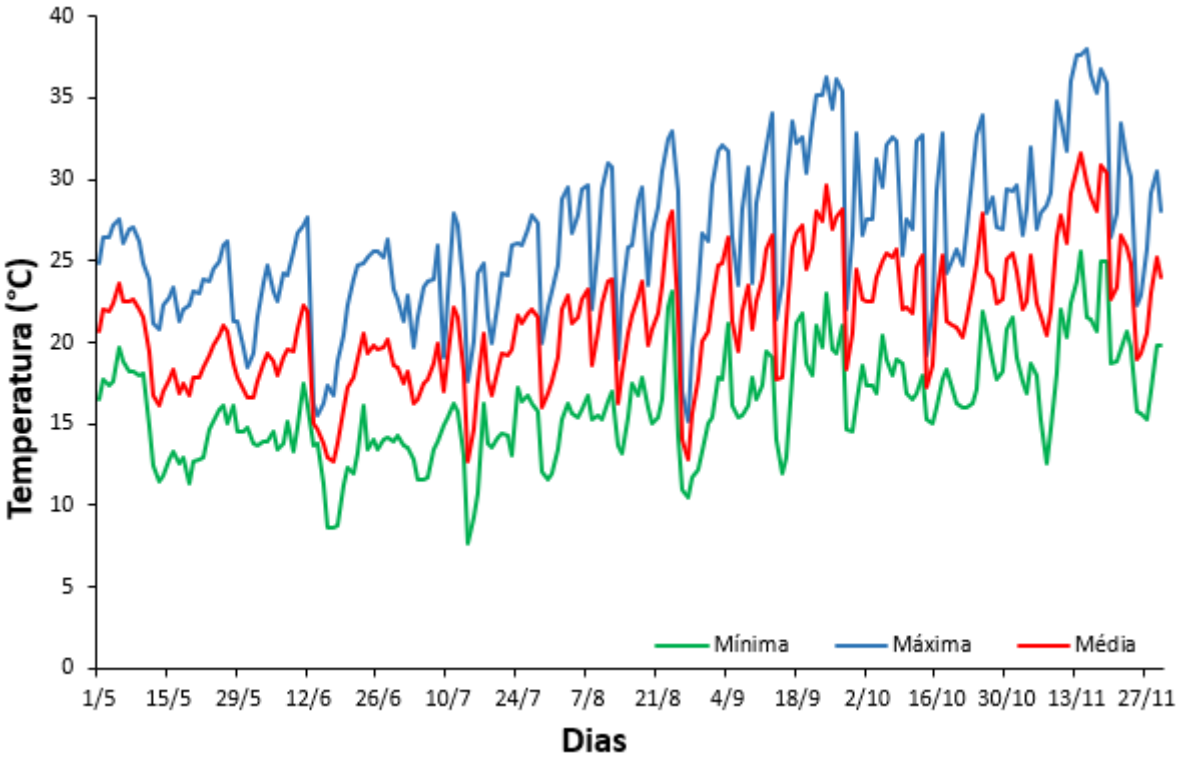
A mensuração da precipitação é indispensável devido ao seu alto grau de importância, devido ao seu papel crucial no balanço hídrico, sendo a única forma de entrada de água em uma bacia hidrográfica (Collischonn; Tassi, 2008; Ynoue *et al*, 2017, Montanha, 2022).

4.1.2 Temperatura do ar

A média e a mediana (Tabela 4) dos valores de temperaturas do ar do período analisado são próximas, o que sugere uma distribuição simétrica dos dados. O desvio padrão é inferior à média indicando baixa variabilidade em torno da média. O coeficiente de variação é superior à média, podendo estar relacionado com alguns picos de valores de temperatura do ar ao longo do período, apontados no Figura 10, indicando o esperado para o período devido à sazonalidade presente no período de análise.

Foram analisados também os dados de temperatura máxima, mínima e média do ar ao longo do estudo (Figura 13).

Figura 13 - Dados da temperatura máxima, mínima e média do ar no período de maio a novembro de 2023.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo Escobedo *et al*. (2009), o município de Botucatu apresenta temperatura média do ar no verão de 22,7 ºC, enquanto no inverno apresenta o valor de 17,6 ºC. De acordo com Cunha e Martins (2009), o município apresenta temperatura média anual do ar de 20,3 ºC, com temperaturas do ar de 17,1 ºC no verão e 24,62 ºC. Em estudo de Sarnighausen *et al*. (2021), foi observada a temperatura média do ar de maio foi de 17,85 ºC, junho de 16,13 ºC, julho de 18,28 ºC, agosto de 18,92 ºC, setembro de 19,27 ºC, outubro de 21,06 ºC e novembro de 21,48 ºC (Tabela 7). Já a série histórica de 1991-2020 (Franco *et al*., 2023), observa-se que a temperatura média do ar de maio foi de 19,12 ºC, junho de 18,31 ºC, julho de 18,28 ºC, agosto de 19,47 ºC, setembro de 20,71 ºC, outubro de 22,03 ºC, e novembro de 22,41 ºC.

Tabela 7 - Comparação da temperatura média do ar (°C) do período amostrado (2023) com a temperatura média do ar em 2021 e da série histórica de 1991-2020 (Franco *et al*. 2023).

Anos	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro
	(ºC)						
1991-2020	19,12	18,31	18,28	19,47	20,71	22,03	22,41
2021	17,85	16,13	18,28	18,92	19,27	21,06	21,48
2023	19,50	18,10	18,57	20,94	24,09	23,16	25,17

Fonte: Sarnighausen *et al*. (2021).

Para o período analisado a temperatura máxima do ar foi de 38 ºC em novembro, a mínima de 7,69 ºC em julho, e a temperatura média do ar do período de 20,63 ºC.

As temperaturas do ar nesse período estão acima das esperadas, também possivelmente relacionados ao fenômeno climático “El Niño”. Além disso, estudos vêm sendo realizados sobre o aumento de temperaturas do ar ocasionados pelo aquecimento global, como estudado por Blain; Picoli e Lulu (2009) onde discutem as tendências de aumento das temperaturas mínimas do ar no estado de São Paulo, assim como em estudo de Marengo e Alves (2015), onde observaram o aumento de 2,5 ºC, relacionado com um dos fatores da crise hídrica em São Paulo em 2014.

De acordo com Beyruth (2008), as principais consequências do aumento da temperatura do ar são: mudanças climáticas; derretimento de gelos e elevação do nível do ar; impacto nos ecossistemas; agricultura e segurança alimentar; saúde humana; escassez de água; eventos climáticos extremos; economia; migração e conflitos; e acidificação dos oceanos. O aumento da temperatura do ar é um fator preocupante já que afeta a agricultura, causando variações na produção de culturas e na disponibilidade de água para irrigação. Isso pode levar à escassez de alimentos e ao aumento dos preços.

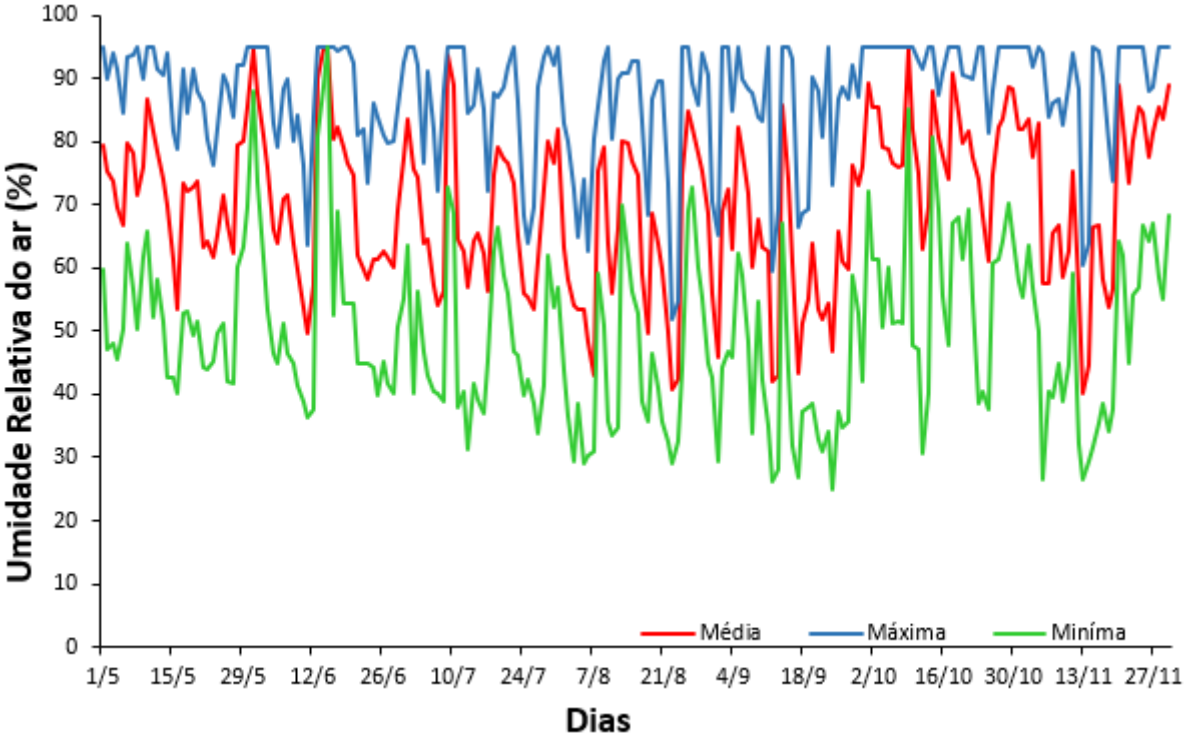
4.1.3 Umidade relativa do ar

A mediana da umidade relativa do ar é maior que a média (Tabela 4), sugerindo uma distribuição assimétrica, apresentando alguns valores baixos de umidade comparando com os valores dos dados, diminuindo a média. O desvio padrão é menor

que a média e o coeficiente de variação está em torno de 18 %, indicando baixa variabilidade em relação à média, quando comparado com os demais parâmetros analisados.

Dados de umidade relativa do ar máxima, mínima e média (Figura 14) também foram analisados.

Figura 14 - Dados da umidade relativa máxima, mínima e média do ar no período de maio a novembro de 2023.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Conforme Escobedo *et al*. (2009), o município apresenta umidade relativa do ar no verão de 78,2%, enquanto no inverno apresenta o valor de 67,3%.

Em estudo de Sarnighausen *et al*. (2021), foi observada umidade relativa do ar média do período de maio de 79,92%, junho de 75,59%, julho de 60,84%, agosto de 64,94%, setembro de 66,02%, outubro de 73,35% e novembro de 76,14%, e média do período de 70,97% (Tabela 8).

Tabela 8 - Comparação da umidade relativa média do ar (%) do período amostrado (2023) com umidade relativa média do ar em 2021 e da série histórica de 1991-2020 (Franco *et al*. 2023).

Anos	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro
				(%)			
1991-2020	71,38	69,95	64,95	61,87	65,61	68,84	70,40
2021	79,92	75,59	60,84	64,59	66,02	73,35	76,14
2023	73,00	70,24	68,63	63,86	62,47	79,62	70,83

Fonte: Sarnighausen *et al*. (2021).

Na série histórica de 1991-2020 (Franco *et al*., 2023), a umidade relativa do ar em maio foi de 71,38%, junho de 69,95%, julho de 64,95%, agosto de 61,87%, setembro de 65,61%, outubro de 68,84% e novembro de 70,40%.

A umidade relativa do ar média para o período amostrado foi de 70,14%, com mínima de 24,87% em setembro e máxima de 95% se repetindo em todos os meses amostrados.

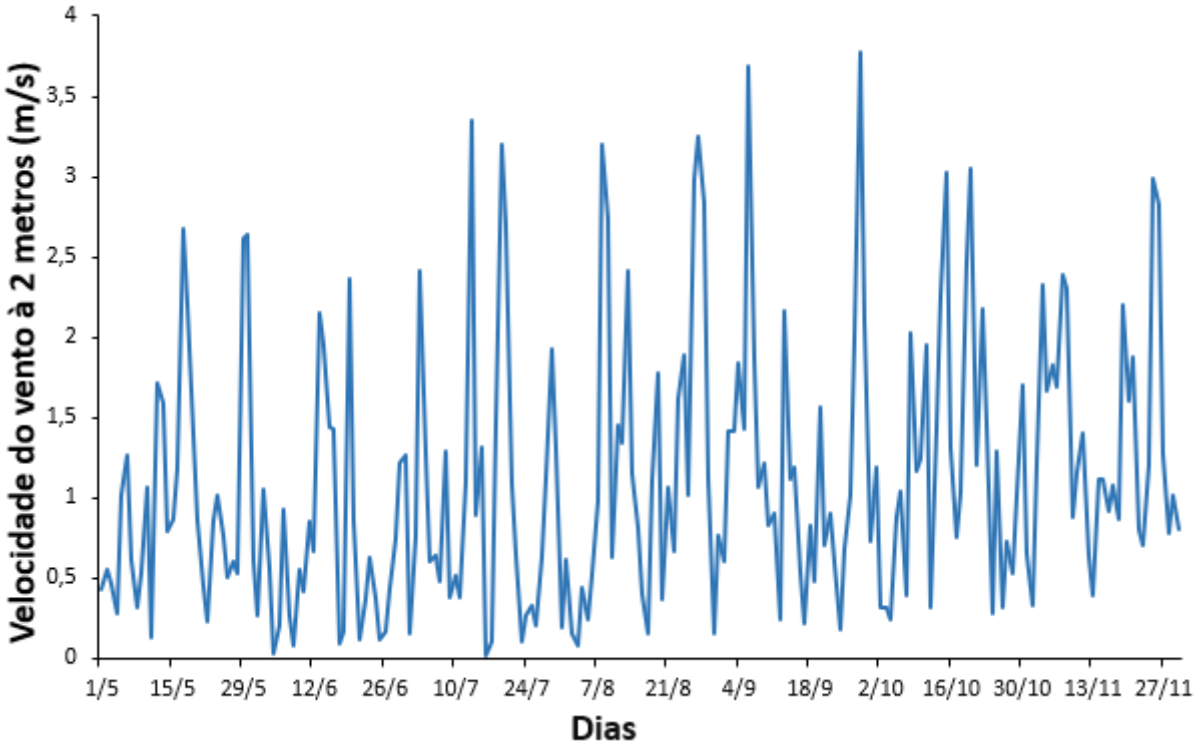
A umidade relativa do ar no período amostrado foi a esperada, estando próxima ao valor apresentando por Escobedo *et al*. (2009) em seu estudo. No entanto, os meses de maio, junho, agosto, setembro e novembro, quando comparados aos do estudo de Sarnighausen *et al*. (2021), mostra que o período está mais seco. Já quando comparados a série histórica de 1991-2020 (Franco *et al*., 2023), os dados de umidade relativa do ar obtidos no período experimental são superiores aos valores esperados pela série histórica, mostrando que o período se apresentou mais úmido que o esperado.

4.1.4 Velocidade do Vento

A mediana (Tabela 4) é menor que a média em relação à variável velocidade do vento, sugerindo uma distribuição assimétrica, decorrente da presença de valores altos, comparados à média, que ocasionam no aumento desta. O desvio padrão é menor que média, e o coeficiente de variação está em 74,42%, indicando uma alta variabilidade em relação à média, quando comparados com os demais parâmetros analisados.

Os dados de velocidade do vento a 2 metros de altura (Figura 15) foram coletados ao longo do estudo.

Figura 15 - Dados de velocidade do vento a 2 metros de altura fornecidos pela EMA no período de maio a novembro de 2023.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em estudo de Sarnighausen *et al*. (2021), foi observada a velocidade do vento média do período de maio de 1,77 m/s, junho de 1,57 m/s, julho de 1,67 m/s, agosto de 2,01 m/s, setembro de 2,13 m/s, outubro de 2,20 m/s r novembro de 1,80 m/s (Tabela 9).

Tabela 9 - Comparação da velocidade do vento a 2 metros (m/s) do período amostrado (2023) com o estudado por Sarnighausen *et al*. (2021).

Anos	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro
				(m/s)			
2021	1,77	1,57	1,67	2,01	2,13	2,20	1,80
2023	0,99	0,73	1,00	1,22	1,24	1,22	1,38

Fonte: Sarnighausen *et al.* (2021).

A velocidade média do vento a 2 metros em Botucatu no período amostrado foi de 1,12 m/s, com mínima de 0,023 m/s em julho e máxima em setembro de 3,78 m/s em julho.

Ao comparar as médias mensais da velocidade do vento entre 2021 e 2023 para esses meses, observa-se que a velocidade foi maior para todos os meses em 2021.

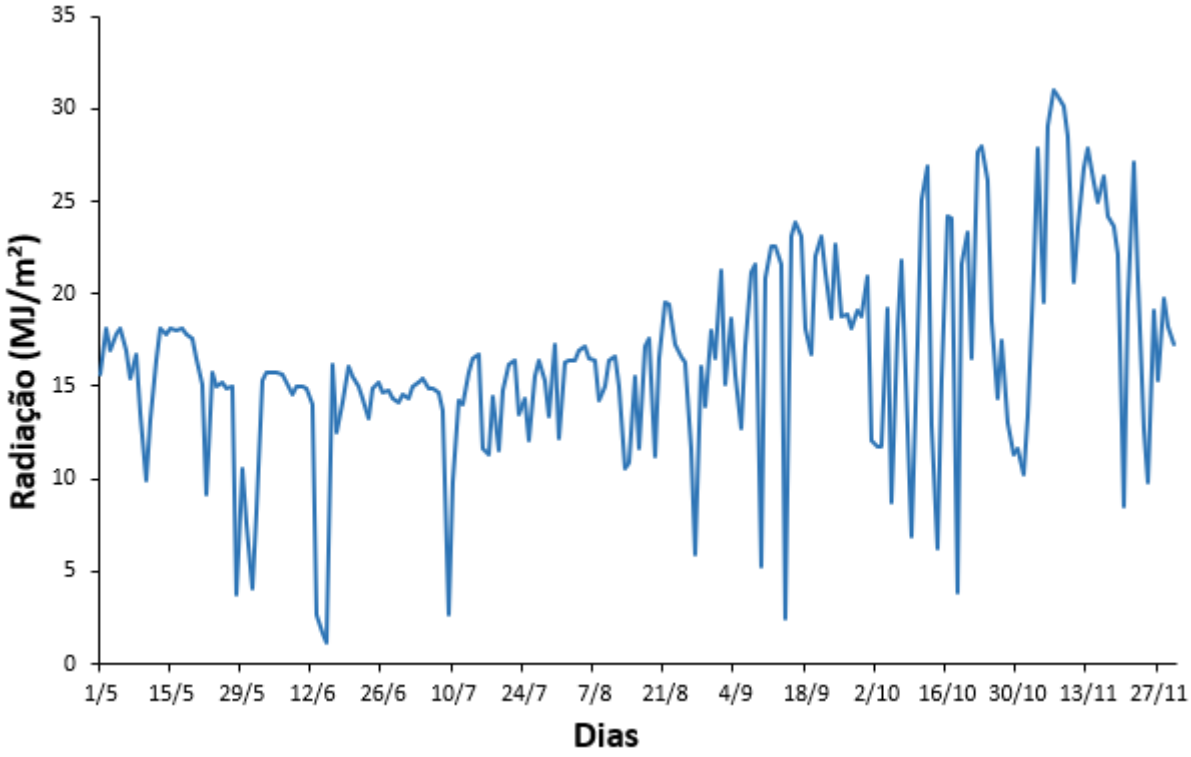
De acordo com Lopes *et al*. (2023), o fenômeno “El niño” pode interferir na velocidade do vento, já que o aumento das temperaturas nos oceanos Pacíficos e Atlântico Tropical influencia diretamente as condições climáticas ao redor do globo terrestre. Em seu estudo observaram que durante os anos de 1981-2010, nos períodos de ocorrência do “El Niño”, foram observadas as menores variações de velocidade do vento, enquanto que em períodos de ocorrência de “La Niña”, observaram as maiores variações de velocidade do vento.

4.1.5 Radiação Solar

A mediana (Tabela 5) está próxima da média em relação à variável radiação solar. O desvio padrão é menor que média, e o coeficiente de variação está em 33,65%, indicando uma baixa variabilidade em relação à média, quando comparados com os demais parâmetros analisados.

Dados da estação radiométrica foram coletados para poder compor a equação do modelo para Penman-Monteith. A radiação solar (Figura 16) foi um dos dados obtidos.

Figura 16 - Radiação solar no período de maio a novembro de 2023.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A radiação solar global média (Tabela 10) do período amostrado em Botucatu foi de 16,46 MJ/m².dia, com mínima de 1,17 MJ/m².dia em junho e máxima de 31 MJ/m².dia em novembro.

Tabela 10 - Radiação solar média do período amostrado e do período de 1997-2005 (Inácio, 2009).

	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro
	(MJ/m².dia)						
1996-2005 Média	14,00	12,60	13,80	16,30	17,70	19,60	21,00
2023 Média	14,74	13,34	14,01	15,35	18,87	16,75	22,20
2023 Total	457,10	400,25	434,30	475,75	566,18	519,09	665,97

Fonte: Elaborado pelo autor.

O mês com menor radiação solar média foi em junho de 13,34 MJ/m². dia e o mês com maior radiação solar média foi novembro de 22,20 MJ/m².dia.

A média da radiação solar global para o período de 1996 a 2005 foi de 17,60 MJ/m².dia (Inácio, 2009), enquanto que para os meses amostrados para esse período a média foi de 16,43 MJ/m².dia.

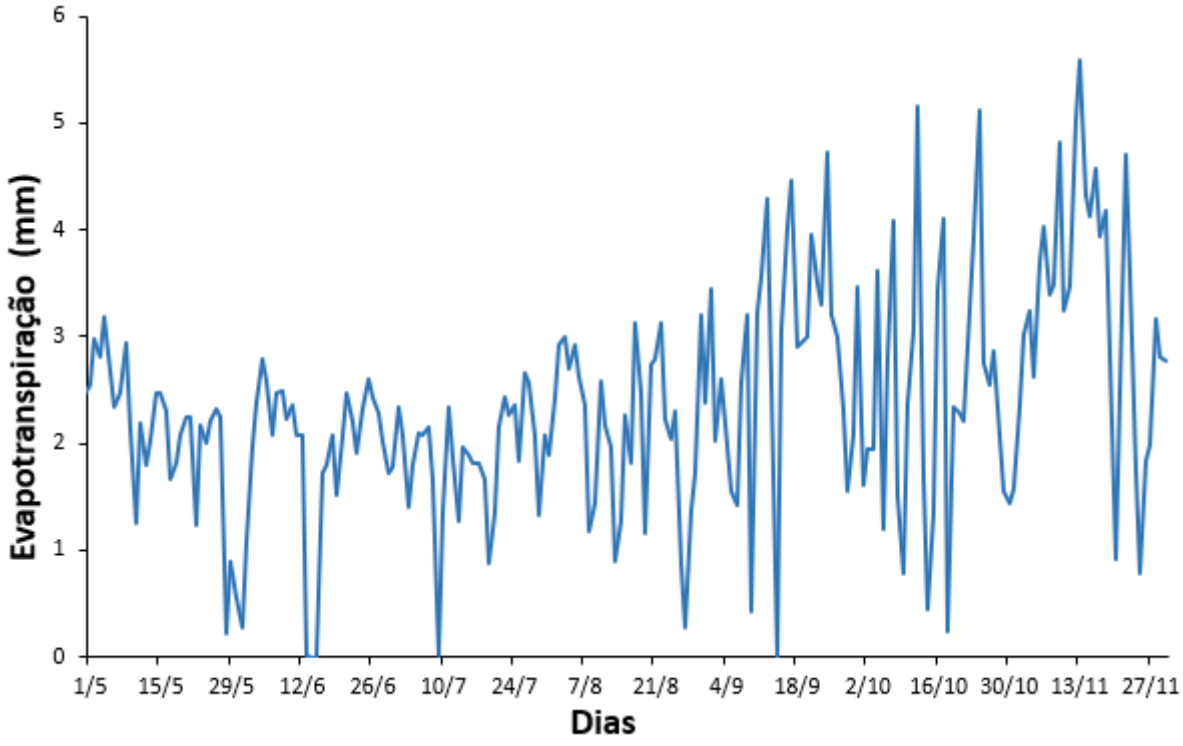
Quando comparadas a radiação solar média de ambos os períodos, observa-se que o período amostrado está conforme o esperado quando usados os dados de 1996-2006.

4.2 Estimativa de Evapotranspiração por meio do método de Penman-Monteith

Para realizar uma comparação de validação dos dados obtidos pelo lisímetro de lençol freático constante foi utilizado o modelo matemático de Penman-Monteith (referencial).

Para aplicar o modelo de Penman-Monteith foram utilizados os dados diários obtidos pela EMA para a obtenção da evapotranspiração (Figura 17).

Figura 17 - Dados da EMA de Botucatu, no período de maio a novembro de 2023, aplicados ao modelo Penman-Monteith.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nos dados do período amostrado, a evapotranspiração média do período experimental obtida através do modelo matemático de Penman-Monteith foi de 2,33 mm, com mínima diária de 0 mm em junho e setembro, e máxima diária de 5,58 mm em novembro.

Em estudo de Sarnighausen *et al*. (2021), foi observada a evapotranspiração média de maio de 2,09 mm, junho de 2,06 mm, julho de 2,63 mm, agosto de 2,77 mm, setembro de 3,03 mm, outubro de 3,55 mm e novembro de 3,74 mm (Tabela 11).

Tabela 11 - Comparação da evapotranspiração (mm) do período amostrado (2023) com a evapotranspiração em 2021.

Anos	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro
				(mm)			
2021*	2,09	2,06	2,63	2,77	3,03	3,55	3,74
2023	2,03	1,92	1,85	2,14	3,81	2,43	3,29

Fonte: *Sarnighausen *et al*. (2021).

Ao comparar as médias mensais de evapotranspiração entre o período amostrado de 2023 e o período de 2021 descrito por Sarnighausen *et al* (2021)., observa-se que 2023 obteve uma menor evapotranspiração, quando comparada com 2021. Considerando que o período de 2023 as temperaturas do ar foram superiores em 11,5% ao esperado, podendo ter sido uma das variáveis que ocasionou esse menor valor de evapotranspiração.

O modelo de Penman Monteith (PM), apresentado no Boletim 56 da FAO, foi definido como método-padrão para medir evapotranspiração (ETo), por se aproximar da evapotranspiração do padrão da grama nos locais analisados e mostrar maior precisão quando comparado a outros métodos (Xing *et al*., 2008; Alencar; Sediyama; Mantovani, 2015).

Esse é o método mais indicado para determinar a evapotranspiração, pois o fato de considerar a radiação solar como um de seus parâmetros faz com que o modelo seja eficiente em retratar as condições locais com maior precisão. Dessa forma, o método é utilizado para validação de outros métodos (Sousa, 2021).

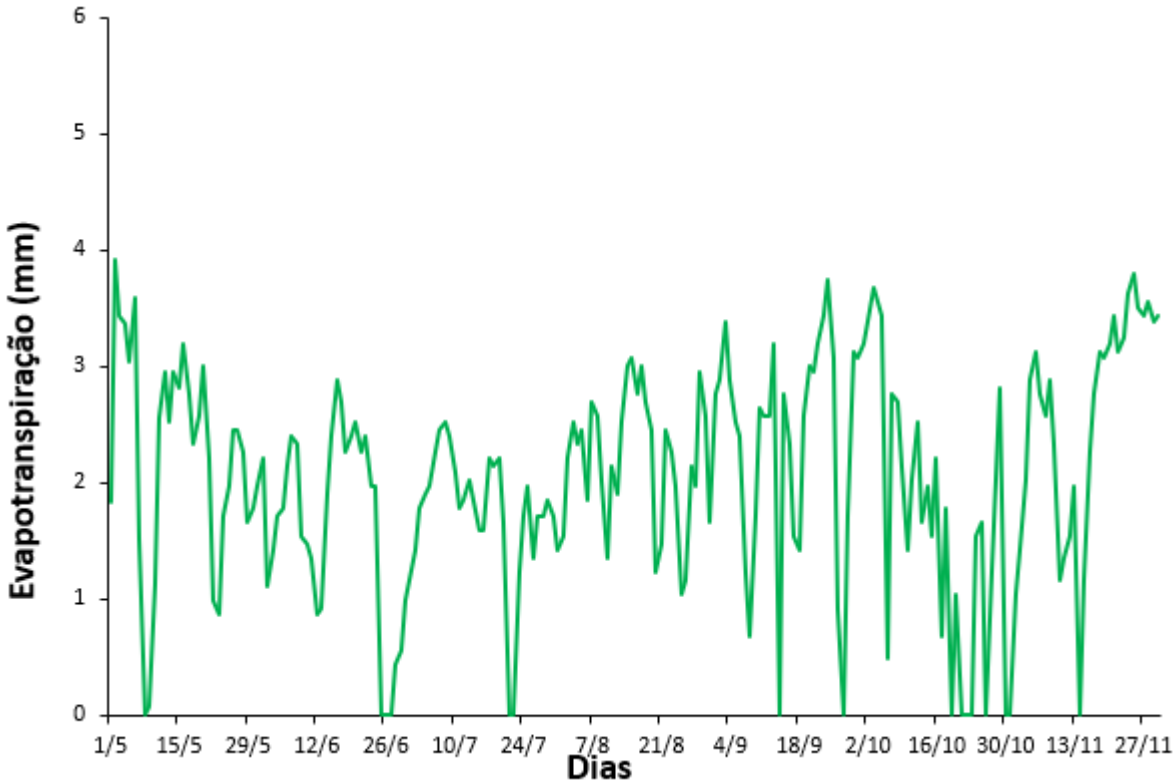
Penman-Monteith, usam além do saldo de radiação solar outras variáveis meteorológicas, como temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e pressão atmosférica, para medir a quantidade de água que é evaporada e transpirada da superfície para a atmosfera (Sarnighausen *et al*., 2021).

O modelo de Penman Monteith, por exemplo, é um modelo de clima árido e que utiliza variável de radiação solar em sua metodologia, superestimando a evapotranspiração para o município de Botucatu-SP.

4.3 Dados de evapotranspiração do lisímetro de lençol freático constante

Após o lisímetro de lençol freático constante estar apto para a obtenção de dados, iniciou-se a coleta diária de dados de evapotranspiração (Figura 18).

Figura 18 - Dados da evapotranspiração (mm/dia) fornecidos pelo lisímetro de lençol freático constante da Estação lisimétrica de Botucatu, no período de maio a novembro de 2023.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com base nos dados do período amostrado a evapotranspiração média do período foi de 2,05 mm, e com relação à média mensal, com mínima de 0 mm em todos os meses, com exceção de agosto, e máxima de 3,92 mm em maio (Tabela 12).

Tabela 12 - Evapotranspiração média diária e acumulada mensal obtida pelo lisímetro de lençol freático constante.

	Maio	Junho	Julho	Agosto	Setembro	Outubro	Novembro
	(mm)						
Média	2,25	1,63	1,73	2,19	2,34	1,66	2,57
Acumulada	69,87	48,83	53,49	67,97	70,24	51,41	77,17

Fonte: Elaborado pelo autor.

Junho, julho e outubro são os meses que apresentaram as menores médias diárias de evapotranspiração, respectivamente com, 48,83 mm, 53,49 mm e 51,41 mm. Já maio, setembro e novembro foram os meses com as maiores médias diárias de evapotranspiração, respectivamente com, 69,87 mm, 70,24 mm e 77,17 mm.

Os lisímetros precisam ser calibrados e analisados regularmente para garantir que estejam gerando dados precisos (Vicentin, 2018). Quando os lisímetros estão em condições ideais de uso, eles são opções viáveis para gerar dados para serem utilizados em uso racional da irrigação a campo (Sousa, 2022).

4.4 Comparação dos dados de evapotranspiração entre o LLFC e PM

A Tabela 13 é constituída por todos os valores de evapotranspiração acumulada mensal, obtida pelo lisimetro de lençol freático constante (LLFC), Penman-Monteith (PM).

Tabela 13 - Valores de evapotranspiração acumulada mensal, obtidos por diferentes métodos para Botucatu, no período de maio a novembro de 2023.

Mês	PM (mm)	LLFC (mm)	Erro relativo (%)
Maio	2,03	2,25	-9,78
Junho	1,92	1,63	17,79
Julho	1,85	1,73	6,94
Agosto	2,14	2,19	-2,28
Setembro	2,81	2,34	20,09
Outubro	2,43	1,66	46,39
Novembro	3,29	2,57	28,05

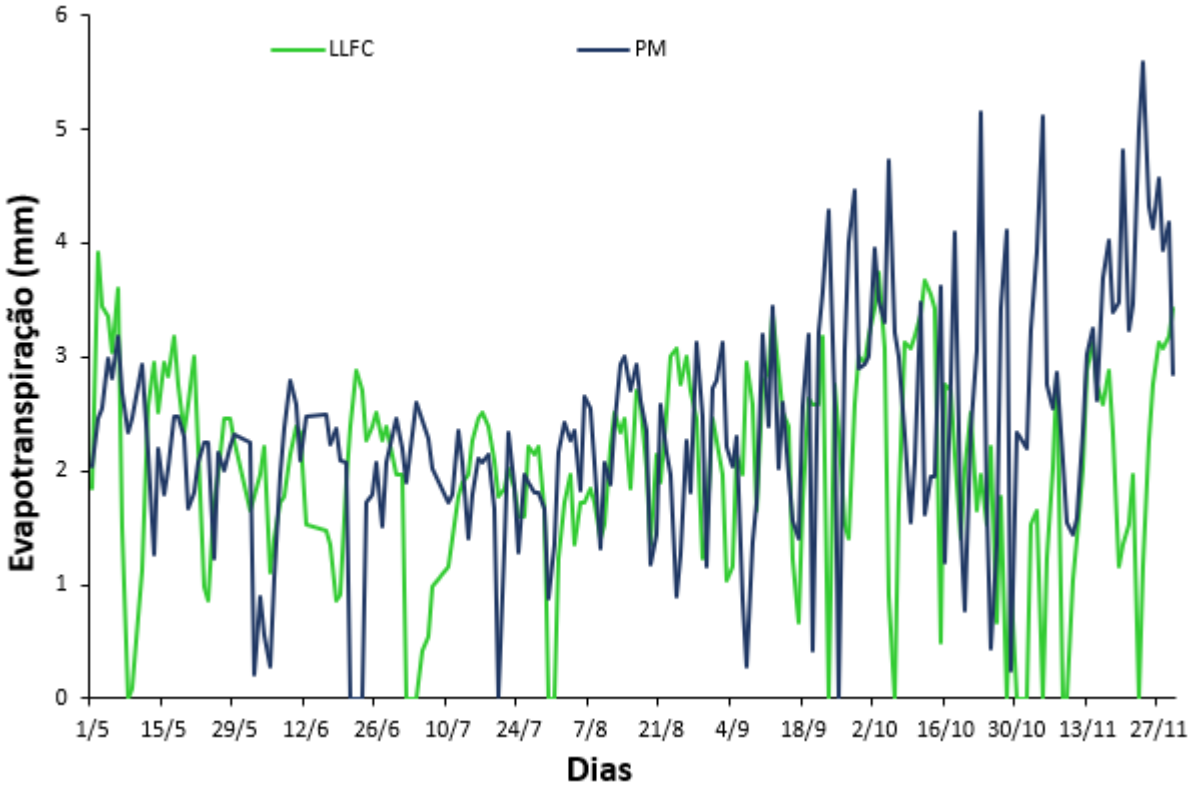
PM: Penman-Monteith; LLFC: Lisímetro de Lençol Freático Constante. **Fonte**: Elaborado pelo autor.

Na Tabela 13 observa-se o erro relativo dos dados de estimativa de PM comparados aos dados diretos do LLFC, indicando que ocorreu meses com subestimativa e meses com superestimativa da evapotranspiração. Os meses que ocorreu subestimativa da evapotranspiração foram maio (-9,78%) e agosto (-2,28%). Nos meses de junho (17,79%), julho (6,94%), setembro (20,09%), outubro (46,39%) e novembro (28,05%) houve superestimativa dos dados de evapotranspiração, indicando que PM apresenta comportamentos diversos dependendo das condições sazonais do município de Botucatu.

De acordo com Silva *et al*. (2016), PM é um método preciso para medir a evapotranspiração, mas pode subestimar ou superestimar os valores dependendo das condições climáticas.

Com todos os dados diários de evapotranspiração agrupados, observa-se que os menores valores de evapotranspiração são constituídos por LLFC (Figura 19).

Figura 19 - Comparação dos dados de evapotranspiração diária obtida por diferentes métodos, para Botucatu, no período de maio a novembro de 2023.

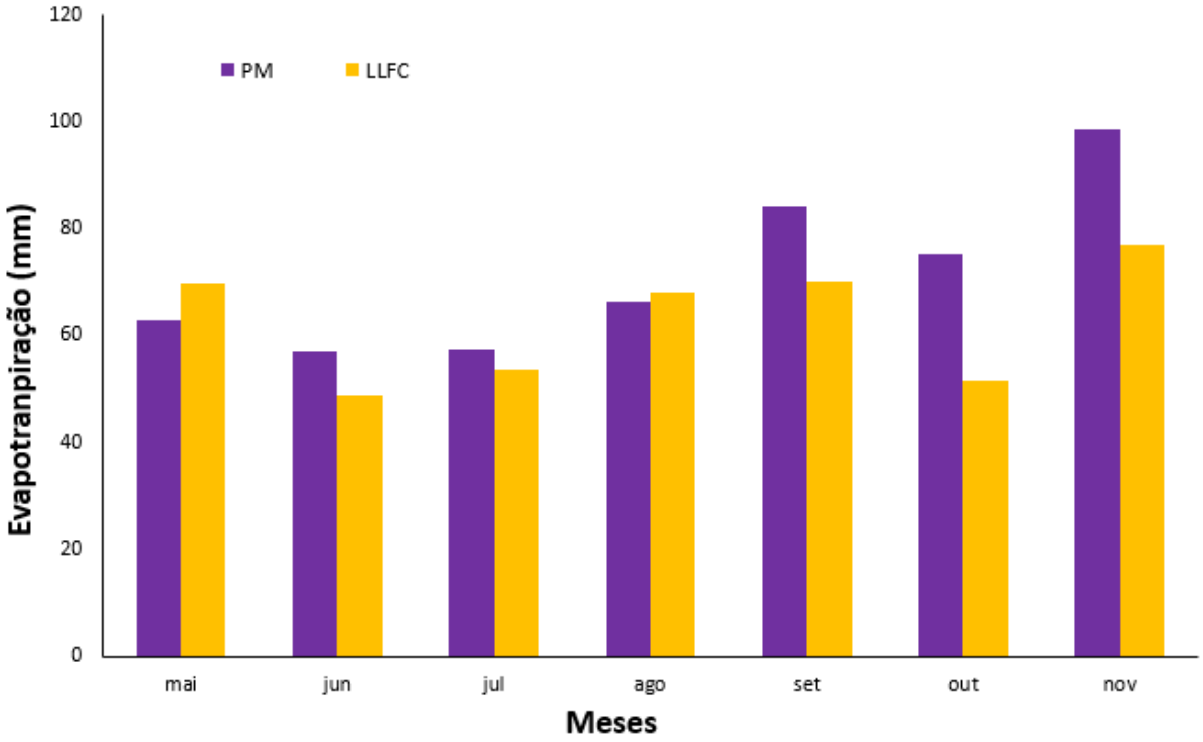


PM: Penman-Monteith; LLFC: Lisímetro de Lençol Freático Constante. **Fonte**: Elaborado pelo autor.

Percebe-se, ao analisar o Figura 19, que o comportamento da curva de evapotranspiração medida em campo, via lisimetro de lençol freático constante, acompanha o comportamento da curva de evapotranspiração calculada por meio do modelo de Penman-Monteith, no entanto, assim como indicado pela Tabela 13, PM apresenta uma variação maior, diferindo do comportamento real da evapotranspiração quando está em contato com o sistema solo-planta-atmosfera SSPA, o qual acaba não podendo ser representado de forma completa na metodologia de PM, e devido a isso, esses picos de sub e superestimativas são observados.

Na Figura 20 observa-se que quando o arranjo dos dados de evapotranspiração é mensal, o comportamento anterior citado entre PM e LLFC se mantem, corroborando com o fato que a metodologia seja mais precisa em alguns períodos do que em outros.

Figura 20 - Comparação dos dados de evapotranspiração acumulada mensal, obtida por diferentes métodos, para Botucatu, no período de maio a novembro de 2023.



PM: Penman-Monteith; LLFC: Lisímetro de Lençol Freático Constante. **Fonte**: Elaborado pelo autor.

Nesse cenário, Penman-Monteith é um método que estima valores próximos às medidas realizadas em loco, por meio de um lisímetro de lençol freático constante,

além de ser amplamente reconhecido pela sua precisão na estimativa da evapotranspiração de referência. De acordo com Raimundo (2017), essa precisão é fundamentada pela variedade de variáveis climáticas, como radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e pressão atmosférica. Já Carvalho *et al*. (2011), discutem que essa robustez teórica o torna altamente confiável em diferentes condições climáticas, no entanto, a disponibilidade de dados meteorológicos detalhados pode influenciar na sua eficiência.

Um exemplo de condições climáticas que podem afetar essas variáveis são fenômenos climáticos como “El Niño” e “La Niña”.

4.5 Análise dos indicadores de validação

Na Tabela 14 encontram-se as medidas descritivas, média, desvio padrão, mediana de evapotranspiração diária do período experimental de Penman-Monteith, lisimetro de lençol freático constante.

Tabela 14 - Medidas descritivas para os valores da evapotranspiração mensuradas pelo lisímetro de lençol freático constante e Penman-Monteith.

Método	Média	Mediana	Desvio Padrão	C.V.(%)
LLFC	1,99	2,02	0,93	46,50
PM	2,34	2,28	1,03	43,96

C.V.(%): Coeficiente de variação; PM: Penman-Monteith; LLFC: Lisímetro de Lençol Freático Constante. **Fonte**: Elaborado pelo autor.

A média de evapotranspiração medida pelo lisímetro de lençol freático constante é de 1,99, com uma mediana de 2,02 e um desvio padrão de 0,93. O coeficiente de variação é de 46,50%, indicando uma variabilidade nos dados superior em relação à média.

A média de evapotranspiração estimada por Penman-Monteith é de 2,34, com uma mediana de 2,28 e um desvio padrão de 1,03. O coeficiente de variação é de 43,96%, indicando uma variabilidade superior à média.

A Tabela 15 apresenta os indicativos estatísticos entre os dados diários do Lisímetro de Lençol Freático Constante (LLFC) em relação ao método de referência Penman-Monteith (PM).

Tabela 15 - Indicativos estatísticos entre os dados diários do lisimetro de lençol freático constante, comparados a Penman-Monteith.

Período	R de Pearson	D de Willmott	c	MAE	MBE	RMSE	MBE Relativo	RMSE Relativo
				mm	Mm	mm	%	%
Maio	0,079	0,395	0,031	0,766	-0,138	0,977	-6,117	43,406
Junho	-0,052	0,346	-0,018	0,801	-0,097	0,962	-5,490	54,469
Julho	-0,117	0,228	-0,027	0,564	0,055	0,767	2,987	41,780
Agosto	0,073	0,462	0,034	0,629	0,088	0,776	4,023	35,582
Setembro	0,197	0,488	0,096	0,830	0,175	1,109	7,177	45,475
Outubro	0,010	0,440	0,004	1,217	0,136	1,570	5,389	62,275
Novembro	0,143	0,459	0,066	1,255	1,198	1,637	35,111	48,003

r = coeficiente de correlação linear de Pearson; d = índice de concordância de Wilmott; MBE = erro quadrático médio; RMSE = raíz do erro quadrático médio. **Fonte**: Elaborado pelo autor.

Ao analisar os dados diários encontrados pela aplicação dos indicadores de validação, observou que esses não houve tanta consistência entre os métodos, não apresentando semelhanças na análise mensal. Com isso, optou-se por realizar um arranjo de períodos menores de dados, até que se encontrou em 8 dias (Tabela 16) dados mais consistentes com as medidas do LLFC com a estimativa de PM. Esses dados encontrados no arranjo de 8 dias foram mais consistentes, com pouca variabilidade, onde PM representa bem o microclima do município de Botucatu, já que os dados analisados mensalmente, PM não representa adequadamente as condições locais.

Tabela 16 - Indicativos estatísticos entre os dados do lisimetro de lençol freático constante, comparados a Penman-Monteith em um arranjo de 8 dias.

Período	R de Pearson	D de Willmott	c	MAE	MBE	RMSE	MBE Relativo	RMSE Relativo
				mm	Mm	mm	%	%
Maio	0,997	0,994	0,992	0,508	-0,345	0,585	-2,188	3,706
Junho	-0,617	0	0	3,250	-1,977	3,476	-18,658	32,798
Julho	-0,640	0,146	-0,093	4,264	2,593	6,207	19,524	46,733
Agosto	-0,412	0,149	-0,062	2,995	0,680	3,316	4,028	19,614
Setembro	0,244	0,518	0,127	2,640	1,716	3,201	9,461	17,643
Outubro	0,497	0,623	0,310	6,974	3,903	7,081	19,508	35,394
Novembro	-0,394	0,294	-0,116	11,473	11,473	13,376	45,337	52,858

r = coeficiente de correlação linear de Pearson; d = índice de concordância de Wilmott; MBE = erro quadrático médio; RMSE = raíz do erro quadrático médio. **Fonte**: Elaborado pelo autor.

Com a análise da Tabela 16, observa-se que em maio os valores indicam uma forte correlação positiva (R de Pearson, 0,997, próximo de 1) e um alto índice de concordância de Willmott (0,994). O erro médio absoluto (MAE; 0,508) é relativamente baixo, e o erro médio (MBE; -0,345) é ligeiramente negativo, indicando que a equação de Penman-Monteith tende a subestimar ligeiramente a quantidade de água no solo comparado ao lisímetro.

Em junho, a correlação é negativa (R; -0,617), indicando uma relação inversa entre os métodos. O índice de concordância de Willmott é 0, o que indica uma falta de concordância. O MAE (3,250) e o RMSE (3,476) são altos, e o MBE (-1,977) negativo sugere novamente que a equação de Penman-Monteith subestima a quantidade de água no solo.

Em julho, a correlação (-0,640) permanece negativa, e o índice de Willmott (0,146) é muito baixo, indicando pouca concordância. Tanto o MAE (4,264) quanto o RMSE (6,207) são altos. O MBE (2,593) é positivo, sugerindo que, ao contrário dos meses anteriores, a equação de Penman-Monteith superestima a quantidade de água no solo.

Em agosto, a correlação (-0,412) é negativa, mas menos intensa. O índice de Willmott (0,149) continua baixo. O MAE (2,995) e o RMSE (3,316) são mais baixos que em julho, e o MBE (0,680) é positivo, indicando uma leve superestimação da quantidade de água no solo pela equação de Penman-Monteith.

Em setembro, a correlação (0,244) se torna positiva, mas fraca. O índice de Willmott (0,518) aumenta, indicando melhor concordância. O MAE (2,640) e o RMSE (3,201) são moderados, e o MBE (1,716) positivo indica superestimação.

Em outubro, a correlação (0,497) é positiva e moderada. O índice de Willmott (0,623) continua a melhorar. No entanto, tanto o MAE (6,974) quanto o RMSE (7,081) são altos. O MBE (3,903) positivo indica uma significativa superestimação da quantidade de água no solo.

Em novembro, a correlação (-0,394) volta a ser negativa. O índice de Willmott (0,294) é baixo. O MAE (11,473) e o RMSE (13,376) são os mais altos de todos os meses, indicando grandes discrepâncias entre os métodos. O MBE (11,473) positivo e muito alto sugere uma significativa superestimação.

Nos meses de maio e junho a equação de Penman-Monteith tende a subestimar a quantidade de água no solo, enquanto de julho a novembro, ela tende a superestimar.

A correlação (R) entre os métodos varia muito, com meses de correlação negativa forte (junho, julho) e outros de correlação positiva fraca a moderada (maio, setembro, outubro).

Além disso, observa-se baixa concordância (D) na maioria dos meses, exceto em maio, setembro e outubro, Sendo assim, a redução do período de análise auxilia a verificação de concordância entre as medidas in loco e os valores estimados de evapotranspiração, o que pode ser uma evidência de que a sazonalidade, para períodos curtos, seja mais coerente de ser analisada devido a incorporação, pelo método de estimativa, das características padrões do ambiente naquele período, ou baixa variabilidade dos parâmetros agrometeorológicos.

Portanto, a equação de Penman-Monteith apresenta variações na precisão ao longo dos diferentes meses, com tendência a subestimar ou superestimar a quantidade de água no solo em diferentes momentos.

5 CONCLUSÃO

Durante o período estudado, houve uma tendência de precipitação abaixo do esperado em 6,3%, exceto em outubro, que registrou um volume 86% acima do esperado, possivelmente devido ao fenômeno "El Niño" que afeta a região desde 2023. As temperaturas do ar e umidade relativa do ar estiveram dentro do esperado para o período. A velocidade do vento foi menor que o esperado em todo o período, com o menor percentual em junho de 54%, característica associada ao "El Niño", enquanto a umidade relativa do ar e a radiação solar se mantiveram dentro do esperado.

Diante da análise dos indicadores de validação, pode-se concluir que o uso do lisímetro oferece uma medição direta e possivelmente mais precisa da quantidade de água no solo em comparação com a estimativa fornecida pela equação de Penman-Monteith. A equação de Penman-Monteith, embora amplamente utilizada, demonstra variações significativas em precisão ao longo dos meses, alternando entre subestimação e superestimação dos dados de água no solo.

Nos meses com forte correlação positiva, como maio, a Penman-Monteith se aproxima mais dos dados do lisímetro, enquanto em outros períodos, como junho e julho, a discrepância é considerável, com correlação negativa e alta discordância. A variação na precisão sugere que o método de Penman-Monteith pode não capturar adequadamente as mudanças sazonais ou específicas de cada mês na água do solo. Portanto, para obter medições mais confiáveis e precisas da água no solo, o uso do lisímetro parece ser preferível, enquanto o método de Penman-Monteith pode necessitar de ajustes ou calibrações adicionais para melhorar sua precisão

O resultado da análise de períodos menores fez-se pertinente, carregando menor variabilidade dos dados, torando as estimativas mais confiantes, sendo uma opção de aplicação para futuros trabalhos.

REFERÊNCIAS

AEN. Agência Estadual de Notícias. **Projeto de pesquisa vai testar tecnologia para reduzir perda de água na irrigação**. Disponível em: https://www.aen.pr.gov.br/Noticia/Projeto-de-pesquisa-vai-testar-tecnologia-para-reduzir-perda-de-agua-na-irrigacao Acesso em: 23 mai. 2024.

ALENCAR, Leônidas Pena de; SEDIYAMA, Gilberto Chohaku; MANTOVANI, Everardo Chartuni. Estimativa da evapotranspiração de referência (ETo padrão FAO), para Minas Gerais, na ausência de alguns dados climáticos. **Engenharia Agrícola**, v. 35, n. 1, p. 39-50, 2015. DOI: https://doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v35n1p39-50/2015 Disponível em: https://www.scielo.br/j/eagri/a/gfYNyQmvZvcfgFbrkdyHMQB/# Acesso em: 27 mar. 2024.

ALLEN, Richard G.; PEREIRA, Luis. S.; RAES, Dirk; SMITH, Martin. Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements-FAO Irrigation and Drainage, Paper 56. **Fao**, Rome, v. 300, n. 9, p. D05109, 1998.

ALMEIDA, Carlos Manuel dos Santos. **Lisímetro inteligente com monitorização da cultura e ambiente: Uma aproximação IoT**. 2022. Tese (Doutorado em Internet das Coisas), Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico de Beja. 529f. 2022.

ALVES, Lincoln Muniz; MARENGO, Jose A.; CAMARGO JÚNIOR, Hélio; CASTRO, Christopher. Início da estação chuvosa na região Sudeste do Brasil: Parte 1 – Estudos observacionais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 20, n. 3, p. 385-394, mar. 2005.

ASSIS, João Rafael Moura de. **SAE-ETo: sistema de apoio ao estudo da evapotranspiração de referência**. Monografia (Bacharelado em Agronomia) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Sertão Pernambucano, Campus Petrolina Zona Rural, Petrolina- PE, 66f., 2019.

ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **ANA lança estudo sobre impactos da mudança climática nos recursos hídricos das diferentes regiões do Brasil**. (2024) Disponível em: https://www.gov.br/ana/pt-br/assuntos/noticias-e-eventos/noticias/ana-lanca-estudo-sobre-impactos-da-mudanca-climatica-nos-recursos-hidricos-das-diferentes-regioes-do-brasil. Acesso em: 20 mai. 2024.

AZEVEDO, Gabriel. **El Niño no Brasil vai ficar mais forte nos próximos meses**. (2023) Canal Rural. Disponível em: https://www.canalrural.com.br/tempo/alerta-de-previsao-do-tempo/el-nino-no-brasil-vai-ficar-mais-forte-nos-proximos-meses-confira/ Acesso em: 27 mar. 2024.

BAILEY, Hannah; HUBBARD, Alun; KLEIN, Eric S.; MUSTONEN, Kaisa-Riikka; AKERS, Pete D.; MARTTILA, Hannu; WELKER, Jeffrey M. Arctic sea-ice loss fuels extreme European snowfall. **Nature Geoscience**, v. 14, n. 5, p. 283-288, 2021.

BARBIERI, José Carlos. **Desenvolvimento sustentável**: das origens à Agenda 2030. Petrópolis: Vozes, 2020. 264p.

BEYRUTH, Zuleika. Água, agricultura e as alterações climáticas globais. **Revista Tecnologia & Inovação Agropecuária**, v. 1, n. 1, p. 74-89, 2008.

BERGAMASCHI, Homero; MELO, Ricardo Wanke de.; GUADAGNIN, Mario Ricardo; CARDOSO, Loana Silveira; SILVA, Maria Isabel Guilardi da; COMIRAN, Flávia; DALSIN, Fabrício; TESSARI, Mauro Luis; BRAUNER, Pedro Corrêa. Boletins agrometeorológicos da estação experimental agronômica da UFRGS. Porto Alegre: **Série histórica 1970-2012**, p. 8, 2012.

BERNARDO, Salassier; SOARES, Antonio Alves; MANTOVANI, Everardo Chartuni. **Manual de Irrigação**. 8. ed. Viçosa: Editora UFV, 2008.

BIANCHI, Leandro; GERMINO, Gabriel Henrique; ALMEIDA SILVA, Marcelo de. Adaptação das plantas ao déficit hídrico. **Acta iguazu**, v. 5, n. 4, p. 15-32, 2016. DOI: https://doi.org/10.48075/actaiguaz.v5i4.16006 Disponível em: https://e-revista.unioeste.br/index.php/actaiguazu/article/view/16006 Acesso em: 27 mar. 2024.

BLAIN, Gabriel Constantino; PICOLI, Michelle Cristina Araujo; LULU, Jorge. Análises estatísticas das tendências de elevação nas séries anuais de temperatura mínima do ar no Estado de São Paulo. **Bragantia**, v. 68, p. 807-815, 2009. DOI: https://doi.org/10.1590/S0006-87052009000300030 Disponível em: https://www.scielo.br/j/brag/a/hg8sgmxLMTwqPBPwy9Ktt3L/?lang=pt Acesso em: 27 mar. 2024.

BUANANGO, Maitu Abibo; FERREIRA, Vladmir Antero Delgado Silves; DE OLIVEIRA, Maria Rita Marques. Novo coronavírus SARS-CoV-2 e o agravamento da insegurança alimentar em países africanos com histórico de eventos climáticos e de conflitos armados. **Revista Simbiologias**, v. 12, n. 16, 2020. DOI: https://doi.org/10.32905/19833253.2020.12.16p118 Disponível em:

https://simbiologias.ibb.unesp.br/index.php/files/article/view/216 Acesso em: 27 mar. 2024.

BUAINAIN, Antônio Márcio; GARCIA, Junior Ruiz; VIEIRA, Pedro Abel. O desafio alimentar no século XXI: The food challenge of the twenty-first century. **Estudos Sociedade e Agricultura**, v. 24, n. 2, p. 497-522, 2016.

CAMARGO, Ângelo Paes de; CAMARGO, Marcelo Bento Paes de. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. **Bragantia**, v. 59, n. 2, p. 152-137, 2000. DOI: https://doi.org/10.1590/S0006-87052000000200002 Disponível em: https://www.scielo.br/j/brag/a/94MFPHnhYKGKRds4cMKFBBt/ Acesso em: 27 mar. 2024.

CAMPECHE, Luis Fernando de Sousa Magno; AGUIAR NETTO, Antenor de Oliveira; SOUSA, Inajá Francisco de; FACCIOLI, Gregório Guirado; SILVA, Vicente de P. R. da; AZEVEDO, Pedro V. de. Lisímetro de pesagem de grande porte. Parte I: Desenvolvimento e calibração. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 5, p. 519-525, mai. 2011.

CARVALHO, Daniel F.; SILVA, Leonardo, D. B.; GUERRA, José G. M.; CRUZ, Francisco A.; SOUZA, Adilson P. Instalação, calibração e funcionamento de um lisímetro de pesagem. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 2, p. 363-372, mai./ago. 2007. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-69162007000300005 Disponível em: https://www.scielo.br/j/eagri/a/9pFJ6CVDKKsXTXVvRs5F7Dp/ Acesso em: 27 mar. 2024.

CARVALHO, Luiz Gonsaga de; RIOS, Gervásio Fernando Alves; MIRANDA, Wezer Lismar; CASTRO NETO, Pedro. Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, p. 456-465, 2011. DOI: https://doi.org/10.5216/pat.v41i3.12760 Disponível em: https://www.scielo.br/j/pat/a/w3wxhhsgqVK67LPMhPJNQnq/ Acesso em: 30 abr. 2024.

CASTANHEIRA, Nelson Pereira. **Estatística aplicada a todos os níveis.** Editora Intersaberes. 2023. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=r5sAEQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP5&dq=estatistica+cv+grande+instabilidade+dispersao+media&ots=inzdz8elug&sig=Kd-1OGUJFHxBD3BV8KArH7_935c#v=onepage&q&f=false Acesso em: 29 abr. 2024.

CNA. Confederação Nacional da Agricultura e Pecuária do Brasil. Irrigação: Uma oportunidade para o desenvolvimento regional do Brasil. CNA, 2024.

COELHO FILHO, Mauricio Antonio; BASSOI, Luis Anotnio; ANGELOCCI, Luiz Roberto; COELHO, Eugenio Ferreira; PEREIRA, Francisco Adriano de Carvalho. Relação solo-planta-atmosfera. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2011. In: SOUSA, Valdemício Ferreira de; MAROUELLI, Waldir Aparecido; COELHO, Eugênio Ferreira; PINTO, José Maria; COELHO FILHO, Maurício Antonio. (Ed.). **Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2011. 771p.

COLLISCHONN, Walter; TASSI, Rutinéia. Introdução a hidrologia. **IPH UFRGS**, 2008.

CORNETTA, Andrei. Ciência, política e a produção histórica do clima: considerações sobre controvérsias científicas e políticas para mudanças climáticas. **Revista da ANPEGE**, 2022. DOI: https://doi.org/10.5418/ra2022.v18i36.13567 Disponível em: https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/anpege/article/view/13567 Acesso em: 27 mar. 2024.

COSTA, João Paulo Nunes; MEDEIROS, José Francismar; NUNES, Rafaela Mendes de Andrade; CAVALCANTE JÚNIOR, Edmilson Gomes; LIRA, José Flaviano Barbosa. Crescimento e produção da primeira rebrota de cultivares de sorgo sob diferentes lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 16, n. 3, p. 449-459, 2017. DOI: https://doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v16n3p449-459 Disponível em: https://rbms.abms.org.br/index.php/ojs/article/view/864 Acesso em: 27 mar. 2024.

CUNHA, Antonio Ribeiro da; MARTINS, Dinival. Classificação climática para os municípios de Botucatu e São Manuel, SP. **Irriga**, v. 14, n. 1, p. 1-11, 2009. DOI: https://doi.org/10.15809/irriga.2009v14n1p1-11 Disponível em: https://actaarborea.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/3393 Acesso em: 27 mar. 2024.

DAL PAI, Alexandre; ESCOBEDO, João Francisco; DAL PAI, Enzo; OLIVEIRA, Amauri Pereira de; SOARES, Jacira Ramos; CODATO, Georgia. MEO shadowring method for measuring diffuse solar irradiance: Corrections based on sky cover. **Renewable Energy**, v. 99, p. 754-763, dec. 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.07.026 Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096014811630622X?casa_token=k7vzn6IGTXIAAAAA:CTUo58Hy4RHav33A1tz3GcuxqswmqRzd-pcNbGHeVhAXa6MXXFYhZX-9bvaozxNgugfAT9yx3uA Acesso em: 27 mar. 2024.

DANTAS, Antônio Augusto Aguilar; CARVALHO, Luiz Gonzaga; CASTRO NETO, Pedro. **Radiação solar**. Lavras, MG: UFLA, [20--].

DIAS, Eric Mateus Soares; PESSOA, Zoraide Souza. Percepções sobre os riscos das mudanças climáticas no contexto da região semiárida do Rio Grande do Norte, Brasil. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 55, p. 619-643, 2020.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. Efeito da água no rendimento das culturas. **Estudos FAO – Irrigação e Drenagem**, v. 33, 306p. 1994.

DOORENBOS, Jan; PRUIT, William Obadiah. Guidelines for predicting crop water requirements. **FAO Irrigation and Drainage Pape**r, 24, Rome, 179p, 1975.

ELLIOTT, Joshua; DERYNG, Delphine; MÜLLER, Christoph; FRIELER, Katja; KONZMANN, Markus; GERTEN, Dieter; …& WISSER, Dominik. Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 111, n. 9, p. 3239-3244, 2014. DOI: https://doi.org/10.1073/pnas.1222474110 Disponível em: https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1222474110 Acesso em 27 mar. 2024.

ESCOBEDO, João Francisco; GOMES, Eduardo Nardini; OLIVEIRA, Amauri P.; SOARES, Jacyra. Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil. **Applied Energy**, v. 86, n. 3, p. 299-309, 2009. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.04.013 Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261908001086?casa_token=N9rzGVur7V0AAAAA:igvLYIViY5VJyr5T41CdrrSqYjujIrZFHWUgQDm05H9miugtcUD9ON-TPu9nqaHVqR6Q9sIzrfc Acesso em: 27 mar. 2024.

FERREIRA FILHO, Rubens Amaral. Mudanças climáticas e o acesso à água e esgotamento sanitário: desafios e oportunidades para os Estados do Ceará e São Paulo, Brasil. 2020. Dissertação de Mestrado em Ciências pela Universidade de São Paulo. 2020. 153p.

FIALLOS, G. La correlación de Pearson y el processo de regresión por el método de mínimos cuadrados. **Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar**, v. 5, n. 3, p. 2491-2509, 2021. DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i3.466 Disponível em: https://ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/view/466 Acesso em: 27 mar. 2024.

FRANCO, Jose Rafael; DAL PAI, Enzo; CALÇA, Marcus Vinicius Contes; RANIERO, Matheus Rodrigues; DAL PAI, Alexandre; SARNIGHAUSEN, Valeria Cristina

Rodrigues; SANCHÉZ-ROMÁN, Rodrigo Máximo. Atualização da normal climatológica e classificação climática de Köppen para o município de Botucatu-SP. **Irriga**, [S. l.], v. 28, n. 1, p. 77–92, 2023. DOI: 10.15809/irriga.2023v28n1p77-92. Disponível em: https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/4615. Acesso em: 27 mar. 2024.

FRITZEN, Maycon; BINDA, Andrey Luis. Alterações no ciclo hidrológico em áreas urbanas: cidades, hidrologia e impactos no ambiente. **Ateliê Geográfico**, Goiânia, v. 5, n. 3, p. 239-254, dec. 2011. DOI: https://doi.org/10.5216/ag.v5i3.16703 Disponível em: https://revistas.ufg.br/index.php/atelie/article/view/16703 Acesso em: 27 mar. 2024.

FROTA, Patrícia Vasconcelos. Propostas para gestão integrada dos recursos hídricos na bacia hidrográfica do Rio Jardim – DF. Dissertação de mestrado em Desenvolvimento Sustentável (Concentração em Política e Gestão Ambiental, do Centro de Desenvolvimento Sustentável da Universidade de Brasília. 2006. 167p.

GOMES JUNIOR, Daniel Gonçalves. **Ajuste de modelo de estimação de radiação solar difusa e análise de dados de satélites para predição de evapotranspiração de referência**. 2021. Tese (Doutorado em Agronomia - Irrigação e Drenagem), Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. 2021. 88f.

GOMES JUNIOR, Daniel Gonçalves. **Construção e calibração de um lisímetro de pesagem e comparação de sua medida de evapotranspiração com a estimativa obtida pelo método de Thornthwaite (1948)**. 2017. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Irrigação e Drenagem), Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. 2017. 101f.

GRIMM, Alice M.; ACEITUNO, Patricio. El niño, novamente!. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, p. 351-357, 2015. DOI: https://doi.org/10.1590/0102-778620152000 Disponível em: https://www.scielo.br/j/rbmet/a/LsJdbVvPrjy5tdmZc5YHywK/?lang=pt Acesso em: 27 mar. 2024.

GUIMARÃES, Lucas. ‘**Tudo aconteceu mais rápido’, diz especialista sobre enchente de 2024 em comparação com tragédia de 1941**. O Globo, Rio de Janeiro, 09 maio 2024. Disponível em: https://oglobo.globo.com/brasil/sos-rio-grande-do-sul/noticia/2024/05/09/tudo-aconteceu-mais-rapido-diz-especialista-sobre-

enchente-de-2024-em-comparacao-com-tragedia-de-1941.ghtml. Acesso em: 20 mai. 2024.

IBB. Instituto de Biociências – Câmpus de Botucatu. **Localização.** (2018) Disponível em: https://www.ibb.unesp.br/#!/sobre-o-campus/localizacao/ Acesso em: 21 mai. 2024.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Brasil / São Paulo / Botucatu**. Cidades: IBGE, 2023. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/botucatu/panorama>. Acesso em: 27 mar. 2024.

INÁCIO, Thais. **Potencial solar das radiações global, difusa e direta em Botucatu**. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Energia da Agricultura), Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. 2009. 84f.

INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia**. 2023a. Disponível em: < https://portal.inmet.gov.br/sobre-meteorologia> Acesso em: 27 mar. 2024.

INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia**. Boletim mensal nº 3 - Painel El Niño. 2023b. Disponível em: < https://portal.inmet.gov.br/uploads/notastecnicas/Painel-El-Ni%C3%B1o-Boletim-Mensal-No-03.pdf> Acesso em: 27 mar. 2024.

INMET. **Instituto Nacional de Meteorologia**. Temperatura média atinge recorde no Brasil pelo quarto mês seguido. 2023c. Disponível em: < https://portal.inmet.gov.br/noticias/temperatura-m%C3%A9dia-atinge-recorde-no-brasil-pelo-quarto-m%C3%AAs-seguido> Acesso em: 27 mar. 2024.

IQBAL, Muhammad. An introduction to solar radiation. Library of Congress Cataloging in Publication Data. Canada: **Academic Press**, 1983. 408p.

JENSEN, Marvin Eli; BURMAN, Robert D.; ALLEN, Rick G. Evapotranspiration and irrigation water requiriments. **Amer Society of Civil Engineers**, New York, 1990.

KELLER, J.; BLIESNER, R. D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: van Nostrand Reinhold, 1990. 652p.

KÖPPEN, Wlademir; GEIGER, Rudolf. Klimate der Erde. Gotha: Verlagcondicionadas. **Justus Perthes**. 1928.

LEE, T. M.; NAJIM, M. M. M.; AMINUL, M. H. Estimating evapotranspiration of irrigated rice at the West coast of the Peninsular of Malaysia. **Journal of Applied Irrigation Science**, v. 39, n. 1, p. 103-117, 2004.

LEMES, Murilo da Costa; REBOITA, Michelle Simões; RODRIGUES, Roger Torres. Mudança no uso e cobertura da terra na bacia do Rio Tietê e seus impactos na temperatura da superfície (TS). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 27, 2020. DOI: https://dx.doi.org/10.5380/abclima.v27i0.68836 Disponível em: https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/rbclima/article/view/14270 Acesso em: 27 mar. 2024.

LIMA, Lúcia Oliveira; OLIVEIRA, Josemar Pereira de; ALMEIDA, Rafael Rodrigues; DINIZ, Marjony Ravardiere Moises; MIRANDA, Murilo Santana; SOUSA, José Sebastião Costa de. **Estimativa da eficiência de um sistema de irrigação por microaspersão**. In: Congresso Norte e Nordeste de Pesquisa e Inovação. 2012.

LIMA, Walter de Paula. **Hidrologia florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas**. 2 ed. ESALQ, dec. 2008

LIU, William Tse Horng. **Aplicações de sensoriamento remoto**. Campo Grande: Ed. UNIDERP 2ed, 2015. 908p.

LIZANO-ARAYA, Melvin A.; LIZANO-RODRÍGUEZ, Omar G. Creación de escenarios ante el aumento del nivel del mar, para las localidades de Moín y Cahuita, Limón Costa Rica. **Revista Geográfica de América Central**, n. 68, p. 103-126, 2022. DOI: https://dx.doi.org/10.15359/rgac.68-1.4 Disponível em: https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/download/15031/23493?inline=1 Acesso em: 27 mar. 2024.

LOPES, Renato Francisco Cândido; CAVALCANTI, Enilson Palmeira; RODRIGUES, Edgleidson Lima; NÓBREGA, Ranyére Silva; CORREIRA, Magaly de Fátima. Variabilidade do Vento no Estado da Paraíba para Eventos de Anomalia de TSM dos Oceanos Atlântico e Pacífico Tropicais. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 16, n. 05, p. 2941-2959, 2023.

LUND, Jay; MEDELLIN-AZUARA, Josue; DURAND, John; STONE, Kathleen. Lessons from California's 2012–2016 drought. **Journal of Water Resources Planning and Management**, v. 144, n. 10, p. 04018067, 2018. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.000098 Disponível em: https://ascelibrary.org/doi/full/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000984 Acesso em: 27 mar. 2024.

MACHADO, Célia Cristina; SILVA, Bernardo Barbosa da; ALBUQUERQUE, Manoel Bandeira de; GALVÍNCIO, Josiclêda Domiciano. Estimativa do balanço de energia utilizando imagens TM-Landsat 5 e o algoritmo SEBAL no litoral sul de Pernambuco.

Revista Brasileira de Meteorologia, v. 29, p. 55-67, 2014. DOI: https://doi.org/10.1590/S0102-77862014000100006 Disponível em: https://www.scielo.br/j/rbmet/a/x6FXKzvfrSRhCVjk4BFZRdQ/ Acesso em: 27 mar. 2024.

MACIEL NETTO, André; ANTONINO, Antonio Celso Dantas; AUDRY, Pierre; CARNEIRO, Clemente José Gusmao; DALL´OLIO, Attílio. Condutividade hidráulica não saturada de um podzólico amarelo da zona da mata norte de Pernambuco. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, n. 6, p. 1221-1228, 2000. DOI: https://doi.org/10.1590/S0100-204X2000000600019 Disponível em: https://www.scielo.br/j/pab/a/6mcdmt7PPxSjSMTSZQfpbMB/?format=html&lang=pt Acesso em: 27 mar. 2024.

MARENGO, José Antônio. Água e mudanças climáticas. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p; 83-96, 2008a. DOI: https://doi.org/10.1590/S0103-40142008000200006 Disponível em: https://www.scielo.br/j/ea/a/fXZzdm68cnzzt6Khr8zYx3L/ Acesso em: 27 mar. 2024.

MARENGO, Jose Antônio; ALVES, Lincoln M. Crise hídrica em São Paulo em 2014: seca e desmatamento. **GEOUSP Espaço e Tempo (Online)**, v. 19, n. 3, p. 485-494, 2015. DOI: https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geousp.2015.100879 Disponível em: https://www.revistas.usp.br/geousp/article/view/100879 Acesso em: 29 abr. 2024.

MARINHO, Felipe Pinto; BRASIL, Juliana Silva; ROCHA, Paulo Alexandre Costa; SILVA, Maria Eugênia Vieira da; de AMORIM NETO, Juarez Pompeu de. Influência dos fenômenos climáticos do El Niño e da La Niña na previsão da média diária de irradiação global na cidade de fortaleza. **Revista Científica Acertte**, v. 2, n. 2, p. e2253-e2253, 2022. DOI: https://doi.org/10.47820/acertte.v2i2.53 Disponível em: https://acertte.org/index.php/acertte/article/view/53 Acesso em: 27 mar. 2024.

MARTINS, Fernando Ramos; PEREIRA, Enio Bueno; ECHER, Mariza Pereira de Souza. Levantamento dos recursos de energia solar no Brasil com o emprego de satélite geoestacionário: o Projeto Swera. **Revista brasileira de Ensino de Física**, v. 26, p. 145-159, 2004. DOI: https://doi.org/10.1590/S0102-47442004000200010 Disponível em: https://www.scielo.br/j/rbef/a/vr68FHKFh6PWkYwtYXYvfMj/?lang=pt&format=html Acesso em: 27 mar. 2024.

MARTINS, Mário Henrique da Mata. **O uso de tecnologias de comunicação de riscos para prevenir desastres**. Dissertação (Mestrado em Psicologia) - Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 2013. 123 f.

MCDONALD, Robert I.; DOUGLAS, Ian; REVENGA, Carmen; HALE, Rebecca; GRIMM, Nancy; GRÖNWALL, Jenny; FEKETE, Balazs. Global urban growth and the geography of water availability, quality, and delivery. **Ambio**, v. 40, p. 437-446, 2011. DOI: https://doi.org/10.1007/s13280-011-0152-6 Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s13280-011-0152-6 Acesso em: 27 mar. 2024.

MEDEIROS, Patrick Valverde; MARCUZZO, Francisco Fernando Noronha; YOULTON, Cristian; WENDLAND, Edson. Error Autocorrelation and Linear Regression for Temperature-Based Evapotranspiration Estimates Improvement 1. **JAWRA Journal of the American Water Resources Association**, v. 48, n. 2, p. 297-305, 2012. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2011.00614.x Disponível em: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1752-1688.2011.00614.x?casa_token=76qG4Yibt1kAAAAA:wzk6prTC7dtDiSz5qmN53oK_TYzknhNKdo6ny3UnowW4Q3mHAzWkqzNX2ZlEAd1OS8tK6MdK3yWsqOlv Acesso em: 27 mar. 2024.

MEINERZ, Tânia. **Nível do Guaíba chega a 4,77m e cheia se torna a maior da história. Jornal do Comércio**. 2024. Disponível em: https://www.jornaldocomercio.com/geral/2024/05/1153047-nivel-do-guaiba-chega-a-458m-e-ja-e-o-segundo-maior-da-historia.html Acesso em: 20 mai. 2024.

MENDONÇA, Francisco; DANNI-OLIVEIRA, Inês Moresco. **Climatologia noções básicas e clima do Brasil**. São Paulo: Oficina de textos. 2007.

MINUZZI, Rosandro Boligon; SEDIYAMA, Gilberto Chohaku; COSTA, José Maria Nogueira da; VIANELLO, Rubens Leite. Influência do fenômeno climático El Niño no período chuvoso da região sudeste do Brasil. **Geografia**, Londrina, v. 15, n. 2, p. 5-19, 2006. DOI: https://doi.org/10.5433/2447-1747.2006v15n2p5 Disponível em: https://ojs.uel.br/revistas/uel/index.php/geografia/article/view/6586 Acesso em: 27 mar. 2024.

MIRANDA, Fábio Rodrigues de; YODER, Ronald E.; SOUZA, Francisco de. Instalação e calibração de um lisímetro de pesagem no projeto de irrigação Curu-Paraipaba, CE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, p. 107-110, 1999.

MORAIS, Fábio Robério; BRAGA, Iluska Lobo. **Administração estratégica na administração pública**. Jundiaí: Paco e Littera, 2023. 202p.

MONTANHA, Luiz Eduardo Vieira. **Desempenho das medidas de um lisímetro de lençol freático constante a partir do modelo de Penman-Monteith**. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Irrigação e Drenagem), Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. 2022.66f.

NAITZEL, Letícia Tábita. **Projeção de indicadores de segurança hídrica em escala nacional para diferentes cenários de mudanças climáticas e consumo de água utilizando geoprocessamento.** 2023. Dissertação de mestrado em Engenharia (Recursos Hidrícos e Saneamento Ambiental) da Universidade Federal do Rio Grande do
Sul – UFRGS. 2023. 123p.

NOAA Climate.gov. **El Niño & La Niña (El Niño-Southern Oscillation).** Disponível em: climate.gov/enso. Acesso em: 20 de mai. de 2024.

NOGUEIRA, Viviane Barreto Motta; NOGUEIRA, Rogério Nunes; CÂNDIDO, Gesinaldo Ataíde; SOUZA, Valdir Cesarino; SILVA, Sandra Sereide Ferreira da. Efeitos das alterações climáticas e antrópicas na saúde do idoso. **Revista Brasileira de Ciências do Envelhecimento Humano**, v. 8, n. 1, 2011. DOI: https://doi.org/10.5335/rbceh.2012.609 Disponível em: https://seer.upf.br/index.php/rbceh/article/view/609 Acesso em: 27 mar. 2024.

OLIVEIRA, Samira França; PRADO, Rachel Bardy; MONTEIRO, Joyce Maria Guimarães. Impactos das mudanças climáticas na produção agrícola e medidas de adaptação sob a percepção de atores e produtores rurais de Nova Friburgo, RJ. **Interações** (Campo Grande), Campo Grande, v. 23, n. 4, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.20435/inter.v23i4.3548. Acesso em: 20 mai. 2024.

OLMEDO, Estrella; TURIEL, Antonio. **Tormentas y sequías a la vista**: el cambio climático está acelerando el ciclo del agua. Digital CSIC, Ciencia Abierta, 2022. Disponível em: < https://digital.csic.es/handle/1’-0261/271574> Acesso em: 27 mar. 2024.

OMETTO, José Carlos. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 425 p.

OMRANIAN, Ehsan; SHARIF, Hatim O.; TAVAKOLY, Ahmad A. How well can global precipitation measurement (GPM) capture hurricanes? Case study: Hurricane Harvey. **Remote Sensing**, v. 10, n. 7, p. 1150, 2018. DOI:

https://doi.org/10.3390/rs10071150 Disponível em: https://www.mdpi.com/2072-4292/10/7/1150 Acesso em: 27 mar. 2024.

OWEN, Laura E.; CATTO, Jennifer L.; STEPHENSON, David B.; DUNSTONE, Nick J. Compound precipitation and wind extremes over Europe and their relationship to extratropical cyclones. **Weather and Climate Extremes**, v. 33, p. 100342, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100342 Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212094721000384 Acesso em: 27 mar. 2024.

PAES JUNIOR, Nilton Santos. **Avaliação do processo de infiltração da água em solo residual de biotita-gnaisse para superfícies com diferentes declividades utilizando lisímetros**. 2013. 87f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental), Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2013.

PAIVA, Célia Maria. **Determinação das datas de início e fim da estação chuvosa e da ocorrência de veranicos na Bacia do Rio Doce**. Viçosa, MG: UFV, Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola), Universidade Federal de Viçosa. 1997. 65p.

PELLISON, Antonio Tadeu. **Desenvolvimento de um sistema automático de aquisição de dados de evapotranspiração de referência por meio de microcontroladores de código aberto e de baixo custo**. 2018. 88f. Tese (Doutorado em Agronomia - Irrigação e Drenagem), Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2018.

PELLISON, Antonio Tadeu; FRANCO, José Rafael; STUCCHI, Giovana; CALÇA, Marcus Vinicius Contes; RANIERO, Matheus Rodrigues; DAL PAI, Alexandre. Sistema automático de aquisição de dados de evapotranspiração de referência acoplado a um lisímetro de lençol freático constante. **Research, Society and Development**, v. 12, n. 5, p. e19412541720-e19412541720, 2023. DOI: https://doi.org/10.33448/rsd-v12i5.41720 Disponível em: https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/41720 Acesso em: 27 mar. 2024.

PENMAN, Howard Latimer. Evaporation: an introductory survey. **Netherland Journal of Agriculture Science**, v. 4, p. 9-29, 1956. DOI: https://doi.org/10.18174/njas.v4i1.17768 Disponível em: https://library.wur.nl/ojs/index.php/njas/article/view/17768 Acesso em: 27 mar. 2024.

PEREIRA, Adriana Camargo; SILVA, Gibson Zucca da; CARBONARI, Maria Elisa Ehrhardt. **Sustentabilidade, responsabilidade social e meio ambiente**. São José dos Campos: Saraiva Educação SA, 2017.

PEREIRA, Antonio Roberto; ANGELOCCI, Luiz Roberto; SENTELHAS, Paulo César. **Meteorologia Agrícola**. Departamento de Ciências Exatas, ESALQ, 2007. 173p.

PEREIRA, Antonio Roberto; SEDIYAMA, Gilberto Chodaku; VILLA NOVA, Nilson Augusto. **Evapotranspiração**. Fundag, 2013, 323p.

PEREIRA, Elson de Menezes. **Política externa brasileira, governança do clima e cooperação: a importância estratégica e operacional do INPE**. Tese (Doutorado Interinstitucional em Relações Internacionais e Desenvolvimento Regional). Universidade de Brasília, Universidade Federal do Pará, Brasília, 2019. 190 f.

PINHEIRO, Alan Bandeira; MENEZES, Beatriz Gomes de Oliveia; OLIVEIRA, Leonel Gois Lima; CARRARO, Wendy Beatriz Witt Haddad. Agenda 2030: alinhamento dos projetos estratégicos dos tribunais de justiça aos objetivos de desenvolvimento sustentável. **Gestão e Projetos: GeP**, v. 13, n. 2, p. 171-194, 2022.

PINHEIRO, Adilson; TEIXEIRA, Lizandra Poeta; KAUFMANN, Vander. Capacidade de infiltração de água em solos sob diferentes usos e práticas de manejo agrícola. **Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 4, n. 2, p. 188-199, 2009. DOI: doi:10.4136/ambiagua.97

PIRES, Tanile Lima. Estratégias de planeamento territorial para a mitigação e adaptação aos efeitos das alterações climáticas. Dissertação (Mestrado em Planejamento e Projecto Urbano), Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 2022. 101p.

PIVETTA, Carina R.; HELDWEIN, Arno B.; MALDANER, Ivan C.; RADONS, Sidinei R.; TAZZO, Ivonete F.; LUCAS, Dionéia D. Evapotranspiração máxima do pimentão cultivado em estufa plástica em função de variáveis fenométricas e meteorológicas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 768-775, 2010. DOI: https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000700013 Disponível em: https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/hkcWnzxGsjqtXxFfqkGsx9p/?lang=pt Acesso em: 27 mar. 2024.

RAIMUNDO, Clebson do Carmo. Análise de impacto das mudanças climáticas no setor de recursos hídricos: uma crítica sobre o cálculo de evapotranspiração potencial (ETo) em estudos desta natureza. 2017. 226 f. Tese (Doutorado em

Engenharia Civil: Recursos Hídricos)–Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

RAMALHO, Maria Catarina Caraças. **O aproveitamento hidroagrícola do Caia**: caracterização, evolução e gestão da água. Soluções de gestão da rega aplicada a casos de estudo. 2019. Dissertação (Mestrado em Agricultura Sustentável), Instituto Politécnico de Porto Alegre. 141f. 2019.

RANIERO, Matheus Rodrigues. **Suncounter**: programa computacional para contagem automatizada de horas de brilho solar registradas por heliógrafos. Dissertação (Mestrado em Agronomia - Energia na Agricultura), Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2020. 63f.

REZENDE, Leidiane de Paula. **Análise das estimativas de umidade do solo dos satélites SMOS e SMAP com o NDVI e variáveis atmosféricas**. Dissertação (Mestrado em Geografia). Universidade Federal de Minas Gerais. 135f. 2023.

RINCÓN, Angel; JORBA, Oriol; FRUTOS, Miguel; ALVAREZ, Leopoldo; BARRIOS, Fernando P.; GONZÁLEZ, Juan A. Bias correction of global irradiance modelled with weather and research forecasting model over Paraguay. **Solar Energy**, v. 170, p. 201-211, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.05.061 Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X18304948?casa_token=GSnqVXxl1bwAAAAA:dKF-FL6S8FCmt8YUvi_WgYkZb-2qXJaBYfewsl632EU1GJpz3l213x7h_w4vVzt_1EJlVMebLLI Acesso em: 27 mar. 2024.

RODRIGUES, Lineu Neiva. **Agricultura irrigada e sua importância na produção de alimento**: nexo água-alimento. 2022. Disponível em: < https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/71510678/artigo-agricultura-irrigada-e-sua-importancia-na-producao-de-alimento-nexo-agua-alimento#:~:text=Ela%20traz%20benef%C3%ADcios%20importantes%20relacionados,h%C3%ADdrica%2C%20cada%20vez%20mais%20comuns.> Acesso em: 27 mar. 2024.

RODRIGUES, Lineu Neiva; DOMINGUES, Antônio Félix; CHRISTOFIDIS, Demetrios. Agricultura irrigada e produção sustentável de alimento. Agricultura irrigada: desafios e oportunidades para o desenvolvimento sustentável. 1ed. **INOVAGRI**, Brasília, v. 1, p. 21-108, 2017.

RODRIGUES, Talmo Manhães de França Rodrigues; Senna, Mônica Carneiro Alves; Cataldi, Marcio. Simulação dos impactos climáticos da desertificação do Nordeste brasileiro. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, p. 1037-1047, 2019.

ROSSI, Taiza Juliana; ESCOBEDO, João Francisco; SANTOS, Cícero Manoel dos; ROSSI, Luciano Ronaldo; SILVA, Maurício Bruno Prado da; DAL PAI, Enzo. Global, diffuse and direct solar radiation of the infrared spectrum in Botucatu/SP/Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 448- 459, 2018. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.030 Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117312753?casa_token=C3ppu5IV_y8AAAAA:_VbzIIEb86-ezpbtcEbIf-PTyeuiZGYL9hoCE23g9d1SLj_PfSyba6VQQ1939zcdoDQ2TGM8Beg Acesso em: 27 mar. 2024.

RUEZZENE, Camila Bermond; MIRANDA, Renato Billia de; TECH, Adriano Rogério Bruno; MAUAD, Frederico Fábio. Preenchimento de falhas em dados de precipitação através de métodos tradicionais e por inteligência artificial. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 29, p. 177-204, 2021.

SANTOS, Alessandra Campos dos. **Estimativa da evapotranspiração em uma área remanescente de Cerrado sensu stricto utilizando metodologias de Sensoriamento Remoto e Eddy Covariance**. 2023. Tese de Doutorado em Engenharia Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. 2023. 147p.

SAPUCCI, Luiz Fernando; MACHADO, Luiz Augusto Toledo; MONICO, João Francisco Galera; HERDIES, Dirceu Luiz; ARAVÉQUIA, José Antônio; ANDREOLI, Rita Valéria; SOUZA, R. A. F. Aplicações dos valores do IWV provenientes das redes de receptores GPS para suporte à previsão numérica de tempo no Brasil. **Boletim da Sociedade Brasileira de Meteorologia**, v. 32, p. 49-55, 2008.

SARNIGHAUSEN, Valeria Cristina Rodrigues; GOMES, Francielly Guieiro; DAL PAI, Aleandre; RODRIGUES, Sergio Augusto. Estimativa da evapotranspiração de referência para Botucatu-SP por meio de modelos de regressão. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 28, 2021.

SCHMIDT, Carlos Daniel Seifert; PEREIRA, Francisco Adriano de Carvalho.; OLIVEIRA, Aureo Silva de; GOMES JÚNIOR, João Fonseca; VELLAME, Lucas Melo. Design, installation, and calibration of a weighing lysimeter for crop

evapotranspiration studies. **Water resources and Irrigation Management**, v. 2, n. 2, p. 77-85, 2013.

SCHÖNGART, Jochen; JUNK, Wolfgang J. Clima e hidrologia nas várzeas da Amazônia Central. In: JUNK, Wolfgang J.; PIEDADE, Maria Teresa Fernandez; WITTMANN, Florian; SCHÖNGART, Jochen. **Várzeas Amazônicas**: Desafios para um Manejo Sustentável, p. 44-65, 2020.

SEDIYAMA, Gilberto Chohaku. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 4, n. 1, p. 1-7, 1996.

SEDIYAMA, Gilberto Chohaku. Evapotranspiração: necessidade de água para as plantas cultivadas. **ABEAS**, 1998.

SIAS, Estael. **Pacífico muito perto de anomalias de Super El Niño**. Metsul. 2023. Disponível em: https://metsul.com/pacifico-muito-perto-de-anomalias-de-super-el-nino/ Acesso em: 27 mar. 2024.

SILVA, Clescy Oliveira da; ANDRADE JUNIOR, Anderson Soares de; SOUSA, Valdemício Ferreira; RIBEIRO, Valdenir Queiroz; SENTELHAS, Paulo César. Estimativa da evapotranspiração de referência com dados climáticos limitados no estado do Piauí. **Revista Espacios**, v. 37, n. 23, 2016.

SILVA, Maurício Bruno Prado da; ESCOBEDO, João Francisco; ROSSI, Taiza Juliana; SANTOS, Cícero Manoel dos; SILVA, Silvia Helena Modenese Gorla da. Performance of the Angstrom-Prescott Model (AP) and SVM and ANN techniques to estimate daily global solar irradiation in Botucatu/SP/Brazil. **Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**, v. 160, p. 11-23, 2017. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.04.001 Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364682616304448?casa_token=SuDmERgcvccAAAAA:FelQaJEr8q165p_pyLhhOaITe8gKazX3-bTt_0LHjRJyJR03aJGdhdXlWdafSmvVWpIoLDU3YY4 Acesso em: 27 mar. 2024.

SILVEIRA, André Luiz Lopes da. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica, em hidrologia ciência e aplicação. In: TUCCI, Carlos Eduardo Morelli. **Hidrologia**. Coleção ABRH, 2 ed., v. 4, p. 120, 2001.

SIQUEIRA, Mariana da Silva. **Estimativa da evapotranspiração para uma bacia hidrográfica no semiárido brasileiro**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia), Universidade de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas. 2020. 98f.

SOARES, Paulo Valladares. **As interrelações de elementos do meio físico natural e modificado na definição de áreas potenciais de infiltração na porção paulista da bacia do rio Paraíba do Sul**. 2005. 192f. Tese (Doutorado), Universidade Estadual de Campinas, 2005.

SOARES, Sérgio Rodrigues Ayrimoraes; FONTENELLE, Thiago Henriques; FERREIRA, Daniel Assumpção Costa; GONÇALVES, Marco Vinícius Castro; DOURADO NETO, Durval; BARRETTO, Alberto Giaroli de Oliveira Pereira; FENDRICH, Arthur Nicolaus; SAFANELLI, José Lucas; ARAUJO, Marcela Almeida de; COUTINHO, Pedro Alves Quilici; MAULE, Rodrigo Fernando. **Atlas Irrigação**: uso da água na agricultura irrigada. . Brasília, DF: ANA (Agência Nacional das Águas). 2021. Disponível em: https://www.gov.br/ana/pt-br/centrais-de-conteudos/publicacoes/publicacoes-1. Acesso em: 27 mar. 2024.

SOUSA, Francielly Guieiro Gomes de. **Determinação da evapotranspiração da cultura e coeficiente de cultivo do lúpulo em diferentes texturas de solo**. 2021. Tese (Doutorado em Agronomia - Irrigação e Drenagem), Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2021. 105f.

SOUSA, Jacqueline Nascimento; PEREIRA, Fábio Nelson de Sousa; SILVA, Alineaurea Florentino; SILVA, Marcos Antônio Vanderlei; PACHECO, Clécia Simone G. Rosa. Impactos das mudanças climáticas na irrigação: uma análise prospectiva. p. 207-221. In: PACHECO, Clécia Simone G. Rosa**. Mudanças climáticas e seus impactos socioambientais concepções, fundamentos, teorias e práticas mitigadoras**. 388p., 2023. https://dx.doi.org/DOI: 10.37885/230713683 Disponível em: https://www.editoracientifica.com.br/books/mudancas-climaticas-e-seus-impactos-socioambientais-concepcoes-fundamentos-teorias-e-praticas-mitigadoras Acesso em: 27 mar. 2024.

SOUSA, Natalia Bastos de. **Uma metodologia para identificação de perdas não técnicas em unidades consumidoras irrigantes de café do estado de São Paulo**. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Santa Maria. 148f. 2022.

SOUZA, Jorge Luiz Moretti de. Plataforma Moretti. **Apresentações (slides) das unidades didáticas de disciplina "Fundamentos de Hidrologia, Irrigação e Drenagem (FHID).** Disponível em: https://www.moretti.agrarias.ufpr.br/publicacoes.htm Acesso em: 10 jul. 2024.

SUBRAMANIAN, Aishwarya; NAGARAJAN, Aditya Mosur; VINOD, Sruthi; CHAKRABORTY, Samarshi; SIVAGAMI, Krishanasamy; THEODORE, Thomas; SATHYANARAYANAN, Sri Shalini; TAMIZHDURAI, Perumal; MANGESH, V. L. Long-term impacts of climate change on coastal and transitional eco-systems in India: an overview of its current status, future projections, solutions, and policies. **RSC advances**, v. 13, n. 18, p. 12204-12228, 2023. DOI: 10.1039/D2RA07448F Disponível em: https://pubs.rsc.org/en/content/articlehtml/2023/ra/d2ra07448f Acesso em: 27 mar. 2024.

TATSCH, Jônatan. **Hidrometeorologia**. 2020. Disponível em: <https://lhmet.github.io/hidrometeobook/> Acesso em: 27 mar. 2024.

TERAMOTO, Érico Tadao; Santos, Cícero Manoel dos; Escobedo, João Francisco; Pai, Alexandre Dal; Silva, Silvia Helena Modenese Gorla da. Comparação de Métodos de Estimativa da Radiação Solar Ultravioleta Horária: Modelos Empíricos, Redes Neurais Artificiais e Máquina de Vetores de Suporte. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, p. 35-43, 2020. DOI: https://doi.org/10.1590/0102-7786351010 Disponível em: https://www.scielo.br/j/rbmet/a/t8yzgpjs4jTct3jnYw7FLgF/?lang=pt&format=html Acesso em: 27 mar. 2024.

THORSTENSEN, Vera Helena; ZUCHIERI, Amanda Mitsue. **OCDE e agricultura: meio ambiente e mudança climática**. 2021. Disponível em: < https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/handle/10438/31317> Acesso em: 27 mar. 2024.

THORNTHWAITE, Charles Warren. Na approach toward a rational classification of climate. **Geographical review**, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948. DOI: https://doi.org/10.2307/210739 Disponível em: https://www.jstor.org/stable/210739?casa_token=xhSf4SLeH_MAAAAA%3Ax4q4t_MP4hBhi8LoaAcE4aPkxeBcJ_GXpEbX-hvouxKP_OxlhJnIKoyv1jz-Oy4zFC47whz-FPRUkTbfCMV7FcDp-VfLAzzkFcUSiHRv_97AT16rjYTs Acesso em: 27 mar. 2024.

TORREZ, Elizabeth C. Braun de; FROCK, Catherine F.; BOONE, Wesley W.; SOVIE, Adia R.; MCCLEERY, Robert A. Seasick: why value ecosystems severely threatened by sea-level rise?. **Estuaries and Coasts**, v. 44, p. 899-910, 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s12237-020-00850-w Diponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s12237-020-00850-w Acesso em: 27 mar. 2024.

TUCCI, Carlos Eduardo Morelli; BELTRAME, Lawson Francisco de Souza. Evaporação e Evapotranspiração. P. 253-288, 2001. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia**: Ciência e aplicação. 2 ed. 2001

ULIANA, Eduardo Morgan; SILVA, Demetrius David da; MOREIRA, Michel Castro; PEREIRA, Silvio Bueno; PEREIRA, Donizete dos Reis. Modelos hidrológicos SAC-SMA E IPH II: calibração e avaliação do desempenho na estimativa de vazões da bacia do rio Piracicaba (MG). **Irriga**, v. 25, n. 2, p. 202-222, 2020. DOI: 10.15809/irriga.2020v25n2p202-222. Disponível em: https://actaarborea.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/2749. Acesso em: 27 mar. 2024.

VAREJÃO-SILVA, Mário Adelmo. **Meteorologia e Climatologia**. v. 2, 2006.

VAROTSOS, Costas; SARLIS, Nicolau V.; MAZEI, Yuri; SALDAEV, Damir; EFSTATHIOU, Maria. A Composite Tool for Forecasting El Niño: The Case of the 2023–2024 Event. **Forecasting**, v. 6, n. 1, p. 187-203, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/forecast6010011 Disponível em: https://www.mdpi.com/2571-9394/6/1/11 Acesso em: 29 abr. 2024.

VICENTIN, Tiago Aparecido. **Desenvolvimento e calibração de um atmômetro modificado na superfície evaporativa**. 2018. Tese (Doutorado em Agronomia - Irrigação e Drenagem), Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2018. 113f.

VIEIRA, Luciano; PICULLI, Francisco José. **Meteorologia e climatologia agrícola**. Universidade Estadual de Maringá, Cidade Gaúcha, 2009.

VILLELA, Andrey A. C.; MORAES, Cristiane G..; PEREIRA, Ediléia D. Impactos do uso e ocupação na porção superior da Bacia do Rio Paciência-MA. **Geotecnologias, Agricultura de Precisão e Manejo dos Recursos Naturais**, p. 86, 2016.

WANG, Dong; YATES, S. R.; ERNST, F. F. Determining soil hydraulic properties using tension infiltrometers, time domain reflectometry, and tensiometers. **Soil Science Society of America Journal**, v. 62, n. 2, p. 318-325, 1998. DOI: https://doi.org/10.2136/sssaj1998.03615995006200020004x Disponível em: https://acsess.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaj1998.03615995006200020004x?casa_token=N767tWPKs1oAAAAA:PiiDOJPTlTY3fACSifLOvBxTcqPO3lau-KGrU936s-1dga1f0PSA2VFCcWJM1hlSaar8YUXeAC4nHdYm Acesso em: 27 mar. 2024.

WIDMOSER, Peter. A Discussion on and alternative to Penman–Monteith equation. **Agricultural Water Management**, v. 96, n. 4, p. 711–721, 2009. DOI: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2008.10.003 Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377408002643?casa_token=pTiymNHWOscAAAAA:liEReiNvodAVMxHg-5pMFiw404QRO-4i00j-aTtTfF5zm1Eh1EQblZoajk9VDa9p5HFofxeSFHM Acesso em: 27 mar. 2024.

WINDSOR, Peter Andrew. Progress with livestock welfare in extensive production systems: lessons from Australia. **Frontiers in Veterinary Science**, v. 8, p. 674482, 2021. DOI: https://doi.org/10.3389/fvets.2021.674482 Disponível em: https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fvets.2021.674482/full Acesso em: 27 mar. 2024.

WILLMOTT, Cort J.; ACKLESON, Steven G.; DAVIS, Robert E.; FEDDEMA, Johannes J.; KLINK, Katherine M.; LEGATES, David R.; O'DONNELL, James; ROWE, Clinton M. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**: Oceans, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985. DOI: https://doi.org/10.1029/JC090iC05p08995 Disponível em: https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/Jc090ic05p08995?casa_token=l4agea-KxpsAAAAA:f8hIz-DCrdP9BLVGTSA6Pd_hUTavR_-fB53V4DI1nv9IG2MbdHFGF8W2bupN3UO2FwrPQwtqnJwm2Wps Acesso em: 27 mar. 2024.

XING, Zisheng; CHOW, Lien; MENG, Fan-Rui; REES, Herb W.; STEVENS, Lionel; MONTEITH, John. Validating evapotranspiration equations using Bowen Ratio in New Brunswick, Maritime, Canada. **Sensors**, v. 8, n. 1, p. 412–428, 2008. DOI: https://doi.org/10.3390/s8010412 Disponível em: https://www.mdpi.com/1424-8220/8/1/412 Acesso em: 27 mar. 2024.

YNOUE, Rita Yuri; REBOITA, Michelle S.; AMBRIZZI, Tércio; SILVA, Gyrlene A. M. da. **Meteorologia**: noções básicas. Oficina de Textos, 2017.

ZOCCHI, Paulo. **O que as enchentes no Sul têm a ver com as mudanças climáticas**. 2024. Disponível em: https://guiadoestudante.abril.com.br/atualidades/o-que-as-enchentes-no-sul-tem-a-ver-com-as-mudancas-climaticas/ Acesso em 20 mai. 2024.