

**WILLIAM JOSÉ DELLABIGLIA**

**ANÁLISE MULTIVARIADA DE ELEMENTOS AGROMETEOROLÓGICOS E  
COMPARAÇÃO DE EXIGÊNCIA TÉRMICA DA CULTURA DO LÚPULO EM  
AMBIENTE PROTEGIDO**

**Botucatu**

**2024**



**WILLIAM JOSÉ DELLABIGLIA**

**ANÁLISE MULTIVARIADA DE ELEMENTOS AGROMETEOROLÓGICOS E  
COMPARAÇÃO DE EXIGÊNCIA TÉRMICA DA CULTURA DO LÚPULO EM  
AMBIENTE PROTEGIDO**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Campus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia (Irrigação e Drenagem)

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Dal Pai

Co orientador: Prof. Dr. Sergio Augusto Rodrigues

**Botucatu**

**2024**

D357a

Dellabiglia, William José

Análise multivariada de elementos agrometeorológicos e  
comparação de exigência térmica da cultura do lúpulo em ambiente  
protegido / William José Dellabiglia. -- Botucatu, 2024

109 p. : tabs., fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP),  
Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu

Orientador: Alexandre Dal Pai

Coorientador: Sergio Augusto Rodrigues

1. Lúpulo. 2. Análise multivariada. 3. Ambiente protegido. 4.  
Exigência térmica. I. Título.

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

Essa ficha não pode ser modificada.

## CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

Título:

**ANÁLISE MULTIVARIADA DE ELEMENTOS AGROMETEOROLÓGICOS E COMPARAÇÃO DE MÉTODOS DE EXIGÊNCIA TÉRMICA DA CULTURA DO LÚPULO EM AMBIENTE PROTEGIDO**

AUTOR: WILLIAM JOSÉ DELLABIGLIA

ORIENTADOR: ALEXANDRE DAL PAI

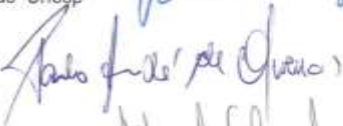
COORIENTADOR: SERGIO AUGUSTO RODRIGUES

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Agronomia (Irrigação e Drenagem), pela Comissão Examinadora:

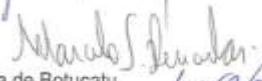
Prof. Dr. SERGIO AUGUSTO RODRIGUES (Participação Presencial)  
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agrômicas Unesp



Prof. Dr. PAULO ANDRÉ DE OLIVEIRA (Participação Presencial)  
Agronegócio / Faculdade de Tecnologia de Botucatu



Prof. Dr. MARCELO SCANTAMBURLO DENADAI (Participação Presencial)  
Laboratório Agroflorestal de Biomassa e Bioenergia / Faculdade de Tecnologia de Botucatu



Prof.ª Dr.ª VALERIA CRISTINA RODRIGUES SARNIGHAUSEN (Participação Presencial)  
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu UNESP



Prof. Dr. ENZO DAL PAI (Participação Presencial)  
Engenharia Rural e Socioeconomia / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu



Botucatu, 27 de junho de 2024.



À minha amada e querida família,  
meus pais, Márcia e José David,  
minha esposa Aline e ao meu filho  
Matteo, que trouxe muita luz e alegrias  
para minha vida, com amor e gratidão,  
dedico.



## **AGRADECIMENTOS**

A Deus.

Aos meus pais, José David e Márcia, por todo o apoio e incentivo a continuar trilhando o caminho acadêmico.

À minha esposa, Aline, por toda a compreensão, por sempre estar ao meu lado, me ajudando e me incentivando a não desistir desse sonho.

À família por todo apoio.

Aos professores Dr. Alexandre Dal Pai e Sérgio Augusto Rodrigues, pela paciência, pelos ensinamentos e pela amizade.

Aos integrantes do LUPAM, por toda a dedicação e trabalho árduo nos projetos, sem o qual este trabalho não existiria.

Aos demais professores, professoras e funcionários do Departamento de Biotecnologia e Bioprocessos, pelos ensinamentos e apoio.

À Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu e o Programa de Pós Graduação Irrigação e Drenagem, pela oportunidade de realizar o Doutorado e suporte para realização do experimento.

A todos de que colaboraram com este trabalho, direta ou indiretamente.



## RESUMO

Os objetivos deste estudo consistiram em desenvolver uma revisão acerca dos parâmetros agrometeorológicos para a cultura do lúpulo em ambiente protegido, o que pode vir a ser relevante para a expansão do cultivo de lúpulo em áreas não tradicionais, corroborando para o avanço de métodos agrícolas mais sustentáveis e eficientes. O cultivo de lúpulo está em ascensão no Brasil, impulsionado pelo crescimento das cervejarias artesanais, que estimulou um aumento na produção nacional de lúpulo, com a introdução de variedades importadas e o desenvolvimento de cultivares adaptadas ao clima brasileiro. A agrometeorologia desempenha um papel importante no monitoramento das condições atmosféricas e no planejamento agrícola. Ela fornece informações valiosas para os agricultores, ajudando a tomar decisões informadas sobre o cultivo. Com base nas informações sobre o cultivo de lúpulo no Brasil, especialmente em relação às variáveis agrometeorológicas e sua influência nas culturas, faz necessário a realização de estudos para entender como o clima, as chuvas, o solo e a altitude afetam o desenvolvimento da planta. O cultivo de lúpulo em ambiente protegido é uma prática relevante especialmente para condução de matrizes, pois permite maior controle sobre o ambiente de cultivo, sendo a temperatura e a umidade relativa do ar fatores cruciais e o controle adequado dessas variáveis influencia o crescimento e a produção da cultura. Devido à grande quantidade de informações a serem consideradas quanto aos parâmetros agrometeorológicos adequados para o desenvolvimento do lúpulo, e em vista das informações obtidas nesse estudo, a análise de componentes principais (do inglês Principal Component Analysis, PCA), técnica estatística para reduzir a dimensionalidade dos dados, foi utilizada com o intuito de analisar dados agrometeorológicos complexos, identificando padrões e relações que afetam as culturas, o que auxiliou a compreender que a temperatura do ar tem bastante influência sobre a cultura do lúpulo. Isso permite um manejo mais preciso das culturas, visando a alta produtividade, boa qualidade e economia de recursos. Compreender como o acúmulo térmico influencia a cultura do lúpulo pode auxiliar os produtores na tomada de decisões a partir de uma técnica simples, possibilitando que os estádios mais importantes coincidam com as melhores condições de temperatura do ar e radiação.

**Palavras-chave:** *Humulus lupulus*; PCA; Graus-dias.



## ABSTRACT

The objectives of this study were to develop a review of the agrometeorological parameters for hop cultivation in a protected environment, which may be relevant for the expansion of hop cultivation in non-traditional areas, supporting the advancement of more sustainable agricultural methods. and efficient. Hop cultivation is on the rise in Brazil, driven by the growth of craft breweries, which has stimulated an increase in domestic hop production through the introduction of imported varieties and the development of cultivars adapted to the Brazilian climate. Agrometeorology plays an important role in monitoring atmospheric conditions and agricultural planning. It provides valuable information for farmers, helping them make informed decisions about cultivation. Based on information about hop cultivation in Brazil, especially regarding agrometeorological variables and their influence on crops, makes it necessary to conduct studies to understand how climate, rainfall, soil, and altitude affect plant development. The hop cultivation in protected environment is a relevant practice, especially for conducting mother plants, as it allows greater control over the growing environment with temperature and relative humidity being crucial factors and adequate control of these variables influences growth and the production of culture Due to the large amount of information to be considered regarding appropriate agrometeorological parameters for hop development, and in view of the information obtained in this study, principal component analysis (PCA), a statistical technique to reduce the dimensionality of the data, was used with the aim of analyzing complex agrometeorological data, identifying patterns and relationships that affect crops, which helped to understand that air temperature has a considerable influence on hop cultivation. This allows for more precise crop management, aiming for high productivity, good quality and saving resources. Understanding how thermal accumulation influences hop cultivation can help producers make decisions using a simple technique, enabling the most important stages to coincide with the best air temperature and radiation conditions.

**Keywords:** *Humulus lupulus*; PCA; Degree days.



## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL .....	15
CAPÍTULO 1 .....	17
MONITORAMENTO E ANÁLISE MULTIVARIADA DE VARIÁVEIS AGROMETEOROLÓGICAS PARA FINS DE MANEJO DA CULTURA DO LÚPULO ( <i>Humulus lupulus L.</i> ) EM AMBIENTE PROTEGIDO .....	17
1.1 INTRODUÇÃO.....	17
1.2.1 Lúpulo: características e crescimento .....	19
1.2.2 Cultivo em ambiente protegido.....	21
1.2.3 Variáveis agrometeorológicas .....	22
1.3 MATERIAL E MÉTODOS .....	24
1.3.1 Estádios fenológicos .....	25
1.3.2 Avaliações.....	26
1.3.2.1 Variáveis agrometeorológicas .....	27
1.3.2.2 Massa fresca e massa seca de cones .....	28
1.3.2.3 Análise estatística dos dados .....	28
1.3.2.3.1 Avaliação de valores ausentes ou <i>missings</i> .....	29
1.3.2.3.2 Análise de componentes principais (PCA) .....	30
1.3.2.3.3 Análise estatística inferencial .....	30
1.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	31
1.4.1 Análise de dados ausentes ou <i>missings</i> .....	31
1.4.2. Análise exploratória da produtividade e das variáveis agrometeorológicas com dados imputados .....	38
1.5 CONCLUSÕES.....	71
REFERÊNCIAS .....	72
CAPÍTULO 2 .....	78
EXIGÊNCIA TÉRMICA DA CULTURA DO LÚPULO ( <i>Humulus lupulus L.</i> ): UMA REVISÃO E ESTUDO DE CASO NO CENTRO SUL PAULISTA .....	78
2.1 INTRODUÇÃO.....	78
2.2 REVISÃO DE LITERATURA.....	79

2.2.1 Exigência térmica .....	79
2.2.2 Temperatura basal inferior e superior .....	80
2.3 MATERIAL E MÉTODOS .....	81
2.3.1 Revisão sistemática sobre cultivo de lúpulo e graus-dias.....	82
2.3.2 Estudo de caso sobre acúmulo térmico em cultivo de lúpulo em ambiente protegido.....	83
2.3.3 Estádios fenológicos do lúpulo .....	84
2.3.4 Massa fresca e massa seca de cones .....	85
2.3.5 Cálculos de acúmulo de calor em graus-dia .....	85
2.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	86
2.5 CONCLUSÕES .....	103
REFERÊNCIAS.....	105
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	108
REFERÊNCIAS.....	109

## INTRODUÇÃO GERAL

O gênero *Humulus* se divide em três espécies, *H. yunnanensis*, *H. Japonicus* e *H. lupulus* L (Gargani *et al.*, 2017; Spósito *et al.*, 2019), sendo aproximadamente 200 variedades cultivadas no mundo (Getty, 2019). As plantas desse gênero são caracterizadas como perenes, herbáceas, dióicas, anemófilas, rizomatosas, trepadeiras dextrogiras e que produzem inflorescências (Pearson; Smith; Chen, 2016; Rossini *et al.*, 2016; Bernert, 2018; Durello *et al.*, 2019).

As plantas de lúpulo são constituídas por uma parte aérea que se renova a cada ciclo, composta por ramos herbáceos (principal e laterais), folhas, inflorescências masculinas ou femininas, e sistema radicular perene, composto por raízes e rizomas (Alves, 2018; Spósito *et al.*, 2019).

A cultura do lúpulo (*Humulus lupulus* L.) tem ganhado destaque em várias regiões, impulsionada pelo aumento da demanda por cervejas artesanais e pela busca por ingredientes de alta qualidade, no entanto, o cultivo bem-sucedido dessa planta em climas não tradicionais ou desafiadores é uma tarefa complexa. Diante desse desafio, o uso de ambientes protegidos, como as casas de vegetação, surge como uma alternativa promissora para viveiro de mudas ou para estudos científicos visando um controle mais acurado das variáveis agrometeorológicas que influenciam diretamente o desenvolvimento da cultura.

O foco do presente estudo está no monitoramento e análise multivariada de características agrometeorológicas. A partir dessa abordagem, objetiva-se entender o cultivo do lúpulo em ambientes controlados, pois estes possibilitam um ajuste mais eficiente de fatores como temperatura, umidade, luminosidade e ventilação, otimizando assim seu crescimento e controle da produção.

Uma das ferramentas utilizadas para avaliar simultaneamente diversas variáveis, considerando o relacionamento simultâneo das mesmas, é a Análise de Componentes Principais (do inglês *Principal Component Analysis*, PCA), uma técnica estatística multivariada amplamente utilizada em situações de dados complexos para identificar padrões e relações entre variáveis complexas (Ferreira, 2008; Viali, 2015). A PCA pode ser utilizada para explorar as interações entre as variáveis agrometeorológicas e seu impacto na produtividade, permitindo a identificação de padrões e relações subjacentes entre múltiplas variáveis, além de oferecer uma visão aprofundada das complexas dinâmicas envolvidas no crescimento da planta em ambiente protegido.

Um dos parâmetros a ser considerado é o “graus-dias”, e refere-se à quantidade de calor acumulada pelas plantas em uma determinada região ao longo do tempo. É utilizado como ferramenta auxiliar para gerenciar o desenvolvimento de culturas e a ocorrência de eventos agrícolas, como o florescimento de plantas, a maturação e a época de colheita. O conceito de graus-dias está relacionado à necessidade de uma determinada quantidade de calor para crescer e se desenvolver, bem como as plantas possuem uma temperatura basal, que é a temperatura abaixo da qual o desenvolvimento da planta é limitado e/ou paralisado (Pedro-Júnior; Sentelhas, 2003).

A temperatura basal de uma planta refere-se à temperatura mínima necessária para que ela inicie o crescimento ativo. Cada espécie apresenta determinada faixa de temperatura basal, que é influenciada pela sua adaptação evolutiva ao ambiente em que cresce naturalmente.

Embora a temperatura basal seja um fator determinante, as plantas são igualmente influenciadas por diversos estímulos ambientais, como a disponibilidade de água, nutrientes e luz. Portanto, a compreensão da temperatura basal representa apenas uma parte do panorama mais abrangente que afeta o cultivo e o desenvolvimento saudável das plantas.

Assim os objetivos deste estudo foram desenvolver uma revisão acerca dos parâmetros agrometeorológicos para a cultura do lúpulo, com o intuito de oferecer conhecimentos e percepções significativos para expandir o cultivo de lúpulo em regiões não convencionais, fornecendo uma base sólida para o desenvolvimento de práticas agrícolas mais sustentáveis e eficazes; e abordar o acúmulo de graus-dias durante o cultivo de lúpulo, correlacionando os estádios de desenvolvimento em ambiente protegido, visando implementar estratégias de cultivo mais eficazes.

Desta forma, esta tese está estruturada em dois capítulos, onde o capítulo 1 aborda as variáveis agrometeorológicas e suas correlações com o cultivo de lúpulo em ambiente protegido, visando uma melhor compreensão das inter e intra relações das características agrometeorológicas durante os estádios da produção agrícola da cultura avaliadas em duas safras; e o segundo capítulo envolve a análise do acúmulo de graus-dias na cultura do lúpulo cultivado em ambiente protegido, na região de Botucatu/SP, visando aprimorar o manejo da cultura. A justificativa deste trabalho é enriquecer o conhecimento e promover práticas agrícolas sustentáveis na produção de lúpulo.

## CAPÍTULO 1

### **MONITORAMENTO E ANÁLISE MULTIVARIADA DE VARIÁVEIS AGROMETEOROLÓGICAS PARA FINS DE MANEJO DA CULTURA DO LÚPULO (*Humulus lupulus L.*) EM AMBIENTE PROTEGIDO**

#### 1.1 INTRODUÇÃO

A cultura do lúpulo vem crescendo nos últimos anos no Brasil, sendo que se trata de uma cultura bastante estudada e difundida nos EUA e Europa, sendo os maiores produtores os EUA e a Alemanha. No Brasil a cultura foi recentemente introduzida, mas ganhou grande importância com o crescimento das cervejarias artesanais, promovendo uma demanda ainda maior de lúpulo, que em sua maioria, é importado (Dodds, 2017). Porém iniciou-se uma escalada na produção de lúpulo nacional, primeiramente com variedades importadas, e posteriormente com estudos que permitiram o desenvolvimento de cultivares brasileiras mais adaptadas ao clima do país (Sousa, F., 2021).

Um aspecto importante no manejo da cultura é o fotoperíodo, que se refere à quantidade de luz recebida pelas plantas ao longo do dia. Essa variável é particularmente importante, pois o lúpulo é uma planta de dias longos, necessitando de um período prolongado de luz solar para florescer adequadamente (Spósito et al., 2019). Nas condições brasileiras, onde a duração do dia varia menos ao longo do ano em comparação com regiões temperadas, a compreensão e a manipulação do fotoperíodo se tornam ainda mais essenciais.

A fotossíntese é um dos fatores mais determinantes na produtividade agrícola. A taxa fotossintética da planta depende de vários fatores, sendo o principal deles, o máximo aproveitamento da luz solar, que pode ser obtido com o manejo correto da cultura; incluindo plantio e densidades de plantas; adubação; podas e disponibilidade hídrica adequados (Taiz *et al.*, 2017).

O manejo adequado da irrigação pode permitir a economia de água e ter efeito positivo no desenvolvimento da cultura, visto que o excesso de água pode, também, ocasionar estresse às plantas.

Embora nos últimos anos a literatura sobre a cultura do lúpulo no Brasil expandiu, são necessários estudos sobre o desenvolvimento das variedades existentes sob a

influência dos diferentes climas, regimes de chuvas, tipos de solo e altitudes de cultivo brasileiros.

Neste contexto, o monitoramento e análise de variáveis agrometeorológicas em ambientes protegidos são de fundamental importância para garantir um controle adequado do ambiente de cultivo, propício ao crescimento, desenvolvimento e saúde das plantas cultivadas, possibilitando assim que os produtores possam ajustar as condições em ambiente protegido de acordo com as necessidades específicas das culturas, com otimização de recursos naturais e elevada produção.

A temperatura do solo influencia diretamente os processos biológicos e químicos que ocorrem no ambiente próximo as raízes das plantas. Temperaturas muito baixas podem reduzir a capacidade da planta absorver água e nutrientes, em contrapartida, temperaturas muito altas podem causar estresse térmico nas raízes, danificando tecidos sensíveis. Monitorar esse parâmetro pode fornecer informações significativas para o manejo do lúpulo.

Em estudos agrometeorológicos é comum o interesse em conhecer as associações de parâmetros meteorológicos, climáticos e produtivos no manejo de diversas culturas agrícolas, sendo normalmente utilizado uma grande quantidade de variáveis. Neste cenário, análise de componentes principais (PCA) é uma técnica estatística usada para reduzir a dimensionalidade de conjuntos de dados, facilitando o entendimento do relacionamento simultâneo das variáveis do estudo. A PCA permite a redução da dimensionalidade, mantendo as informações essenciais contidas nesses dados. Ela busca identificar os principais padrões e relações existentes nos dados, permitindo uma representação mais compacta e compreensível.

Considerando o crescimento do cultivo do lúpulo no Brasil, o número reduzido de estudos agrometeorológicos desta cultura e a necessidade, neste campo de estudo, de avaliar uma quantidade grande de variáveis, o objetivo do presente estudo é monitorar e avaliar o perfil agrometeorológico em ambiente protegido e em uma estação meteorológica, em função dos estádios de desenvolvimento do lúpulo e, conseqüentemente, avaliar a relação das variáveis agrometeorológicas com a produtividade de cones de lúpulo no município de Botucatu-SP. Esta pesquisa pode auxiliar na escolha de variáveis para estudos visando estimar as condições meteorológicas em ambientes protegidos a partir de dados externos.

## 1.2 REVISÃO DE LITERATURA

### 1.2.1 Lúpulo: características e crescimento

O lúpulo (*Humulus lupulus L.*) é uma planta trepadeira com crescimento vigoroso, podendo atingir até 9 m de altura, apresenta forte dominância apical, o que significa que para não cessar o crescimento vertical, não surgem ramos laterais (Figura 1). Esse hábito de crescimento exige uma estrutura de plantio complexa e, na maioria das vezes, exige alto custo de implantação para conduzir a planta, afetando a colheita, uma vez que é feita de forma manual ou mecânica cortando toda a planta próximo ao solo e então são retirados os cones (flores femininas) em diversos estádios fenológicos (alguns ainda imaturos e outros já “passados”) (Silva, 2015; Pearson; Smith; Chen, 2016; Rossini et al., 2016; Bernert, 2018; Durello; Silva; Bogusz Júnior, 2019).

**Figura 1.** Plantas de lúpulo em ambiente protegido.



Fonte: Elaboração própria.

A luz é fator de grande importância para a produção de flores e frutos, visto que todos os processos do crescimento da planta, o desenvolvimento de gemas floríferas e dos frutos requerem carboidratos que são produzidos pela fotossíntese nas folhas (Rajapakse *et al.*, 1999; Taiz *et al.*, 2017). Quando ocorre a transição para o florescimento, o suprimento de carboidratos nas gemas vegetativas é aumentado, por meio do aumento da atividade fotossintética e hidrólise de amido (Bodson; Outlaw, 1985; Taiz *et al.*, 2017).

O lúpulo é um dos quatro ingredientes essenciais das cervejas, sendo os outros três: água, levedura e uma fonte de carboidrato (normalmente cevada ou trigo). Adicionado a bebida para dar amargor, sabores e aromas variados de acordo com sua composição (teores de  $\alpha$ -ácidos;  $\beta$ -ácidos e óleos essenciais), além de ser um conservante natural (McAdam *et al.*, 2014). A adição de lúpulo confere as características de amargor da cerveja, em função da concentração de  $\alpha$ -ácidos da variedade, porém como estes são insolúveis em água, necessitam ser isomerizados a iso- $\alpha$ -ácidos, por meio do processo de fervura (Kunze, 2006; Nakawuka *et al.*, 2017).

Trata-se de uma planta dióica, apresenta plantas masculinas e plantas femininas. As flores das plantas masculinas possuem função apenas para reprodução e melhoramento; já as flores da planta feminina são espigas curtas, denominadas cones, que apresentam uma ráquis central e brácteas e bractéolas que protegem a flor (Figura 2A) (Rodrigues; Morais; Castro, 2015, Getty, 2019); no interior dos cones, encontram-se as glândulas de lupulina (Figura 2B) que armazenam grandes quantidades de resinas e óleos essenciais (Faray; Wessjohann, 2012).

**Figura 2. A.** Inflorescências de lúpulo, popularmente chamadas de cones. **B.** Inflorescências cortadas ao meio para visualização da lupulina.



Fonte: Elaboração própria.

A cultura do lúpulo no Brasil não se restringe apenas à produção de matéria-prima para cervejarias. Muitos produtores têm investido na criação de lúpulos aromáticos e exclusivos, buscando explorar as características únicas do *terroir* brasileiro. Essa diversidade de lúpulos locais contribui para a criação de cervejas com sabores e aromas distintos, fortalecendo a identidade da cerveja artesanal brasileira (Spósito et al., 2019).

O grande valor comercial do lúpulo está relacionado com sua composição,  $\alpha$ -ácidos e óleos essenciais, que variam de uma variedade para outra e assim obtém-se inúmeras combinações que permitem a criação de outros inúmeros aromas e amargores. Quantificar esses valores de  $\alpha$ -ácidos e óleos essenciais nos cones e entender melhor a fisiologia da planta e os fatores que afetam a produção de tais elementos são fundamentais para garantir a qualidade do produto final (cone) tanto para o produtor quanto para o consumidor (Getty, 2019; Spósito et al., 2019).

### 1.2.2 Cultivo em ambiente protegido

O método de produção agrícola que ocorre em ambientes protegidos tem como principal objetivo proteger as plantas das condições climáticas adversas, bem como de pragas e doenças, permitindo maior controle sobre o crescimento e desenvolvimento das culturas, além de permitir cultivos fora da época habitual da planta; em virtude das alterações microclimáticas que ocorrem no interior dessas estruturas. Essas mudanças internas, como variações na umidade do ar, temperatura, umidade do solo, índice de insolação e outros fatores, têm um impacto direto no desenvolvimento das plantas, desde os estádios vegetativos até os reprodutivos. Portanto, é essencial medir e controlar essas variáveis para garantir o crescimento saudável das plantas (Sonsteby; Heide, 2017).

O cultivo em ambiente protegido associado a utilização de irrigação, oferece maior eficiência do uso da água, diminuindo as perdas promovidas por deficiência hídrica, além de possibilitar o planejamento para múltiplas safras ao longo do ano, aproveitando o outono e o inverno, que não são rigorosos no Brasil (Guimarães, 2020).

Em ambientes protegidos, a temperatura é um fator agrometeorológico de extrema importância, exercendo influência direta sobre as funções vitais das plantas (Purqueiro; Goto, 2005). Por isso, o controle adequado da temperatura é considerado essencial para o sucesso do cultivo em geral. Alguns sistemas utilizam o resfriamento

por evaporação da água para reduzir a temperatura do ar, trocando calor sensível por calor latente e aumentando a quantidade de vapor de água presente no ambiente (Rebouças *et al.*, 2014; Oliveira *et al.*, 2017).

A umidade relativa do ar dentro do ambiente protegido é influenciada pela temperatura, e ambas têm uma relação inversa. Ou seja, quando a temperatura aumenta, a umidade relativa tende a diminuir e vice-versa (Maller *et al.*, 2013; Sonstebly; Heide, 2017). Esse equilíbrio entre temperatura e umidade é de grande importância para o bem-estar das plantas. Segundo Andriollo (2000), a umidade relativa está diretamente ligada ao equilíbrio hídrico das plantas, sendo que um déficit de umidade pode afetar a evapotranspiração e a capacidade do sistema radicular de absorver água e nutrientes.

Apesar de ser uma planta trepadeira que pode atingir até 9 m de altura, o cultivo de lúpulo em ambiente protegido é uma alternativa para produção de mudas e faz-se necessário compreender o comportamento das variáveis agrometeorológicas em ambiente protegido; sua correlação no desenvolvimento e produção da cultura; as alterações promovidas pelas interações entre planta e ambiente protegido, bem como a influência na ocorrência de pragas e doenças (Guimarães, 2020, Gonsaga, 2021).

### 1.2.3 Variáveis agrometeorológicas

O lúpulo é uma planta perene, podendo viver por muitos anos em boas condições ambientais. Pode ser cultivado tanto no Hemisfério Norte quanto Sul entre as latitudes de 35° a 55° e requer entre 1800 e 2000 h de luz solar, desenvolvendo-se melhor na faixa de temperatura de 15 a 19 °C; e nas regiões produtoras a pluviosidade média durante a primavera e verão é de 300 à 500 mm (Radtke *et al.*, 1999; Kneen, 2003; Rodrigues; Morais; Castro, 2015; Bocquet *et al.*, 2018). Estudos como os de Marcusso; Müller (2019) e Gonsaga (2021) demonstram o potencial de cultivo em outras localidades com diferentes condições edafoclimáticas.

De hábito anual, ou seja, cresce, floresce e frutifica durante a primavera, verão e outono; no inverno rigoroso do hemisfério Norte a planta seca e entra em dormência, reiniciando o ciclo na primavera seguinte (Bocquet *et al.*, 2018). No Brasil, o clima tropical e as condições climáticas podem afetar drasticamente a cultura, principalmente pela temperatura elevada na primavera e verão, mas também

possibilita a obtenção de mais de uma safra por ano em virtude do inverno não rigoroso (Gonsaga, 2021).

Dentre os fatores ambientais que mais afetam negativamente o crescimento e o desenvolvimento vegetal, a deficiência hídrica é um dos mais importantes fatores limitantes à produtividade e à distribuição global dos vegetais, sendo que mais de 10% das áreas agrícolas do mundo apresentam influência relacionada ao déficit hídrico (Bartels; Sunkar, 2005, Baboev *et al.*, 2017). Estas limitações decorrem da deficiência hídrica que promove danos severos no desenvolvimento da planta podendo afetar diferentes aspectos eco fisiológicos, os efeitos mais comuns são fechamento estomático a curto prazo e; a longo prazo, a redução da expansão celular, que promove redução da área foliar e promove efeito de redução de taxas fotossintéticas e por consequência prejudica outras estruturas que são dependentes da exportação de fotossintatos (Santos *et al.*, 2014; Taiz *et al.*, 2017).

Estudos têm explorado diversas alterações nos fatores de produção e na produtividade agrícola em função do controle das variáveis e das modificações microclimáticas em ambiente protegido. O controle adequado da temperatura e umidade pode proporcionar condições ideais para o crescimento das plantas, aumentando a eficiência do cultivo e garantindo melhores resultados na produção de alimentos (Steidle Neto *et al.*, 2008; Romanini, *et al.*, 2010; Oliveira *et al.*, 2017).

A agrometeorologia busca entender e estudar a interação entre as condições atmosféricas e as atividades agrícolas. Ao analisar os aspectos atmosféricos, como temperatura, umidade, radiação solar, vento e precipitação, a agrometeorologia fornece informações valiosas sobre o clima local, condições de crescimento das culturas e previsões meteorológicas específicas para uma determinada região, fornecendo informações relevantes aos agricultores, auxiliando no planejamento, manejo e tomada de decisões relacionadas à produção agrícola (Monteiro, 2009).

A relação entre solo-planta-atmosfera é um determinante fator de produtividade das culturas, no entanto a imprevisibilidade dessas variáveis é o fator que mais limita as máximas produtividades das culturas (Frizzone; Andrade Júnior; Souza, 2005).

Diante disto, as variáveis agrometeorológicas fornecem informações que contribuem no esclarecimento do comportamento da cultura em diferentes condições ambientais, permitindo manejar de forma mais precisa, conciliando alta produtividade, boa qualidade e economia de recursos (Macedo *et al.*, 2022). Porém a complexidade

do conjunto de dados é grande e a estatística multivariada pode ser utilizada para melhor compreender essas interações.

A Análise de Componentes Principais (PCA) é uma técnica estatística que visa reduzir a complexidade de um conjunto de dados, expressando-o por meio de combinações lineares, determinadas pelos autovetores. Os autovetores são calculados a partir da matriz de variância-covariância ou da matriz de correlação, particularmente úteis quando se trata de um grande número de variáveis inter-relacionadas (Vicini *et al.*, 2018).

Na PCA, um conjunto inicial de variáveis é transformado em um novo conjunto, onde a máxima variabilidade do conjunto original é preservada. Essas novas variáveis, denominadas Componentes Principais (CPs), são independentes e não correlacionadas entre si, proporcionando uma base favorável para análises posteriores. O propósito da PCA é descobrir uma abordagem para sintetizar as informações presentes em múltiplas variáveis originais em um conjunto mais compacto de informações (Hair *et al.*, 2009).

A PCA oferece uma gama diversificada de aplicações, segundo Vicini *et al.* (2018), ela é capaz de identificar componentes em várias etapas de processos produtivos, permitindo investigações aprofundadas e a localização de possíveis falhas de controle.

Nesse contexto, a PCA desempenha um papel fundamental na agricultura ao lidar com conjuntos de dados agrometeorológicos complexos. Ao aplicar a PCA a variáveis agrometeorológicas, é possível identificar os principais padrões e relações que afetam o comportamento das culturas em diferentes condições ambientais. Essa técnica estatística reduz a dimensionalidade dos dados, mantendo as informações essenciais, permitindo uma representação mais compacta e compreensível. Com a PCA, os agricultores e pesquisadores podem obter insights valiosos que auxiliam no manejo preciso das culturas, visando alcançar alta produtividade, boa qualidade e economia de recursos (Macedo *et al.*, 2022).

### 1.3 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi desenvolvido em ambiente protegido, composto por estrutura metálica do tipo teto em arco, coberta com polietileno de baixa densidade transparente difusor (PEBD 100µm de espessura), pé direito de 2,5m e dimensões de 24m de

comprimento por 7m de largura, com laterais fechadas por tela antiafídica; na fazenda Lageado, localizada na área experimental do Departamento de Biotecnologia e Bioprocessos da FCA (Faculdade de Ciências Agrônômica) da Unesp (Universidade Estadual Paulista) no campus de Botucatu – SP, nas coordenadas 22° 51' S e 48° 26' O, com altitude de 786m, possuindo clima temperado quente (mesotérmico) úmido de classificação Cwa, segundo Köppen-Geiger.

A variedade de lúpulo utilizada foi Cascade., que é tida como aromática, apresentando médios teores de alfa-ácidos (4 – 7%), e transferindo à bebida notas cítricas e florais.

As plantas de lúpulo foram submetidas ao manejo com irrigação, reposição de 100% da  $ET_c$  da cultura segundo o método de Penman-Monteith (Howell; Evett, 2004), com um total de 100 plantas.

O sistema de irrigação para conduzir a água até a planta foi por gotejamento superficial, sendo um emissor por planta da AgroJet com vazão nominal de  $2L\ h^{-1}$ .

O espaçamento utilizado foi de 1,00 m entre linhas de plantio e 0,80 m entre plantas. As plantas foram tutoradas por corda de sisal presa a um arame próximo ao teto do ambiente protegido.

Foram coletados dados meteorológicos por meio de sensores via estação meteorológica, instalada dentro do ambiente protegido e também fora deste, próximo ao local onde foi conduzido o experimento no período de janeiro de 2022 a fevereiro de 2023.

### 1.3.1 Estádios fenológicos

Durante o experimento ocorreram duas colheitas de cones de lúpulo, aqui chamadas de safra 1 de outono, poda em 06 de janeiro de 2022 e colheita em 21 de maio de 2022; e safra 2 de verão, poda em 07 de outubro de 2022 e colheita em 07 de fevereiro de 2023.

A cultura do lúpulo apresenta diferentes fases ou estádios fenológicos, alguns autores trabalham com oito diferentes fases (Fagherazzi, 2020), outros com nove diferentes fases seguindo a escala fenológica BBCH (Bleholder *et al.*, 1991). Para melhor associação das diferenças das variáveis agrometeorológicas internas e externas do ambiente protegido, nesse trabalho optou-se por utilizar uma escala

fenológica própria, de simples observação visual de diferentes estádios de desenvolvimento da cultura, apresentada no Quadro 1.

**Quadro 1.** Escala fenológica utilizada, data dos períodos de cada estágio fenológico, duração em dias de cada estágio e número de Dias Após a Poda (DAP).

		Sem Lúpulo (SL)	Lúpulo em Crescimento (LC)	Lúpulo Desenvolvido (LD)	Lúpulo Desenvolvido com Cone (LDC)
Descrição		Logo após a realização da poda das plantas	Desenvolvimento das folhas e formação de ramos laterais	Floração e surgimento das inflorescências	Desenvolvimento e maturação dos cones até a colheita
SAFRA 21/22	Duração (dias)	23	28	17	67
	DAP (dias)	1 - 23	24 - 51	52 - 68	69 - 135
	Data	06 - 28 /01/2022	29/01 - 25/02 /2022	26/02 - 15/03 /2022	16/03 - 21/05 /2022
SAFRA 22/23	Duração (dias)	16	54	15	39
	DAP (dias)	1 - 16	17 - 70	71 - 85	86 - 124
	Data	07 - 22 /10/2022	23/10 - 15/12 /2022	16 - 30 /12/2022	31/12 - 07/02 /2023

Fonte: Elaboração própria.

### 1.3.2 Avaliações

Durante o desenvolvimento da cultura foram realizadas as seguintes avaliações:

- Variáveis agrometeorológicas;
- Massa fresca e massa seca de cones;
- Análise estatística dos dados:
  - Análise de dados ausentes ou *missings*;
  - Análise de Componentes Principais (PCA).

### 1.3.2.1 Variáveis agrometeorológicas

As variáveis agrometeorológicas foram mensuradas fora e dentro do ambiente protegido, diariamente ao longo de todo o período do experimento, por meio de sensores. A coleta de dados em ambos os ambientes permite a identificação de correlações e padrões que podem ser usados para construir modelos matemáticos capazes de estimar as condições internas através de dados das variáveis externas ao ambiente protegido.

As variáveis agrometeorológicas analisadas fora do ambiente protegido foram radiação solar; temperatura e umidade relativa do ar e dentro do ambiente protegido foram temperatura e umidade relativa do ar a 2 m de altura e no ponto mais alto no interior da estrutura (próximo ao teto); radiação solar; temperatura do solo na superfície e a 0,05 metros (m); 0,10 m; 0,20 m; 0,30 m; 0,50 m e 1,00 m de profundidade, conforme Quadro 2.

Os equipamentos utilizados para medição das variáveis temperatura e umidade do ar foram as sondas da marca Campbell modelo HC2S3; as sondas da marca Campbell modelo 109 foram utilizadas para medir a temperatura do solo nas diferentes profundidades e a radiação solar foi medida através do piranômetro da marca Campbell modelo MS-80-L.

**Quadro 2.** Variáveis agrometeorológicas mensuradas durante o período de janeiro de 2022 à fevereiro de 2023, com as siglas utilizadas nas tabelas e gráficos.

<b>Sigla</b>	<b>Unidade</b>	<b>Variável</b>
Temp_estacao	°C	Temperatura do ar obtida por meio de sensores instalados fora do ambiente protegido via estação meteorológica
Temp_2mt	°C	Temperatura do ar obtida por meio de sensores instalados à 2 metros de altura em relação ao solo via estação meteorológica instalada dentro do ambiente protegido
Temp_Teto_Estufa	°C	Temperatura do ar obtida por meio de sensores de sensores instalados próximo ao teto do ambiente protegido via estação meteorológica instalada dentro da mesma
UR_estacao	%	Umidade relativa do ar obtida por meio de sensores instalados fora do ambiente protegido via estação meteorológica
UR_2mt	%	Umidade relativa do ar obtida por meio de sensores instalados à 2 metros de altura em relação ao solo via estação meteorológica instalada dentro do ambiente protegido

UR_Teto_Estufa	%	Umidade relativa do ar obtida por meio de sensores instalados próximo ao teto do ambiente protegido via estação meteorológica instalada dentro da mesma
Rad_estacao	MJ.m <sup>-2</sup>	Radiação global obtida por meio de sensores da estação meteorológica instalada fora do ambiente protegido
Rad_estufa	MJ.m <sup>-2</sup>	Radiação global obtida por meio de sensores da estação meteorológica instalada dentro do ambiente protegido
Temp_Superficie_solo	°C	Temperatura do solo obtida por meio de sensores instalados na camada superficial do solo via estação meteorológica instalada dentro do ambiente protegido
Temp_5cm	°C	Temperatura do solo obtida por meio de sensores instalados à 5cm de profundidade no solo via estação meteorológica instalada dentro do ambiente protegido
Temp_10cm	°C	Temperatura do solo obtida por meio de sensores instalados à 10cm de profundidade no solo via estação meteorológica instalada dentro do ambiente protegido
Temp_20cm	°C	Temperatura do solo obtida por meio de sensores instalados à 20cm de profundidade no solo via estação meteorológica instalada dentro do ambiente protegido
Temp_30cm	°C	Temperatura do solo obtida por meio de sensores instalados à 30cm de profundidade no solo via estação meteorológica instalada dentro do ambiente protegido
Temp_50cm	°C	Temperatura do solo obtida por meio de sensores instalados à 50cm de profundidade no solo via estação meteorológica instalada dentro do ambiente protegido
Temp_100cm	°C	Temperatura do solo obtida por meio de sensores instalados à 100cm de profundidade no solo via estação meteorológica instalada dentro do ambiente protegido

Fonte: Elaboração própria.

### 1.3.2.2 Massa fresca e massa seca de cones

Foi realizada a determinação da massa fresca de cones das plantas de lúpulo, com auxílio de uma balança, ao final de cada ciclo, ou seja, ao final da safra 21/22 (21 de maio de 2022) e da safra 22/23 (07 de fevereiro de 2023). Posteriormente as amostras foram armazenadas em estufa para secagem, à 35 °C, até atingir massa constante e novamente foram pesadas para obtenção da massa seca de cones.

### 1.3.2.3 Análise estatística dos dados

### 1.3.2.3.1 Avaliação de valores ausentes ou *missings*

Alguns sensores apresentaram falhas na coleta de dados durante o período, gerando no conjunto de dados valores ausentes, que poderiam afetar negativamente a qualidade e a validade de qualquer análise de dados, portanto, realizou-se a avaliação de dados ausentes (*missings*), que dentro da Análise de Componentes Principais (PCA) é uma etapa importante para garantir resultados confiáveis e interpretações precisas. Valores ausentes podem ocorrer em conjuntos de dados por várias razões, como erros de coleta, falhas de equipamentos de medição ou simplesmente a falta de dados para algumas observações. Existem diferentes abordagens para lidar com valores ausentes, entre elas a exclusão das observações ausentes, utilizada quando o número de observações com valores ausentes é pequeno em relação ao tamanho do conjunto de dados; e a imputação de valores ausentes, abordagem frequentemente utilizada que envolve a estimativa dos valores ausentes com base em informações disponíveis, podendo ser realizada de várias maneiras, como preencher os valores ausentes com a média, mediana, moda, regressões lineares (métodos univariados) ou usando métodos mais avançados, utilizando procedimentos multivariados, imputação múltipla ou modelos de aprendizado de máquina.

Para avaliar a distribuição dos dados ausentes utilizou-se o pacote *naniar* (Tierney; Cook, 2023) do ambiente R (R Core Team, 2022), o qual oferece várias funções que auxiliam a identificar, explorar e lidar com valores ausentes de maneira eficaz.

O ambiente R também foi utilizado para a imputação dos *missings* encontrados na base de dados. Foi utilizado o comando *imputePCA* do pacote *missMDA* (Josse; Husson, 2016) para as variáveis meteorológicas, o qual permite utilizar o método PCA-EM (Componentes principais com algoritmo de maximização de expectativa) e PCA-Regularized (Análise regularizada e componentes principais), exceto radiação solar global dentro e fora do ambiente protegido, para as quais foi utilizada um método de imputação múltipla.

Para encontrar o número de componentes necessários neste processo de imputação por meio da PCA, primeiramente, foi usado o comando *estim\_ncpPCA* com o procedimento “*Kfold*”. Posteriormente, realizou-se a imputação dos *missings* destas variáveis utilizando tanto o método *PCA-EM*, quanto o método *PCA-Regularized*.

Já para os *missings* da variável radiação dentro e fora do ambiente protegido, utilizou-se o método de imputação múltipla *Predictive mean matching* (pmm) por meio do pacote *mice* (Van Buuren; Groothuis-Oudshoorn, 2011). A comparação entre os métodos de imputação *PCA-EM* e *PCA-Regularized* foi realizada de forma exploratória utilizando gráficos temporais e comparando os valores das médias e desvios padrão das variáveis na base original (com *missings* excluídos), base imputada com o método *PCA-EM* e base imputada com o método *PCA-Regularized*.

Após esta análise exploratória, optou-se por utilizar a imputação de dados utilizando o método de imputação *PCA-Regularized* (Van Buuren; Groothuis-Oudshoorn, 2011). Esse método é especialmente útil quando se tem valores ausentes em mais de uma variável, além de que os algoritmos PCA iterativos regularizados tendem a se adaptar mais adequadamente a tendência da amostra comparado a outros métodos (Loisel; Takane, 2019; Iodice D'enza; Markos; Palumbo, 2022).

#### 1.3.2.3.2 Análise de componentes principais (PCA)

A análise de componentes principais foi utilizada para análise dos dados agrometeorológicos completos dentro e fora do ambiente protegido com o objetivo de identificar quais variáveis estão mais correlacionadas com o desempenho da cultura e agrupar as amostras de acordo com seu comportamento semelhante. Para a análise multivariada PCA do perfil agrometeorológico, considerando o ambiente interno, os diferentes estádios de desenvolvimento da cultura foram considerados como categorias de uma variável qualitativa suplementar.

Os dados obtidos foram analisados no ambiente R, que utiliza linguagem de programação estatística para análise de dados, visualização e computação estatística. Para as etapas descritivas, foram utilizados os pacotes *ggplot2*, *dplyr*, *plyr*, *reshape2*. Para as análises de PCA foram utilizados os pacotes *FactoMineR* e *factoextra*.

#### 1.3.2.3.3 Análise estatística inferencial

Os resultados obtidos na PCA, foram submetidos à análise estatística inferencial, sendo aplicados o teste *t* de Student para as partições do dia e para comparação dos dois períodos de safras e entressafra, além dos estádios de desenvolvimento e estações do ano; foi realizada a Análise de Variância (Anova) complementada por Tukey.

## 1.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

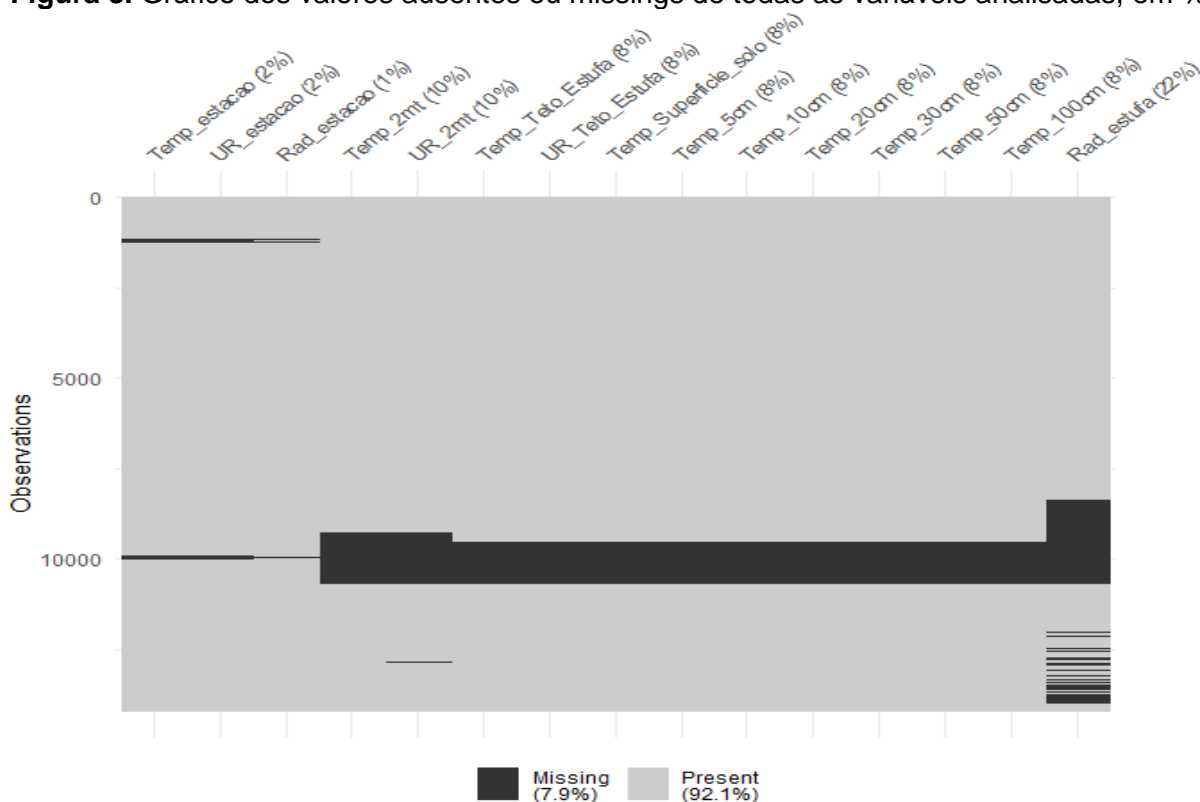
Após a imputação dos *missings*, uma análise exploratória foi realizada na base de dados completa do período do estudo, apresentando os resumos descritivos de cada variável. Posteriormente, uma discussão aprofundada desses resultados foi realizada, explorando suas implicações e possíveis correlações observadas por meio do método multivariado de PCA.

### 1.4.1 Análise de dados ausentes ou *missings*

Durante esse período foram coletados dados de sensores instalados dentro e fora (estação meteorológica) do ambiente protegido. Alguns sensores apresentaram falha e alguns dados do período não foram coletados, em virtude disso, realizou-se a análise de dados ausentes ou *missings*.

A distribuição dos *missings* realizada com o auxílio do pacote *naniar* do ambiente R, encontra-se na Figura 3, onde observa-se que todas os sensores apresentaram falha em algum momento, causando a ausência de dados, sendo que a maior quantidade de *missings* ocorreu nos sensores dentro do ambiente protegido sendo a variável radiação solar que apresentou maior quantidade de *missings*.

**Figura 3.** Gráfico dos valores ausentes ou missings de todas as variáveis analisadas, em %.



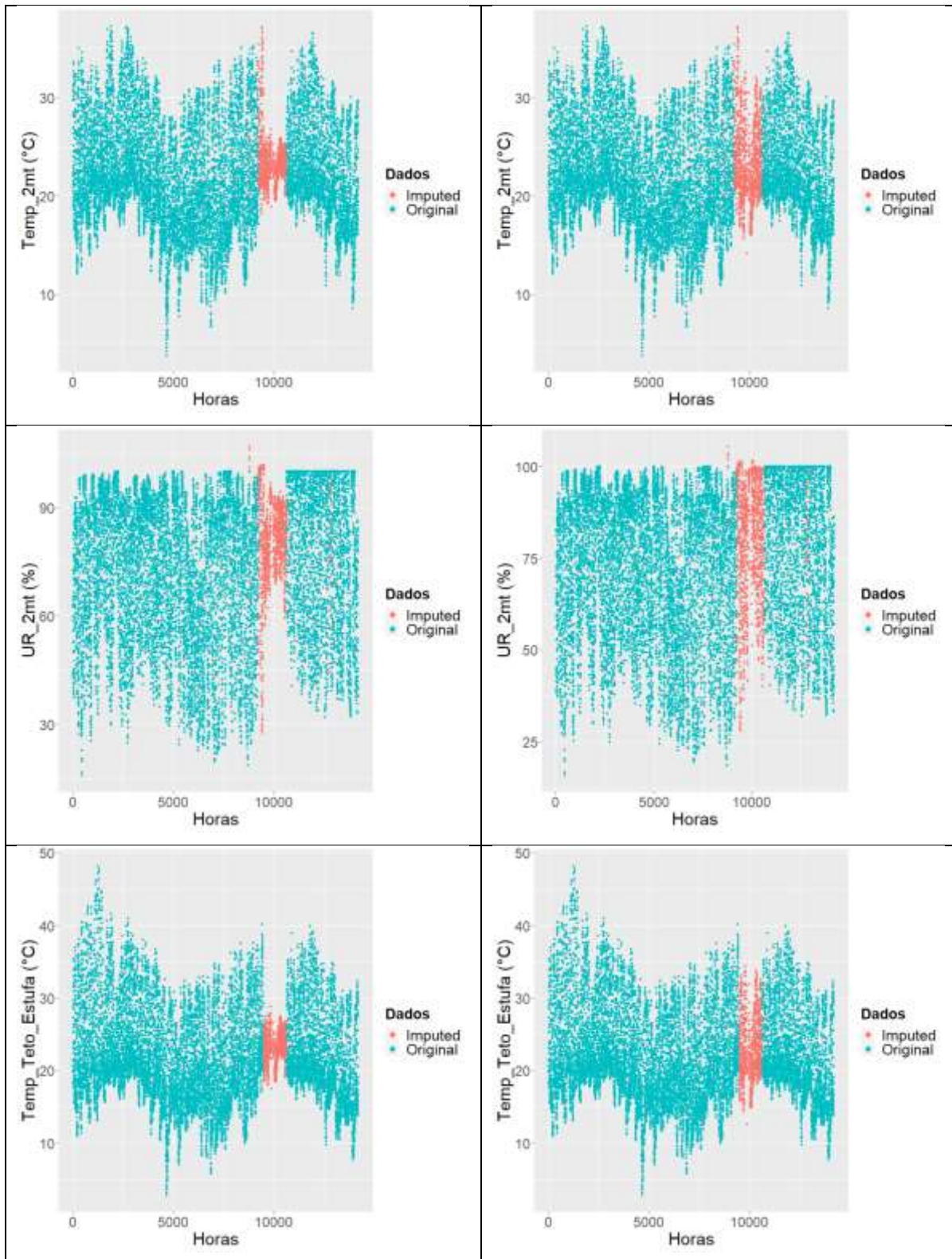
Na Tabela 1 estão apresentados os valores de média e desvio padrão das variáveis na base original (com missings excluídos), base completa imputada com o método *PCA-EM* e base imputada com o método *PCA- Regularized*; podendo destacar que os valores médios e de variabilidade são muito próximos, porém com um desempenho melhor (mais próximo do padrão das medidas da base original) quando imputado pelo método da PCA regularizada. Existem diferentes métodos para estimar a falta de dados ou mesmo de uma variável, entre eles, a regressão é um método muito difundido e utilizado, a escolha pelo uso de PCA neste trabalho ocorre por tratar-se de um método mais abrangente.

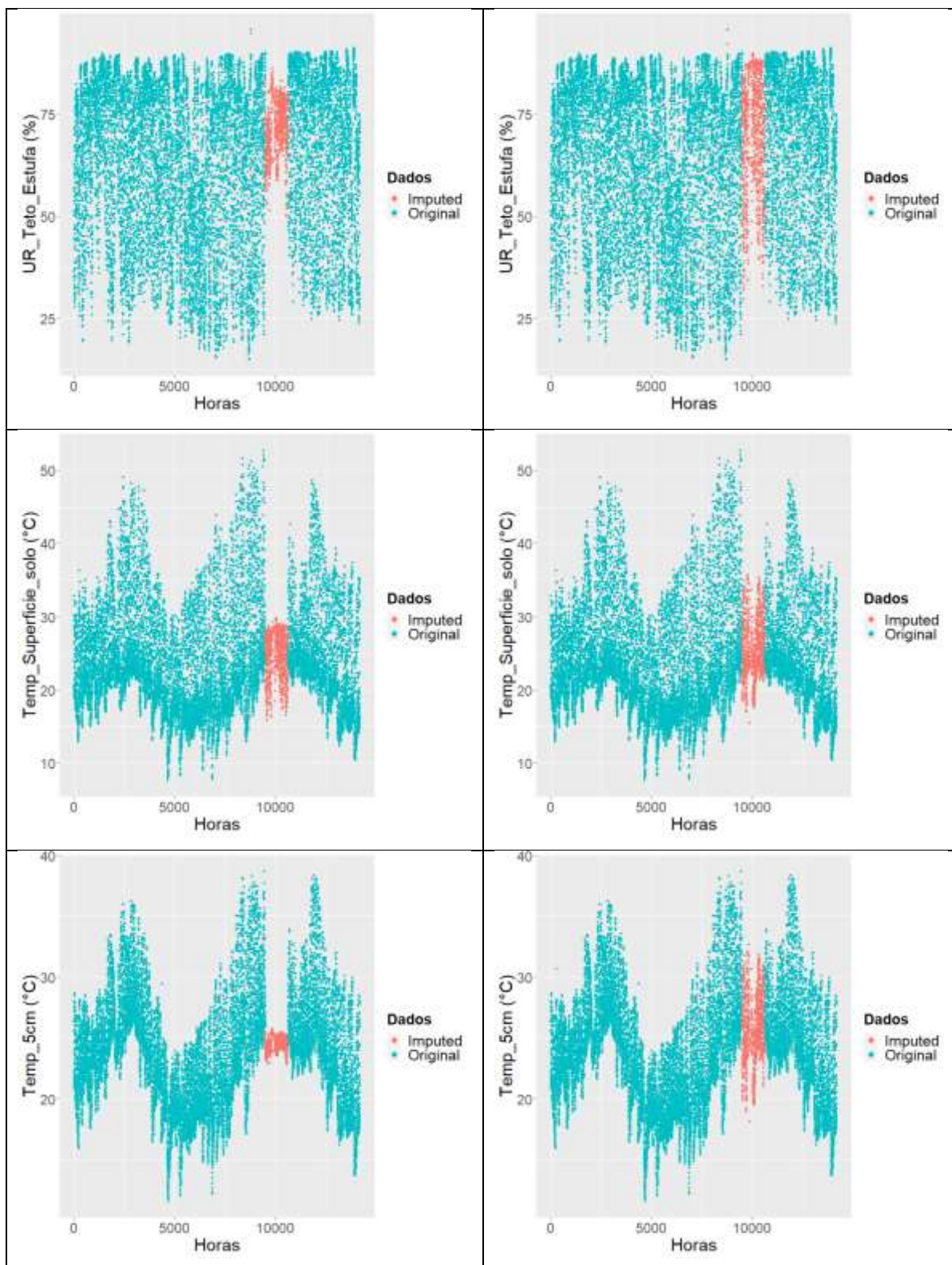
**Tabela 1.** Comparação dos métodos de imputação para as variáveis (exceto radiação). Valores exibidos na forma: Média (dp) [min-max].

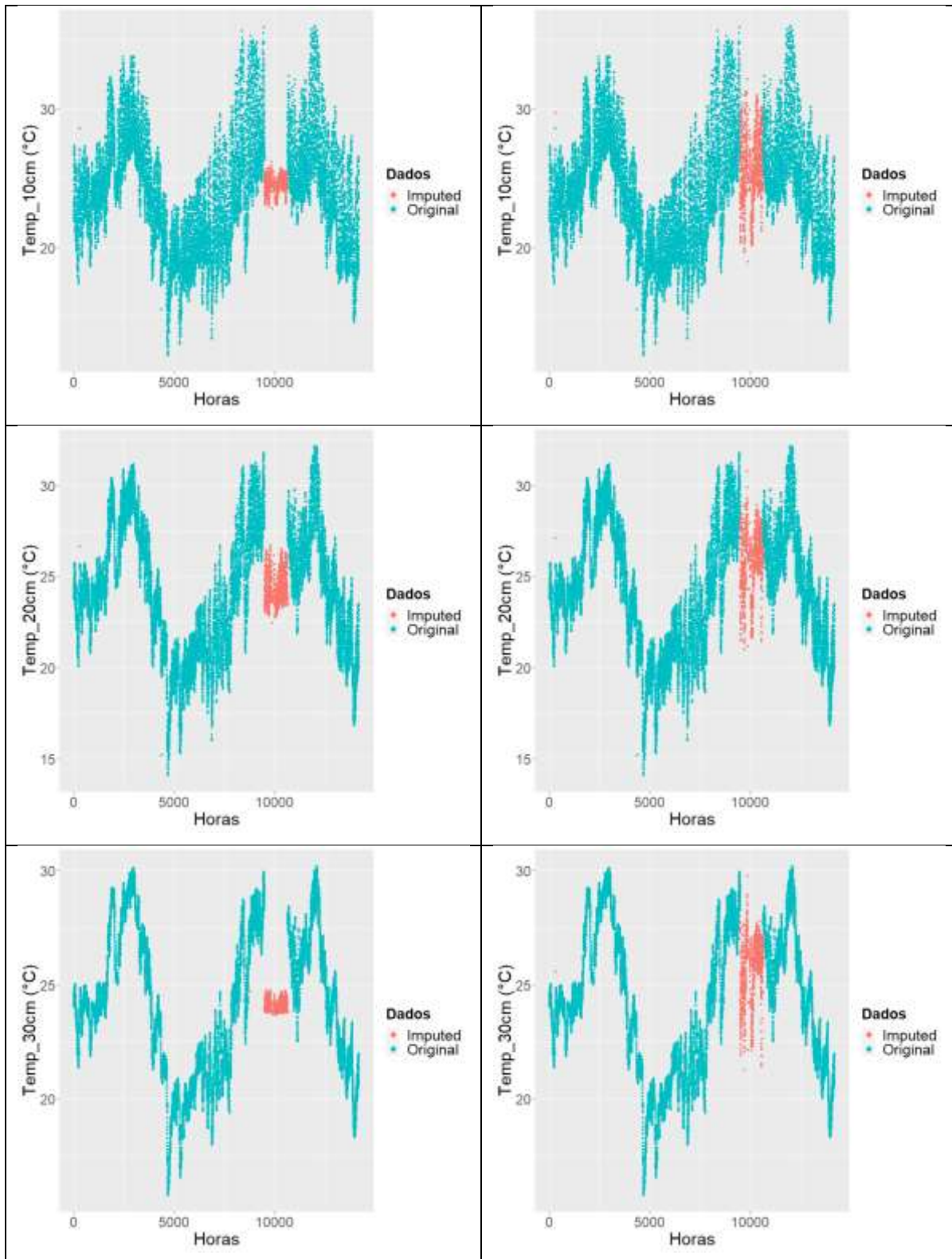
Variável	Base original	Base imputada (EM)	Base imputada (Regularized)
Temp_estacao	21,22 (4,3) [3,91-39,29]	21,24 (4,29) [3,91-39,29]	21,23 (4,28) [3,91-39,29]
Temp_2mt	21,75 (5,37) [3,8-37,27]	21,89 (5,17) [3,8-37,27]	21,89 (5,25) [3,8-37,27]
Temp_Teto_Estufa	21,64 (6,53) [2,76-48,18]	21,74 (6,29) [2,76-48,18]	21,72 (6,38) [2,76-48,18]
UR_estacao	73,72 (17,39) [18,33-100]	73,69 (17,29) [18,33-100]	73,7 (17,29) [18,33-100]
UR_2mt	73,23 (20,15) [15,79-100]	73,98 (19,58) [15,79-106,92]	73,98 (19,87) [15,79-105,53]
UR_Teto_Estufa	63,7 (19,1) [14,97-95,66]	64,28 (18,51) [14,97-95,66]	64,26 (18,79) [14,97-95,66]
Temp_Superficie_solo	23,92 (7,23) [7,64-52,73]	24,01 (6,99) [7,64-52,73]	24,03 (7,03) [7,64-52,73]
Temp_5cm	23,91 (4,51) [11,58-38,69]	23,95 (4,33) [11,58-38,69]	24,02 (4,41) [11,58-38,69]
Temp_10cm	23,99 (4,08) [12,17-35,99]	24,03 (3,91) [12,17-35,99]	24,11 (3,99) [12,17-35,99]
Temp_20cm	24,21 (3,43) [14,09-32,15]	24,21 (3,29) [14,09-32,15]	24,32 (3,34) [14,09-32,15]
Temp_30cm	24,13 (3,12) [15,75-30,2]	24,12 (2,99) [15,75-30,2]	24,24 (3,04) [15,75-30,2]
Temp_50cm	24,16 (2,89) [17,34-29,56]	24,15 (2,78) [17,34-29,56]	24,26 (2,82) [17,34-29,56]
Temp_100cm	24 (2,34) [19,48-28,31]	23,99 (2,25) [19,48-28,31]	24,09 (2,28) [19,48-28,31]

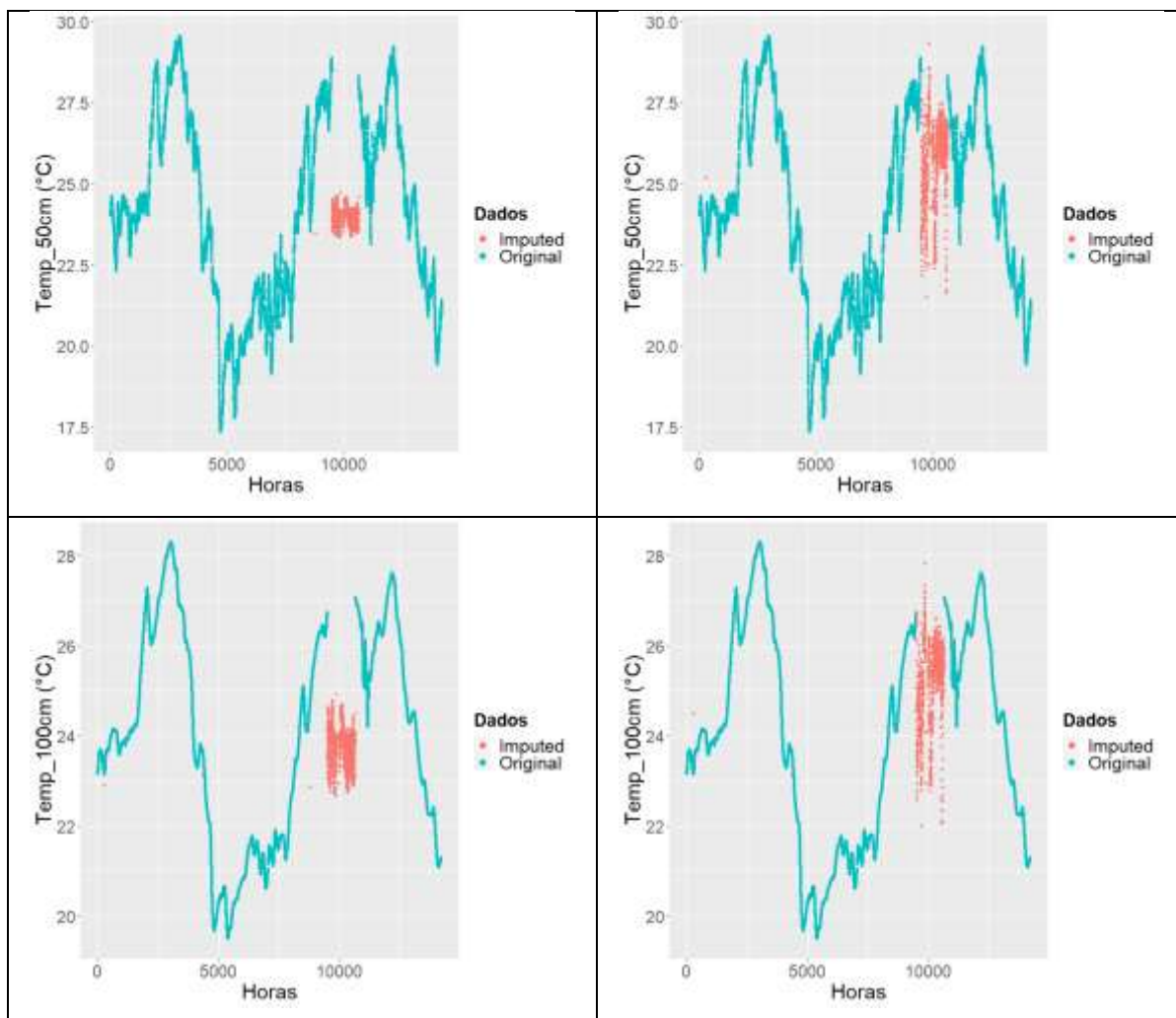
Fonte: Elaboração própria.





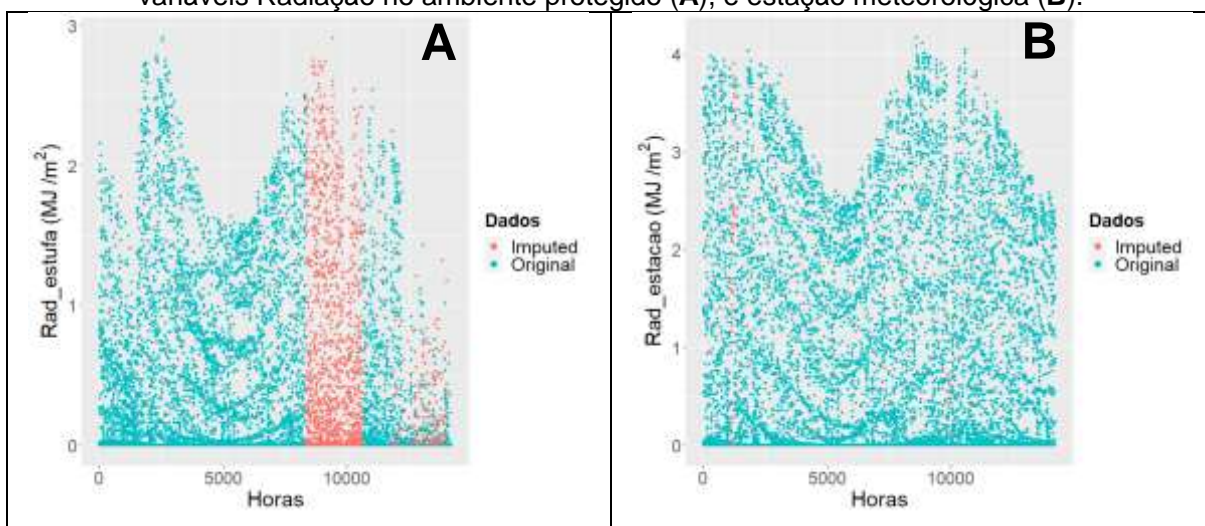






Na Figura 5 estão apresentados os gráficos da distribuição das variáveis radiação tanto dentro quanto fora do ambiente protegido, com os valores imputados através do método *predictive mean matching* (PMM), através do pacote *mice*.

**Figura 5.** Valores imputados através do método *predictive mean matching* (PMM) para as variáveis Radiação no ambiente protegido (A), e estação meteorológica (B).



Assim destaca-se que os *missings* imputados pelo método *PCA-Regularized* e *PMM* (para radiação solar) ficaram mais próximos, visualmente, do padrão de variabilidade e tendência dos dados e, conseqüentemente, a base de dados utilizada nas próximas análises foram obtidas da imputação pela *PCA-Regularized* e *PMM*.

#### 1.4.2. Análise exploratória da produtividade e das variáveis agrometeorológicas com dados imputados

Durante o período do experimento, foram realizadas duas colheitas de cones (inflorescências), sendo a primeira em maio de 2022 (Safrá 21/22) e a segunda em fevereiro de 2023 (Safrá 22/23), cujos valores médios de número de cones por planta; massa fresca e massa seca estão apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2.** Média da produtividade de cones por planta; massa fresca e massa de cones

	Cones por planta (unidade)	Massa fresca (g)	Massa seca (g)
Safrá 21/22 (colheita maio)	288,54	90,97	25,47
Safrá 22/23 (colheita fevereiro)	211,57	85,81	19,29
Redução (%)	26,68	5,67	24,26

Fonte: Elaboração própria.

Observa-se maior produtividade na safrá 21/22, fato relacionado as temperaturas amenas e menor radiação solar durante os estádios fenológicos Lúpulo Desenvolvido (LD) e Lúpulo Desenvolvido com cone (LDC), justamente estádios em que a planta estava emitindo as flores (LD) e posteriormente desenvolvendo as inflorescências (LDC), este último estádio (LDC) na safrá 21/22 obteve maior duração, contribuindo para aumento da massa de cones, na safrá 22/23 os valores elevados de temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa) e de radiação solar podem ter promovido a aceleração do processo de maturação das inflorescências e maior degradação das mesmas como pode ser observado na Figura 6. Os valores de massa fresca de cones foram semelhantes aos obtidos por Guimarães (2020), porém diferentes dos obtidos por Nava (2023), uma vez que estudos de produtividade de lúpulo demonstram que variedades; ambientes de produção e manejo da cultura promovem variabilidade da produção (Fortuna, 2021).

**Figura 6.** Colheita de cones **A.** Realizada em maio de 2022 e **B.** Realizada em fevereiro de 2023



Fonte: Elaboração própria.

Na Tabela 3 estão listados os valores descritivos (média, desvio padrão, valores mínimos e máximos) e testes estatísticos entre os grupos suplementares, que são: períodos, diurno (das 06:00 às 17:59 horas) e noturno (das 18:00 às 05:59 horas), e estádios do lúpulo (LC, LD, LDC e SL). Para o período, foi aplicado o Teste t considerando variância iguais ou diferentes, dependendo do resultado do teste F para variâncias, realizado anteriormente. Para os diferentes estádios do lúpulo foi usada a Anova complementada pelo teste Tukey. O nível de significância usado foi 5%.

Observa-se que a temperatura do ar (Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa) média diária dentro do ambiente protegido foi igual para as diferentes alturas de mensuração na estufa, dois metros e próxima ao teto, porém quando analisadas as partições diurna e noturna nota-se maior diferença entre essas temperaturas, com maior variação ao longo do dia no sensor próximo ao teto da estufa (Temp\_Teto\_Estufa).

**Tabela 3.** Resumo das variáveis [Média, desvio padrão (entre parêntesis), valores mínimo e máximo (entre colchetes)] e o Teste t, obtidos nos sensores instalados dentro e fora do ambiente protegido durante o período de janeiro de 2022 a fevereiro de 2023, separado em três períodos diário, diurno e noturno.

Variável	Período Diário (24 horas)	Período Diurno (das 06:00 às 17:59 horas)	Período Noturno (das 18:00 às 05:59 horas)	Teste t
Temp_estacao	21,23 (4,28) [3,91-39,29]	22,57 (4,5) <sup>a</sup> [3,91-39,29]	19,9 (3,59) <sup>b</sup> [4,32-37,76]	p < 0,001
Temp_2mt	21,89 (5,25) [3,8-37,27]	24,61 (5,22) <sup>a</sup> [3,8-37,27]	19,17 (3,62) <sup>b</sup> [4,21-31,45]	p < 0,001
Temp_Teto_Estufa	21,72 (6,38) [2,76-48,18]	25,22 (6,52) <sup>a</sup> [2,76-48,18]	18,21 (3,77) <sup>b</sup> [3,19-33,18]	p < 0,001
UR_estacao	73,7 (17,29) [18,33-100]	69,31 (17,6) <sup>a</sup> [18,33-100]	78,1 (15,79) <sup>b</sup> [23,98-100]	p < 0,001
UR_2mt	73,98 (19,87) [15,79-105,53]	64,58 (20,16) <sup>a</sup> [15,79-101,21]	83,38 (14,37) <sup>b</sup> [28,58-105,53]	p < 0,001
UR_Teto_Estufa	64,26 (18,79) [14,97-95,66]	55,22 (19,2) <sup>a</sup> [14,97-91,15]	73,31 (13,2) <sup>b</sup> [24,8-95,66]	p < 0,001
Rad_estacao	0,76 (1,08) [0-4,16]	1,51 (1,11) <sup>a</sup> [0-4,16]	0,02 (0,09) <sup>b</sup> [0-1,43]	p < 0,001
Rad_estufa	0,36 (0,6) [0-2,91]	0,7 (0,69) <sup>a</sup> [0-2,91]	0,01 (0,05) <sup>b</sup> [0-1,01]	p < 0,001
Temp_Superficie_solo	24,03 (7,03) [7,64-52,73]	28,02 (7,26) <sup>a</sup> [7,64-52,73]	20,04 (3,8) <sup>b</sup> [7,78-33,71]	p < 0,001
Temp_5cm	24,02 (4,41) [11,58-38,69]	25,38 (4,74) <sup>a</sup> [11,9-38,69]	22,66 (3,57) <sup>b</sup> [11,58-33,02]	p < 0,001
Temp_10cm	24,11 (3,99) [12,17-35,99]	24,85 (4,27) <sup>a</sup> [12,22-35,99]	23,36 (3,54) <sup>b</sup> [12,17-33,14]	p < 0,001
Temp_20cm	24,32 (3,34) [14,09-32,15]	24,1 (3,38) <sup>a</sup> [14,09-32,15]	24,54 (3,29) <sup>b</sup> [14,39-32,05]	p < 0,001
Temp_30cm	24,24 (3,04) [15,75-30,2]	23,99 (3,04) <sup>a</sup> [15,75-29,82]	24,48 (3,02) <sup>b</sup> [16,29-30,2]	p < 0,001
Temp_50cm	24,26 (2,82) [17,34-29,56]	24,23 (2,82) <sup>a</sup> [17,34-29,56]	24,3 (2,82) <sup>a</sup> [17,4-29,56]	p = 0,186
Temp_100cm	24,09 (2,28) [19,48-28,31]	24,09 (2,29) <sup>a</sup> [19,49-28,3]	24,08 (2,28) <sup>a</sup> [19,48-28,31]	p = 0,776

Para cada variável, letras diferentes entre as médias indicam diferença significativa (p<0,05) pelo teste Anova complementada pelo teste Tukey.

Quando se compara a temperatura em ambiente protegido e fora do mesmo, nota-se pequena diferença na temperatura diária, porém, como esperado uma diferença maior quando comparando as partições diurnas e noturnas, sendo a temperatura dentro da casa vegetação maior durante o período diurno em virtude da cobertura plástica que resulta em aumento da radiação difusa, e o inverso no período noturno, as temperaturas mais baixas comparado à estação em virtude das laterais revestidas com tela, permitindo passagem de vento e a troca de calor promovida por convecção. Segundo Seeman (1979); Silva et al. (2003) e Santos; Junior; Nunes (2010) valores

de temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa) dentro de ambiente protegido entre 10 a 20% superior ao da temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa) externo ocorrem em virtude do tamanho, altura do pé direito, tipo de cobertura e fechamento lateral do ambiente protegido. A variável umidade relativa do ar, dentro do ambiente protegido apresentou maiores valores no sensor à dois metros de altura (UR\_2mt), valores esses próximos aos obtidos nos sensores da estação fora do ambiente protegido (UR\_estacao).

Quanto às variáveis temperatura de solo (Temp\_Superficie\_solo; Temp\_5cm, Temp\_10cm; Temp\_20cm; Temp\_30cm; Temp\_50cm; Temp\_100cm), observa-se maiores valores comparados a temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa) dentro do ambiente protegido em todas as profundidades analisadas, sendo o maior valor obtido no sensor à 0,3m de profundidade, refletindo a capacidade do solo em armazenar calor. Todas as comparações entre as médias diárias diurnas e noturnas mostraram-se estatisticamente diferentes ( $p < 0,05$ ), exceto para as temperaturas do solo a 50 e 100 cm (Tabela 3), permitindo inferir que à medida que a profundidade aumenta as variações de temperaturas ficam menores ao ponto de atingirem um equilíbrio entre o dia e a noite.

Na Tabela 4 é apresentado o resumo das variáveis estudadas de acordo com as estações do ano. O verão de 2023 apresentou menores valores médios de radiação solar (Rad\_estacao; Rad\_estufa); de temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa) e de temperatura do solo (Temp\_Superficie\_solo; Temp\_5cm, Temp\_10cm; Temp\_20cm; Temp\_30cm; Temp\_50cm; Temp\_100cm) e maiores valores de umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa) quando comparado ao verão de 2022; sendo os valores médios de radiação dentro da estufa (Rad\_estufa) os menores observados entre todas as estações. Estudando as diferentes radiações em estufa, Dal Pai (2010) observou que os maiores valores de radiação solar ocorreram durante a primavera e verão, porém as variações no valor de radiação solar podem estar relacionadas com a declinação solar, bem como as condições de nebulosidades e as concentrações de vapores; aerossóis e outras partículas tanto na atmosfera, quanto no ambiente protegido; e os valores são atenuados no ambiente protegido em virtude da cobertura plástica que promove absorção e reflexão da radiação.

**Tabela 4.** Resumo das variáveis [Média, desvio padrão (entre parêntesis), valores mínimo e máximo (entre colchetes)] de acordo com as estações do ano do período do estudo.

Variável	Verão 21/22	Outono 22	Inverno 22	Primavera 22	Verão 22/23
Temp_estacao	23,16 (3,52) [16,06-32,58] <sup>a</sup>	19,72 (4,37) [3,91-29,65] <sup>c</sup>	19,9 (4,59) [7,07-32,45] <sup>c</sup>	22,54 (4,69) [12,13-39,29] <sup>b</sup>	22,26 (2,9) [14,32-30,79] <sup>b</sup>
Temp_2mt	24,4 (4,78) [14,74-37,27] <sup>a</sup>	20,05 (5,32) [3,8-33,98] <sup>d</sup>	19,8 (5,45) [6,72-33,75] <sup>d</sup>	22,12 (5,47) [10,1-37,21] <sup>c</sup>	23,41 (3,88) [14,15-35,6] <sup>b</sup>
Temp_Teto_Estufa	24,79 (6,52) [13,06-48,18] <sup>a</sup>	19,98 (6,32) [2,76-38,04] <sup>d</sup>	19,39 (5,93) [5,8-34,74] <sup>e</sup>	21,73 (6,15) [9,18-40,12] <sup>c</sup>	23,26 (4,82) [12,58-39,86] <sup>b</sup>
UR_estacao	76,93 (15,53) [27,26-99,5] <sup>b</sup>	72,78 (16,18) [26,57-98,6] <sup>d</sup>	62,85 (19,31) [24,41-99,3] <sup>e</sup>	74,91 (17,74) [26,84-100] <sup>c</sup>	82,17 (12,22) [43,83-98,7] <sup>a</sup>
UR_2mt	75,91 (17,87) [24,79-100] <sup>b</sup>	74,62 (17,51) [24,41-100] <sup>b</sup>	63,1 (21,05) [19,53-100] <sup>d</sup>	72,72 (20,61) [18,57-105,53] <sup>c</sup>	82,15 (16,46) [35,92-101,51] <sup>a</sup>
UR_Teto_Estufa	66,76 (18) [19,01-89,81] <sup>b</sup>	64,55 (17,48) [20,4-89,7] <sup>c</sup>	54,01 (19,79) [15,37-89,42] <sup>e</sup>	62,86 (19,69) [14,97-95,66] <sup>d</sup>	71,13 (15,54) [24,93-90,21] <sup>a</sup>
Rad_estacao	0,86 (1,18) [0-4,03] <sup>a</sup>	0,66 (0,96) [0-3,48] <sup>b</sup>	0,68 (0,95) [0-3,6] <sup>b</sup>	0,89 (1,22) [0-4,16] <sup>a</sup>	0,75 (1,07) [0-4,05] <sup>b</sup>
Rad_estufa	0,51 (0,76) [0-2,91] <sup>a</sup>	0,34 (0,5) [0-2,22] <sup>c</sup>	0,43 (0,61) [0-2,51] <sup>b</sup>	0,51 (0,74) [0-2,91] <sup>a</sup>	0,29 (0,53) [0-2,54] <sup>c</sup>
Temp_Superficie_solo	26,65 (6,65) [15,37-49,01] <sup>a</sup>	21,49 (6,47) [7,64-47,22] <sup>c</sup>	21,3 (6,87) [7,78-43,84] <sup>c</sup>	26,39 (8,49) [11,04-52,73] <sup>ab</sup>	25,83 (4,49) [15,48-48,57] <sup>b</sup>
Temp_5cm	26,83 (3,31) [19,16-36,21] <sup>a</sup>	21,48 (4,03) [11,58-33,55] <sup>d</sup>	20,74 (3,11) [12,17-31,07] <sup>e</sup>	26,18 (4,64) [16,12-38,69] <sup>b</sup>	25,87 (2,82) [18,14-38,06] <sup>c</sup>
Temp_10cm	26,99 (2,8) [20,35-33,79] <sup>a</sup>	21,54 (3,72) [12,17-30,95] <sup>c</sup>	20,86 (2,64) [13,36-29,61] <sup>d</sup>	26,15 (3,95) [17,25-35,92] <sup>b</sup>	25,94 (2,47) [18,97-35,75] <sup>b</sup>
Temp_20cm	27,24 (2,17) [22,55-31,15] <sup>a</sup>	21,85 (3,27) [14,09-28,57] <sup>c</sup>	21,06 (1,62) [16,02-26,68] <sup>d</sup>	26,11 (2,82) [18,64-31,79] <sup>b</sup>	26,13 (1,69) [20,98-31,13] <sup>b</sup>
Temp_30cm	27,07 (1,97) [23,28-30,12] <sup>a</sup>	21,99 (3,06) [15,75-27,64] <sup>d</sup>	20,99 (1,13) [17,96-24,68] <sup>e</sup>	25,73 (2,37) [19,36-29,95] <sup>c</sup>	26 (1,34) [21,23-29,79] <sup>b</sup>
Temp_50cm	26,96 (1,84) [23,59-29,56] <sup>a</sup>	22,29 (2,92) [17,34-27,26] <sup>d</sup>	21,05 (0,86) [19,12-23,42] <sup>e</sup>	25,4 (2,12) [20,14-28,86] <sup>c</sup>	25,97 (1,18) [21,49-29,32] <sup>b</sup>
Temp_100cm	26,22 (1,51) [23,77-28,31] <sup>a</sup>	22,97 (2,55) [19,48-27,57] <sup>d</sup>	21,1 (0,52) [19,7-21,9] <sup>e</sup>	24,26 (1,63) [21,24-26,74] <sup>c</sup>	25,63 (0,93) [22-27,82] <sup>b</sup>

Para cada variável, letras diferentes entre as médias indicam diferença significativa ( $p < 0,05$ ) pelo teste Anova complementada pelo teste Tukey,

Ainda sobre as estações do ano, se observa algumas anormalidades como a elevada amplitude térmica e valores elevados de temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa) em alguns dias do outono, inverno e primavera de 2022 e temperaturas amenas e menores valores de radiação solar (Rad\_estacao; Rad\_estufa) durante o verão de 2023.

Os elevados valores médios de temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa) e radiação solar (Rad\_estacao; Rad\_estufa), combinados com os menores valores de umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa) observados durante a primavera de 2022 (estádio LD safra 21/22) e os também elevados valores médios de temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa), radiação solar (Rad\_estacao; Rad\_estufa) e umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa) observados durante verão de 2023 (estádio LDC safra 22/23) podem ter contribuído para a diferença de produtividade e oxidação de cones observada nas duas colheitas.

A Tabela 5 apresenta o resumo das variáveis nas diferentes safras, onde se observa que durante a safra 21/22 o valor médio de temperatura média do ar na estação (Temp\_estacao) foi menor comparado a safra 22/23, porém dentro do ambiente protegido os valores médios de temperatura do ar tanto a 2 metros quanto próximo ao teto (Temp\_2m e Temp\_Teto\_Estufa), foram maiores na safra 21/22 comparados aos valores da safra 22/23, fato contrário ao citado na literatura, onde a temperatura dentro do ambiente protegido tende a ser superior a temperatura externa (Guimarães, 2020; Silva *et al.*, 2003). Os valores médios de radiação solar foram maiores na estação (Rad\_estacao) durante a safra 22/23, porém menores dentro do ambiente protegido (Rad\_estufa) comparado à safra 21/22, fato que está relacionado com a cobertura plástica interferindo na absorção e reflexão da radiação (Dal Pai, 2010; Sousa, R., 2021).

É possível ainda observar que os valores médios de temperatura do solo em todas as profundidades, exceto à 100 cm (Temp\_100cm) e a umidade do ar (UR\_estacao; UR\_2mt e UR\_Teto\_Estufa) foram superiores na safra 22/23 comparados à safra 21/22, valores semelhantes foram encontrados por Guimarães, (2020), trabalhando com lúpulo em ambiente protegido. Quanto à temperatura do solo, Sousa, R. (2021), diz que a tendência da temperatura do solo é apresentar maior inércia, demandando mais tempo para aquecer, e mais tempo para resfriar, a profundidade pode afetar essa elasticidade.

**Tabela 5.** Resumo das variáveis [Média, desvio padrão (entre parêntesis), valores mínimo e máximo (entre colchetes)] para os diferentes períodos de safras e entressafra

Variável	Safra 21/22	Entressafra	Safra 22/23
Temp_estacao	22,01 (4,24) [3,91-32] <sup>b</sup>	19,4 (4,36) [7,07-32,45] <sup>c</sup>	22,74 (4,01) [12,56-39,29] <sup>a</sup>
Temp_2mt	23,04 (5,46) [3,8-37,27] <sup>a</sup>	19,3 (5,25) [6,72-33,75] <sup>c</sup>	22,74 (4,66) [10,9-37,21] <sup>a</sup>
Temp_Teto_Estufa	23,02 (6,47) [2,76-41,63] <sup>a</sup>	18,92 (5,78) [5,8-36,23] <sup>c</sup>	22,5 (5,37) [9,95-40,12] <sup>b</sup>
UR_estacao	75,12 (15,16) [31,87-98,6] <sup>b</sup>	66,88 (20,06) [24,41-99,3] <sup>c</sup>	77,42 (16,44) [26,84-100] <sup>a</sup>
UR_2mt	75,26 (17,36) [24,79-100] <sup>a</sup>	67,36 (21,46) [19,53-100] <sup>b</sup>	75,93 (19,23) [18,57-105,53] <sup>a</sup>
UR_Teto_Estufa	64,96 (17,8) [19,01-89,48] <sup>b</sup>	57,85 (20,27) [15,37-89,8] <sup>c</sup>	65,77 (18,16) [14,97-95,66] <sup>b</sup>
Rad_estacao	0,81 (1,12) [0-4,03] <sup>ab</sup>	0,64 (0,93) [0-3,61] <sup>c</sup>	0,85 (1,19) [0-4,16] <sup>a</sup>
Rad_estufa	0,48 (0,7) [0-2,91] <sup>a</sup>	0,4 (0,59) [0-2,51] <sup>b</sup>	0,44 (0,68) [0-2,91] <sup>a</sup>
Temp_Superficie_solo	25,25 (7,18) [7,64-49,01] <sup>b</sup>	20,74 (6,58) [7,78-43,84] <sup>c</sup>	26,56 (7,09) [12,97-52,73] <sup>a</sup>
Temp_5cm	25,35 (4,27) [11,58-36,21] <sup>b</sup>	20,38 (3,16) [12,04-32,07] <sup>c</sup>	26,45 (3,84) [17,12-38,69] <sup>a</sup>
Temp_10cm	25,48 (3,9) [12,17-33,79] <sup>b</sup>	20,47 (2,74) [12,98-30,13] <sup>c</sup>	26,45 (3,2) [18,19-35,92] <sup>a</sup>
Temp_20cm	25,79 (3,34) [14,09-31,15] <sup>b</sup>	20,66 (1,85) [15,28-26,68] <sup>c</sup>	26,51 (2,1) [20,8-31,79] <sup>a</sup>
Temp_30cm	25,77 (3,01) [15,75-30,12] <sup>b</sup>	20,62 (1,42) [16,53-24,7] <sup>c</sup>	26,22 (1,67) [21,23-29,95] <sup>a</sup>
Temp_50cm	25,86 (2,7) [17,34-29,56] <sup>a</sup>	20,71 (1,15) [17,5-23,42] <sup>c</sup>	25,98 (1,48) [21,49-29,32] <sup>a</sup>
Temp_100cm	25,68 (1,9) [20,21-28,31] <sup>a</sup>	20,91 (0,66) [19,48-21,9] <sup>c</sup>	24,99 (1,27) [21,72-27,82] <sup>b</sup>

Para cada variável, letras diferentes entre as médias indicam diferença significativa ( $p < 0,05$ ) pelo teste Anova complementada pelo teste Tukey.

Nota-se na Tabela 6 que os valores médios apresentaram diferença significativa para as variáveis meteorológicas nos diferentes estádios de desenvolvimento do lúpulo, destacando o aumento da temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2\_mt e Temp\_Teto\_Estufa), a temperatura do solo em todas as profundidades (Temp\_Superficie\_solo; Temp\_5cm, Temp\_10cm; Temp\_20cm; Temp\_30cm; Temp\_50cm; Temp\_100cm) e radiação dentro do ambiente protegido (Rad\_estufa) ao longo do ciclo da cultura e novamente reduzindo os valores próximo ao período de colheita (estádio LDC).

**Tabela 6.** Resumo das variáveis [Média, desvio padrão (entre parêntesis), valores mínimo e máximo (entre colchetes)], em função dos diferentes estádios de desenvolvimento da cultura

Variável	LC	LD	LDC	SL
Temp_estacao	23,35 (4,41) [12,56-39,29] <sup>a</sup>	23,4 (3,49) [14,32-32] <sup>a</sup>	21,37 (4,03) [3,91-32,58] <sup>b</sup>	20,61 (4,22) [7,07-32,45] <sup>c</sup>
Temp_2mt	23,3 (5,42) [10,9-37,21] <sup>b</sup>	24,48 (4,49) [14,15-37,07] <sup>a</sup>	21,98 (4,77) [3,8-33,98] <sup>c</sup>	21,05 (5,48) [6,72-37,27] <sup>d</sup>
Temp_Teto_Estufa	22,94 (6,11) [9,95-40,12] <sup>b</sup>	24,49 (5,4) [12,58-40,93] <sup>a</sup>	22,31 (6,42) [2,76-48,18] <sup>c</sup>	20,75 (6,22) [5,8-41,63] <sup>d</sup>
UR_estacao	74,81 (17,43) [26,84-100] <sup>b</sup>	76,09 (15,6) [31,87-98,7] <sup>ab</sup>	77,22 (14,66) [27,26-99,5] <sup>a</sup>	71,52 (18,9) [24,41-99,3] <sup>c</sup>
UR_2mt	72,39 (20,64) [18,57-105,53] <sup>c</sup>	75,69 (17,39) [24,79-99,11] <sup>b</sup>	78,2 (16,18) [30,63-101,51] <sup>a</sup>	71,5 (21,07) [19,53-100] <sup>c</sup>
UR_Teto_Estufa	62,53 (19,74) [14,97-95,66] <sup>c</sup>	65,32 (17,2) [19,01-88,68] <sup>b</sup>	68,87 (15,67) [24,45-99,2] <sup>a</sup>	61,45 (20,11) [15,37-90,21] <sup>c</sup>
Rad_estacao	0,95 (1,27) [0-4,16] <sup>a</sup>	0,84 (1,17) [0-3,9] <sup>ab</sup>	0,74 (1,06) [0-4,05] <sup>bc</sup>	0,7 (1,01) [0-4,03] <sup>c</sup>
Rad_estufa	0,57 (0,8) [0-2,91] <sup>a</sup>	0,48 (0,72) [0-2,67] <sup>b</sup>	0,33 (0,51) [0-2,54] <sup>d</sup>	0,4 (0,62) [0-2,74] <sup>c</sup>
Temp_Superficie_solo	27,51 (8,4) [12,97-52,73] <sup>a</sup>	27,27 (6,16) [15,48-48,27] <sup>a</sup>	24,13 (5,97) [7,64-47,71] <sup>b</sup>	22,78 (6,8) [7,78-48,57] <sup>c</sup>
Temp_5cm	27,46 (4,15) [17,12-38,69] <sup>a</sup>	27,36 (3,33) [18,14-36,21] <sup>a</sup>	24,16 (3,69) [11,58-4,82] <sup>b</sup>	22,55 (4,18) [12,04-38,06] <sup>c</sup>
Temp_10cm	27,47 (3,36) [18,19-35,92] <sup>a</sup>	27,42 (2,9) [18,97-33,79] <sup>a</sup>	24,24 (3,33) [12,17-2,68] <sup>b</sup>	22,64 (3,87) [12,98-35,75] <sup>c</sup>
Temp_20cm	27,52 (2,06) [20,8-31,79] <sup>a</sup>	27,59 (2,32) [20,98-31,15] <sup>a</sup>	24,54 (2,75) [14,09-9,97] <sup>b</sup>	22,81 (3,31) [15,28-31,13] <sup>c</sup>
Temp_30cm	27,18 (1,53) [21,9-29,95] <sup>a</sup>	27,46 (2,15) [21,23-30,12] <sup>a</sup>	24,58 (2,45) [15,75-28,9] <sup>b</sup>	22,68 (3) [16,53-29,25] <sup>c</sup>
Temp_50cm	26,9 (1,27) [22,16-28,86] <sup>b</sup>	27,38 (2,06) [21,49-29,56] <sup>a</sup>	24,75 (2,21) [17,34-8,43] <sup>c</sup>	22,67 (2,79) [17,5-28,79] <sup>d</sup>
Temp_100cm	25,76 (1,06) [22,56-27,54] <sup>b</sup>	26,63 (1,7) [22-28,31] <sup>a</sup>	24,88 (1,67) [20,21-7,96] <sup>c</sup>	22,52 (2,28) [19,48-27,14] <sup>d</sup>

Para cada variável, letras diferentes entre as médias indicam diferença significativa ( $p < 0,05$ ) pelo teste Anova complementada pelo teste Tukey.

A umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa) apresentou valores médios menores no início do ciclo (estádio SL) e houve aumento desses valores ao longo do ciclo, sendo observados, no estágio LDC, os maiores valores médios.

É possível observar que os valores médios de temperatura do solo na superfície; à 5; 10; 20; 30 e 50 cm atingiram valor 27°C ou superiores nos estádios LC e LD, estádios em que a temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa) também apresentou maiores valores médios, corroborando com outros estudos como o de Sousa, R. (2021). Nesses estádios (LC e LD) as plantas se encontravam em pleno desenvolvimento de ramos e folhas; Sousa, F. (2021), trabalhando com lúpulo,

observou situação semelhante e maior desenvolvimento do lúpulo em estádios semelhantes, em temperatura do ar próxima à 32°C.

O resumo dos valores médios das variáveis analisadas, nos diferentes estádios de desenvolvimento do lúpulo, para a safra 21/22 estão apresentados na Tabela 7.

**Tabela 7.** Resumo das variáveis [Média, desvio padrão (entre parêntesis), valores mínimo e máximo (entre colchetes)], em função dos diferentes estádios de desenvolvimento da cultura na Safra 21/22

Variável	LC	LD	LDC	SL
Temp_estacao	22,74 (3,28) [17,18-31,42] <sup>b</sup>	24,54 (3,28) [19-32] <sup>a</sup>	20,68 (4,52) [3,91-30,49] <sup>c</sup>	22,99 (3,64) [16,44-31,53] <sup>b</sup>
Temp_2mt	24,17 (4,78) [16,94-37,14] <sup>b</sup>	25,92 (4,65) [19,39-37,07] <sup>a</sup>	21,27 (5,46) [3,8-33,98] <sup>c</sup>	24,58 (5,05) [16,51-37,27] <sup>b</sup>
Temp_Teto_Estufa	23,81 (5,42) [16,02-39,88] <sup>c</sup>	25,98 (5,78) [18,46-40,93] <sup>a</sup>	21,29 (6,56) [2,76-38,04] <sup>d</sup>	24,74 (6,41) [15,59-41,63] <sup>b</sup>
UR_estacao	78,28 (15,71) [38,96-98,6] <sup>a</sup>	72,74 (15,81) [31,87-98,6] <sup>b</sup>	73,48 (14,4) [33,08-98,6] <sup>b</sup>	77,89 (15,1) [39,51-98,6] <sup>a</sup>
UR_2mt	76,66 (18,67) [29,68-100] <sup>a</sup>	72,38 (18,22) [24,79-98,66] <sup>b</sup>	75,25 (16,29) [30,63-99,5] <sup>a</sup>	75,84 (17,78) [29,84-98,83] <sup>a</sup>
UR_Teto_Estufa	66,46 (18,26) [21,13-89,48] <sup>a</sup>	61,81 (18,59) [19,01-88,68] <sup>b</sup>	65,19 (16,73) [24,45-88,78] <sup>a</sup>	64,95 (19,32) [19,57-89,16] <sup>a</sup>
Rad_estacao	0,86 (1,19) [0-3,89] <sup>a</sup>	0,86 (1,19) [0-3,78] <sup>ab</sup>	0,73 (1,03) [0-3,52] <sup>b</sup>	0,91 (1,21) [0-4,03] <sup>a</sup>
Rad_estufa	0,6 (0,83) [0-2,91] <sup>a</sup>	0,56 (0,79) [0-2,67] <sup>a</sup>	0,36 (0,53) [0-2,3] <sup>b</sup>	0,61 (0,83) [0-2,74] <sup>a</sup>
Temp_Superficie_solo	26,81 (7,17) [17,24-49,01] <sup>b</sup>	28,93 (7,11) [20,57-48,27] <sup>a</sup>	23,25 (6,94) [7,64-47,71] <sup>c</sup>	26,32 (6,01) [16,96-43,06] <sup>b</sup>
Temp_5cm	27,09 (3,31) [21,64-36] <sup>b</sup>	29,08 (2,75) [25,16-36,21] <sup>a</sup>	23,24 (4,16) [11,58-34,82] <sup>d</sup>	26,48 (3,11) [20,01-33,46] <sup>c</sup>
Temp_10cm	27,25 (2,69) [22,81-33,77] <sup>b</sup>	29,13 (1,99) [25,87-33,79] <sup>a</sup>	23,32 (3,77) [12,17-32,68] <sup>d</sup>	26,77 (2,69) [20,74-32,34] <sup>c</sup>
Temp_20cm	27,53 (1,77) [24,34-30,88] <sup>b</sup>	29,3 (0,97) [27,19-31,15] <sup>a</sup>	23,68 (3,17) [14,09-29,97] <sup>d</sup>	27,07 (2,08) [22,91-30,4] <sup>c</sup>
Temp_30cm	27,39 (1,35) [24,99-29,47] <sup>b</sup>	29,17 (0,58) [27,71-30,12] <sup>a</sup>	23,84 (2,85) [15,75-28,9] <sup>d</sup>	26,77 (1,85) [23,54-29,25] <sup>c</sup>
Temp_50cm	27,33 (1,03) [25,54-28,8] <sup>b</sup>	29,05 (0,36) [28,05-29,56] <sup>a</sup>	24,16 (2,58) [17,34-28,43] <sup>d</sup>	26,5 (1,67) [24-28,79] <sup>c</sup>
Temp_100cm	26,7 (0,46) [26,01-27,54] <sup>b</sup>	28,04 (0,21) [27,53-28,31] <sup>a</sup>	24,73 (1,99) [20,21-27,96] <sup>d</sup>	25,35 (1,03) [24,18-27,14] <sup>c</sup>

Para cada variável, letras diferentes entre as médias indicam diferença significativa ( $p < 0,05$ ) pelo teste Anova complementada pelo teste Tukey.

Ao longo do período da safra 21/22, se observa que os estádios SL e LC apresentam elevados valores médios para as variáveis temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa), umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa), temperatura do solo (Temp\_Superficie\_solo; Temp\_5cm, Temp\_10cm; Temp\_20cm; Temp\_30cm;

Temp\_50cm; Temp\_100cm) e radiação solar (Rad\_estacao; Rad\_estufa), condizente com o esperado para a estação do ano verão e o mês de janeiro.

No estádio LD foram obtidos os maiores valores médios das variáveis temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa) e temperatura do solo (Temp\_Superficie\_solo; Temp\_5cm, Temp\_10cm; Temp\_20cm; Temp\_30cm; Temp\_50cm; Temp\_100cm), visto que era fevereiro ainda na época do verão, porém as variáveis umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa) apresentaram os menores valores do período, não diferindo do estádio LDC para UR\_estação. Já a variável radiação solar (Rad\_estacao; Rad\_estufa) exibiu valores semelhantes aos apresentados nos estádios SL e LC.

O estádio LDC apresentou os menores valores médios para temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa), temperatura do solo e radiação solar, também esperado para a época do ano, sendo outono e os meses de final de março, abril e maio; tais condições de temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa) e radiação solar elevados durante os estádios de grande desenvolvimento e os menores valores dessas variáveis observados no estádio LDC, período de maturação dos cones, podem estar correlacionados à maior produtividade nessa safra.

O resumo dos valores médios das variáveis analisadas, nos diferentes estádios de desenvolvimento do lúpulo, para a safra 22/23 estão apresentados na Tabela 8. Ao longo do período da safra 22/23, as variáveis temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa), temperatura do solo (Temp\_Superficie\_solo; Temp\_5cm, Temp\_10cm; Temp\_20cm; Temp\_30cm; Temp\_50cm; Temp\_100cm) e radiação solar (Rad\_estacao; Rad\_estufa), apresentaram pouca variação dos valores médios nos estádios SL (outubro de 2022), LD (dezembro de 2022) e LDC (janeiro e início de fevereiro de 2023), e os maiores valores médios no estádio LC (novembro e início de dezembro de 2022), indicativo de um ano atípico, visto que na estação do verão, em geral, a temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa) é mais elevada em dezembro e janeiro.

A umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa) apresentou valores médios maiores nos estádios LDC, seguido do estádio LD e os menores valores SL e LC, valores esperados para a época do ano.

**Tabela 8.** Resumo das variáveis [Média, desvio padrão (entre parêntesis), valores mínimo e máximo (entre colchetes)] , em função dos diferentes estádios de desenvolvimento da cultura na Safra 22/23

Variável	LC	LD	LDC	SL
Temp_estacao	23,67 (4,86) [12,56-39,29] <sup>a</sup>	22,03 (3,23) [14,32-30,79] <sup>b</sup>	22,03 (2,91) [16,02-30,34] <sup>b</sup>	22,01 (3,06) [17,47-29,9] <sup>b</sup>
Temp_2mt	22,85 (5,67) [10,9-37,21] <sup>a</sup>	22,76 (3,61) [14,15-32,59] <sup>a</sup>	22,8 (3,36) [16,06-32,07] <sup>a</sup>	22,17 (4,43) [14,67-33,85] <sup>a</sup>
Temp_Teto_Estufa	22,49 (6,39) [9,95-40,12] <sup>ab</sup>	22,69 (4,28) [12,58-34,38] <sup>ab</sup>	22,75 (4,17) [14,84-35,19] <sup>a</sup>	21,72 (5,05) [13,92-36,27] <sup>b</sup>
UR_estacao	73,01 (18) [26,84-100] <sup>c</sup>	80,1 (14,38) [40,53-98,7] <sup>b</sup>	83,35 (12,29) [43,83-98,6] <sup>a</sup>	75,35 (16,65) [35,25-98,6] <sup>c</sup>
UR_2mt	70,17 (21,26) [18,57-105,53] <sup>d</sup>	79,65 (15,46) [36,62-99,11] <sup>b</sup>	83,34 (14,32) [40,01-101,51] <sup>a</sup>	73,84 (18,86) [27,99-100] <sup>c</sup>
UR_Teto_Estufa	60,49 (20,18) [14,97-95,66] <sup>d</sup>	69,53 (14,3) [29,73-87,54] <sup>b</sup>	72,41 (13,34) [32,87-89,92] <sup>a</sup>	63,85 (18,41) [19,19-89,38] <sup>c</sup>
Rad_estacao	0,99 (1,3) [0-4,16] <sup>a</sup>	0,81 (1,15) [0-3,9] <sup>ab</sup>	0,73 (1,06) [0-4,05] <sup>b</sup>	0,74 (1,06) [0-3,75] <sup>b</sup>
Rad_estufa	0,55 (0,78) [0-2,91] <sup>a</sup>	0,37 (0,62) [0-2,31] <sup>bc</sup>	0,31 (0,53) [0-2,54] <sup>c</sup>	0,46 (0,66) [0-2,49] <sup>ab</sup>
Temp_Superficie_solo	27,88 (8,96) [12,97-52,73] <sup>a</sup>	25,28 (3,96) [15,48-35,76] <sup>b</sup>	25,64 (4,09) [17,54-42,67] <sup>b</sup>	25,56 (7,27) [16,39-47,96] <sup>b</sup>
Temp_5cm	27,65 (4,52) [17,12-38,69] <sup>a</sup>	25,29 (2,75) [18,14-32,66] <sup>b</sup>	25,73 (2,67) [19,48-33,9] <sup>b</sup>	25,23 (3,46) [19,88-35,41] <sup>b</sup>
Temp_10cm	27,59 (3,66) [18,19-35,92] <sup>a</sup>	25,35 (2,43) [18,97-32,13] <sup>bc</sup>	25,81 (2,33) [20,11-32,36] <sup>b</sup>	25,22 (2,78) [20,76-32,91] <sup>c</sup>
Temp_20cm	27,51 (2,2) [20,8-31,79] <sup>a</sup>	25,54 (1,72) [20,98-30,78] <sup>c</sup>	26,06 (1,62) [21,45-29,71] <sup>b</sup>	25,12 (1,41) [22,68-28,89] <sup>d</sup>
Temp_30cm	27,08 (1,61) [21,9-29,95] <sup>a</sup>	25,41 (1,45) [21,23-29,79] <sup>c</sup>	25,97 (1,37) [21,44-28,42] <sup>b</sup>	24,66 (0,75) [23,32-26,73] <sup>d</sup>
Temp_50cm	26,68 (1,32) [22,16-28,86] <sup>a</sup>	25,37 (1,33) [21,49-29,32] <sup>c</sup>	25,96 (1,3) [21,62-28,31] <sup>b</sup>	24,23 (0,51) [23,43-25,45] <sup>d</sup>
Temp_100cm	25,27 (0,94) [22,56-26,74] <sup>b</sup>	24,94 (1,01) [22-27,82] <sup>c</sup>	25,5 (1,08) [22,04-27,07] <sup>a</sup>	22,86 (0,51) [21,72-23,55] <sup>d</sup>

Para cada variável, letras diferentes entre as médias indicam diferença significativa ( $p < 0,05$ ) pelo teste Anova complementada pelo teste Tukey.

Os valores médios das variáveis temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa), temperatura do solo (Temp\_Superficie\_solo; Temp\_5cm, Temp\_10cm; Temp\_20cm; Temp\_30cm; Temp\_50cm; Temp\_100cm) e radiação solar (Rad\_estacao; Rad\_estufa), nos períodos de maior crescimento vegetativo (estádios LC e LD) da planta, podem ter influenciado a menor produtividade desta safra; e a umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa) com valores médios mais elevados no estágio LDC, pode estar correlacionada à maior oxidação visualizada nos cones (Figura 6).

A transmitância (Tabela 9) em ambiente protegido refere-se à capacidade do material que cobre o ambiente protegido de permitir a passagem da radiação solar e atingir as plantas, portanto, um parâmetro que influencia diretamente o microclima

interno na promoção do crescimento das culturas, afetando processos vitais como a fotossíntese e a transpiração, uma vez que a radiação solar influencia a temperatura interna da estufa, influenciando também a ocorrência de pragas e doenças. Fatores como o ângulo de incidência da radiação solar sobre a cobertura e a renovação do ar dentro do ambiente protegido também podem influenciar o microclima interno (Pezzopane; Pedro Júnior; Ortolani, 1995; Rebouças *et al.*, 2014). Em trabalhos conduzidos em ambiente protegido na cidade de Botucatu, Sousa, R. (2021) observou transmitância média de 69%, já Lenz *et al.* (2021) encontraram valores médios de 66% de transmitância, valores médios acima dos encontrados nesse trabalho, o que pode ser atribuídos ao desgaste da cobertura plástica, resultado do seu tempo de uso e acúmulo de sujeiras.

**Tabela 9.** Transmitância da cobertura plástica observada ao longo do experimento, nas diferentes safras e estádios de desenvolvimento do lúpulo

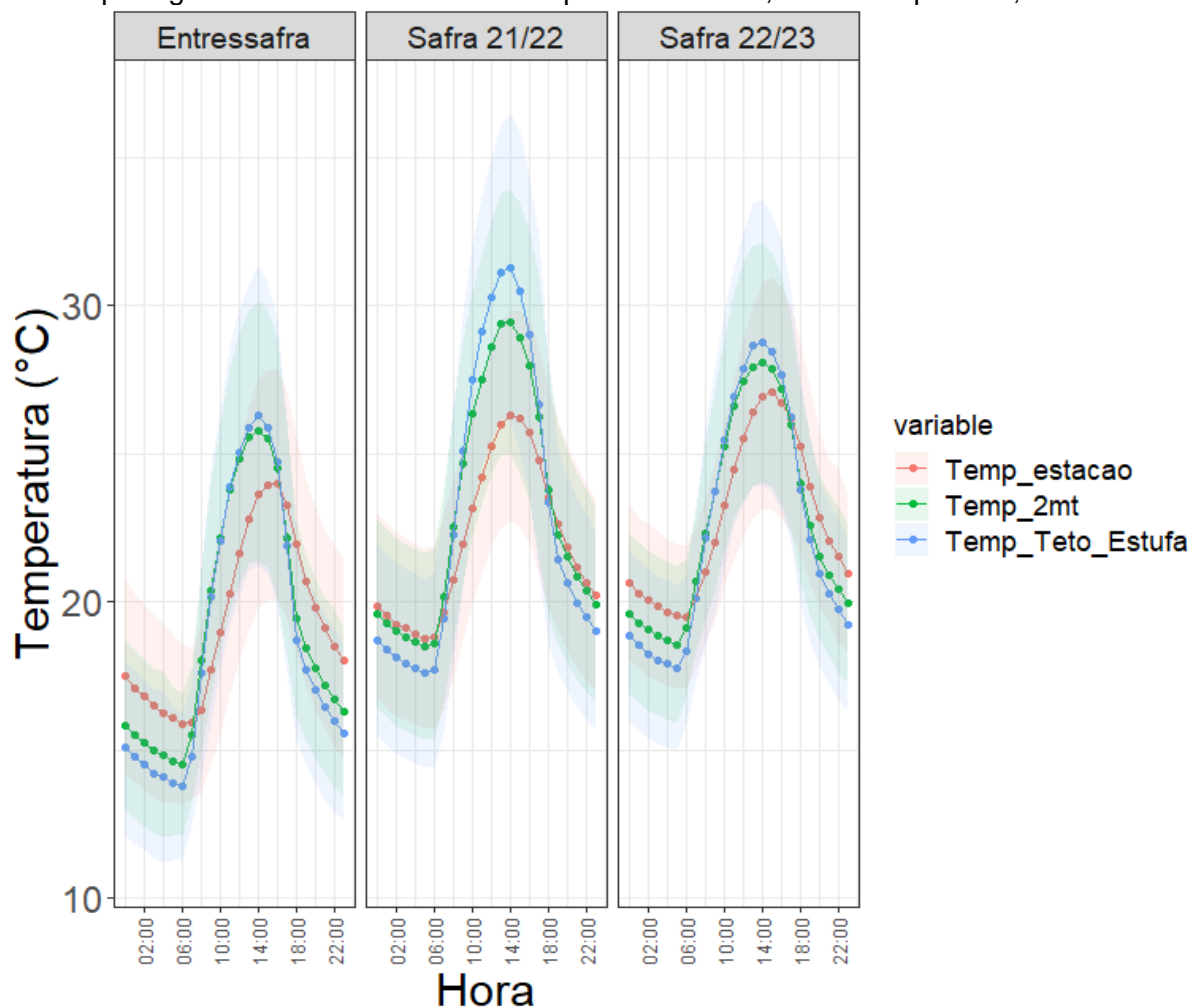
Período	Média %	Desvio padrão
SAFRA 1	58,25	7,45
SL	65,81	10,05
LC	68,41	2,63
LD	64,88	2,81
LDC	49,49	4,28
SAFRA 2	62,63	9,39
SL	61,63	9,65
LC	62,74	5,89
LD	68,78	0,79
LDC	60,73	14,71

Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 7 estão apresentadas a média horária (linha) e o desvio padrão (sombreamento) para as variáveis temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa). É possível notar a diferença dos valores de temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa) entre as safras, sendo que na safra 22/23, foram observados os maiores valores da variável temperatura na estação (Temp\_estacao) e houve pouca diferença entre essa variável com os valores de temperatura observados dentro do ambiente protegido (Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa). Já na safra 21/22, a média horária da variável temperatura do ar foi parecida, sendo os maiores valores observados no interior do ambiente protegido

(Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa) e se observa maior diferença entre os valores internos e externos do ambiente protegido.

**Figura 7.** Médias horárias para as variáveis temperatura do ar na estação e em ambiente protegido a dois metros de altura e próximo ao teto, durante o período, em °C

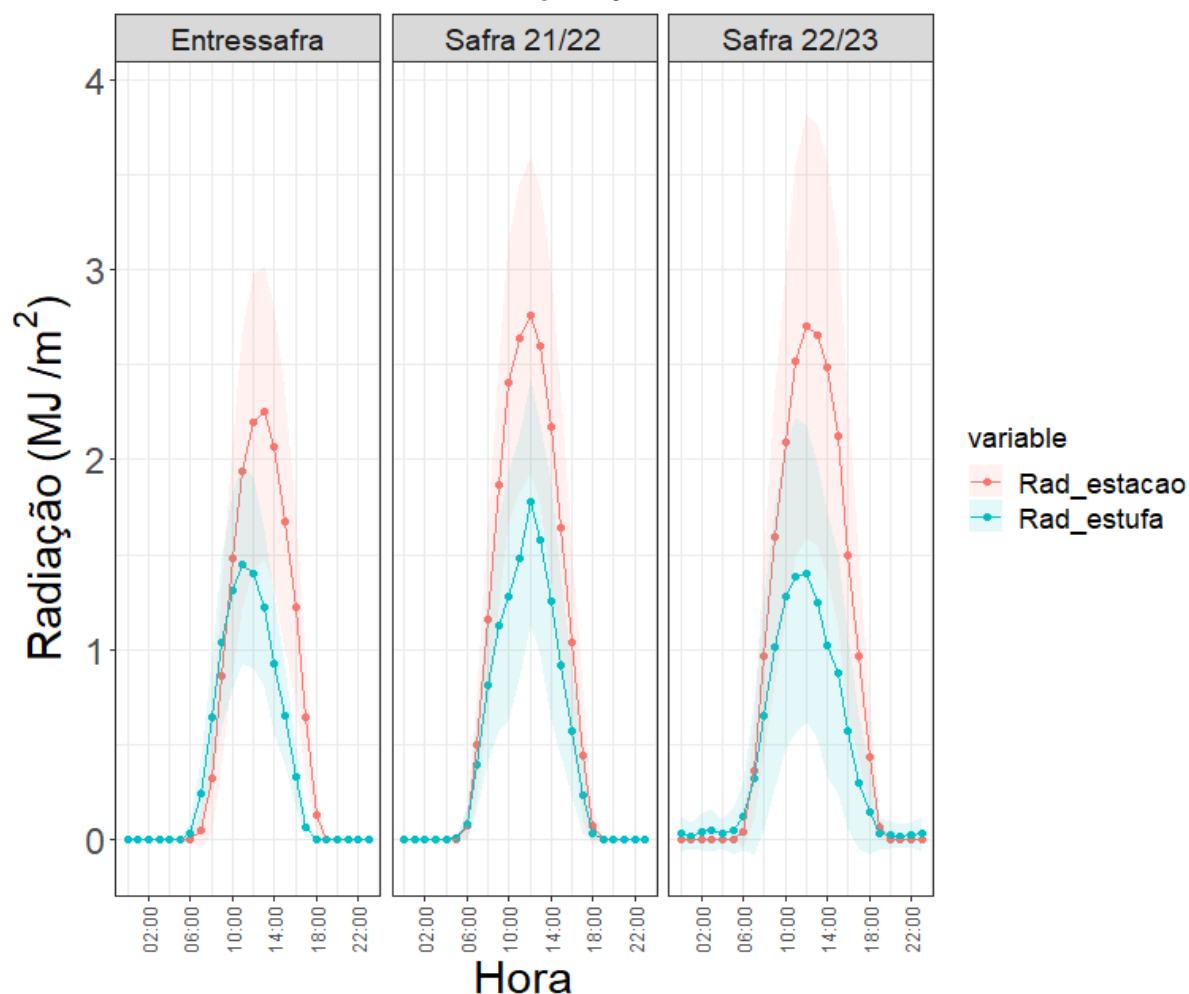


A temperatura do ar em ambiente protegido (Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa) é superior à registrada fora do mesmo (Temp\_estacao), uma vez que a cobertura plástica proporciona esse efeito dentro da estufa, mantendo a temperatura do ar elevada mesmo no início do período noturno, onde a temperatura externa já reduziu consideravelmente, corroborando com outros estudos que avaliaram o efeito da cobertura plástica na variável temperatura do ar em ambiente protegido (Seeman, 1979; Silva *et al.* 2003 e Santos; Junior; Nunes, 2010). Observa-se também que a temperatura próxima ao teto do ambiente protegido apresentou comportamento peculiar, sendo maior durante o dia, porém menor que as demais medidas de temperatura durante a noite, ou seja, com maior amplitude térmica. Florescimento

precoce e baixa biossintetização de alfa e beta-ácidos foram verificados por Mozny *et al.* (2009) e Bauerle (2019), em condições de temperaturas do ar acima de 32°C.

Na Figura 8 estão apresentadas a média horária (linha) e o desvio padrão (sombreamento) para as variáveis radiação solar (Rad\_estacao; Rad\_estufa) externa e interna ao ambiente protegido.

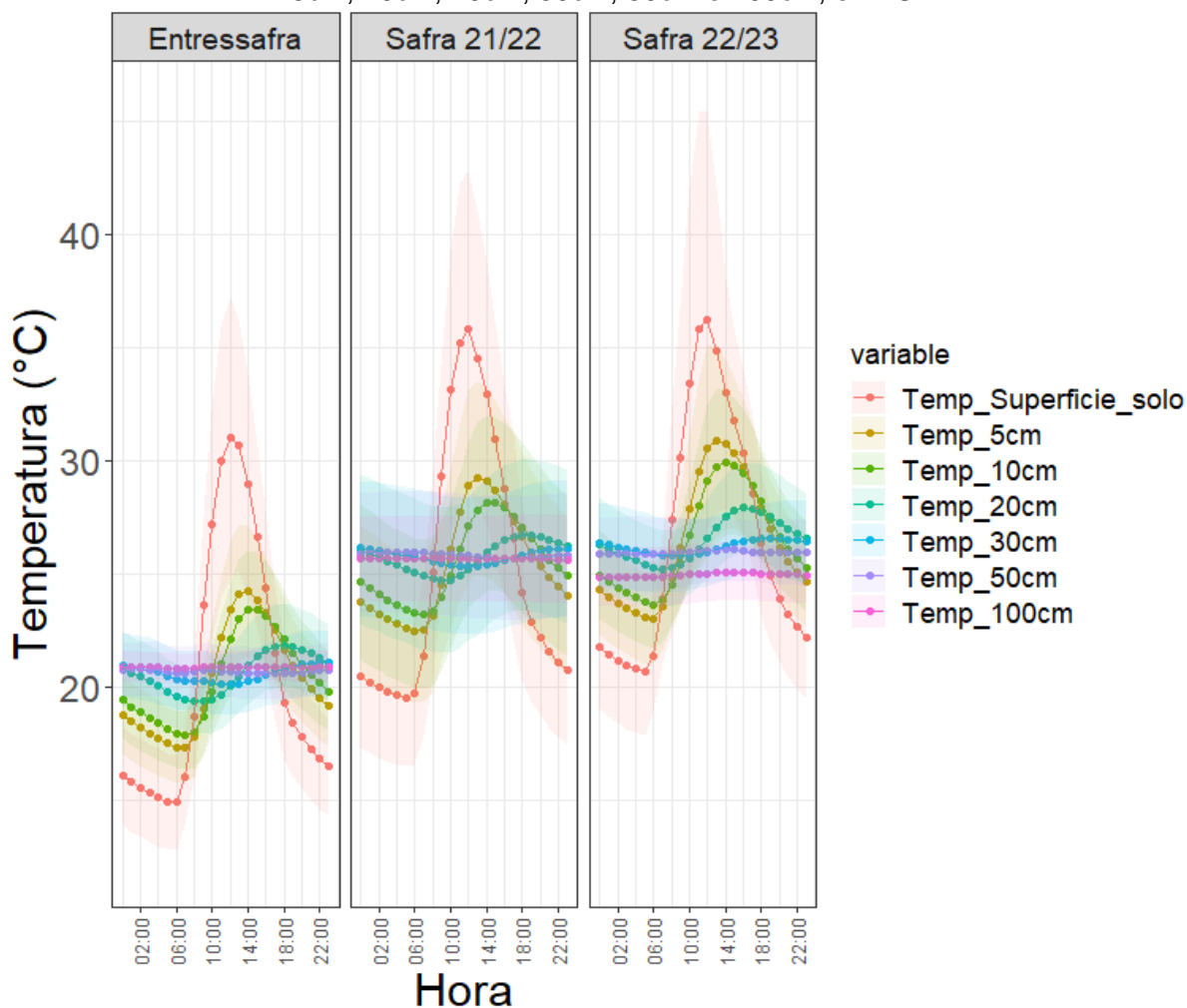
**Figura 8.** Médias horárias dos valores de radiação externa e interna ao ambiente protegido, em MJ.m<sup>-2</sup>



Nota-se que a radiação solar mensurada na estação meteorológica (Rad\_estacao) é muito superior a coletada no ambiente protegido (Rad\_estufa), como já citado, o provável motivo dessa diferença é a presença da cobertura plástica opaca que atenua a radiação solar e promove a reflexão de parte da mesma (Dal Pai, 2010). Sousa, R. (2021) observou em lúpulo cultivado em ambiente protegido, atenuação de aproximadamente 21% da radiação solar incidente em virtude da cobertura plástica e que o saldo de radiação interno do ambiente protegido é 23% menor que o saldo de radiação global externa.

Os valores de média horária (linha) e desvio padrão (sombreamento) obtidos para as variáveis de temperatura do solo nas diferentes profundidades (superfície; 5; 10; 20; 30; 50 e 100 cm) estão apresentados na Figura 9.

**Figura 9.** Médias horárias das temperaturas do solo, na superfície e nas profundidades de 5cm, 10cm, 20cm, 30cm, 50cm e 100cm, em °C

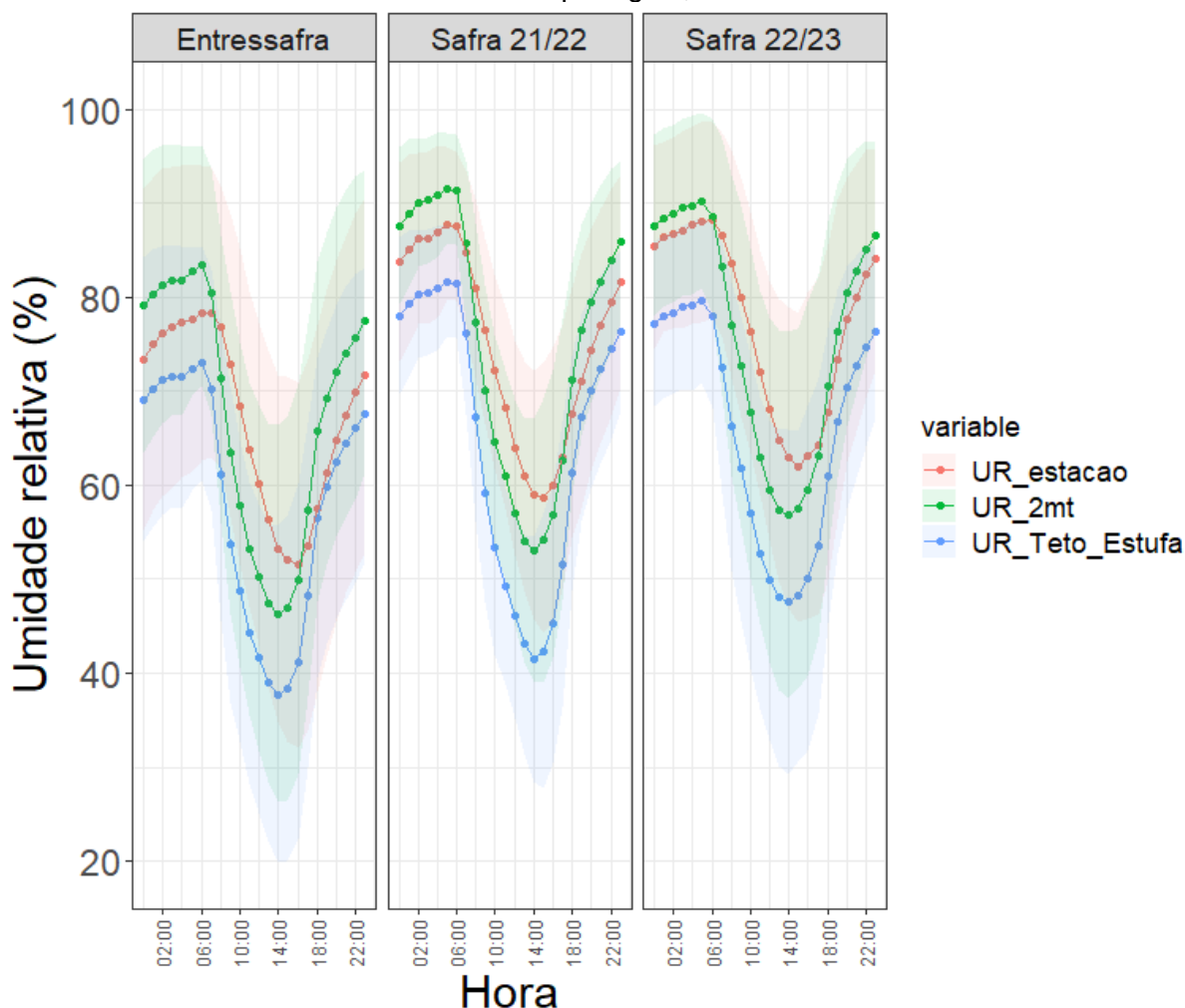


Observa-se que a variável temperatura do solo na superfície (Temp\_Superficie\_solo) apresentou maior amplitude térmica, registrando os menores valores durante a partição noturna e maiores valores na partição diurna, à medida que a profundidade aumenta a amplitude térmica, e os valores máximos e mínimos de temperatura diminuem ao ponto que nas profundidades de 50 e 100 cm (Temp\_50cm; Temp\_100cm) os valores se mantêm muito próximos e constantes, corroborando o descrito por outros trabalhos (Sousa, R., 2021). Entre as safras 21/22 e 22/23 é possível observar que houve pouca diferença no comportamento da variável, sendo

um pouco mais notória a diferença nas profundidades de 5; 10 e 20 cm, porém sem diferença significativa.

Na Figura 10 estão apresentadas a média horária (linha) e o desvio padrão (sombreamento) para as variáveis umidade do ar externa e internas ao ambiente protegido (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa), apresentando ligeira queda nos valores de umidade relativa do ar próximo ao teto do ambiente protegido (UR\_Teto\_Estufa), em função, principalmente, da cobertura plástica que permanece muito quente durante o dia e, a noite quando resfria-se, promove a condensação de água presente no ar que cai sobre as plantas e o solo da estufa.

**Figura 10.** Médias horárias das variáveis umidade relativa do ar externa e internas do ambiente protegido, em %



Os valores de umidade dentro do ambiente protegido à 2m de altura são maiores que os valores da estação meteorológica muito provavelmente devido às plantas de lúpulo e sua atividade metabólica. Em ambiente protegido, o acúmulo de umidade

reflete em queda da transpiração das plantas, promovendo o aumento da temperatura dos tecidos, e condicionando as plantas à estresse térmico e hídrico (Bergamaschi; Bergonci, 2017)

A safra 21/22 apresentou as menores médias diárias de umidade relativa, muito provavelmente, influenciado pela estação do ano em que a safra decorreu, final do verão e outono.

#### 1.4.3 Análise de componentes principais com dados imputados

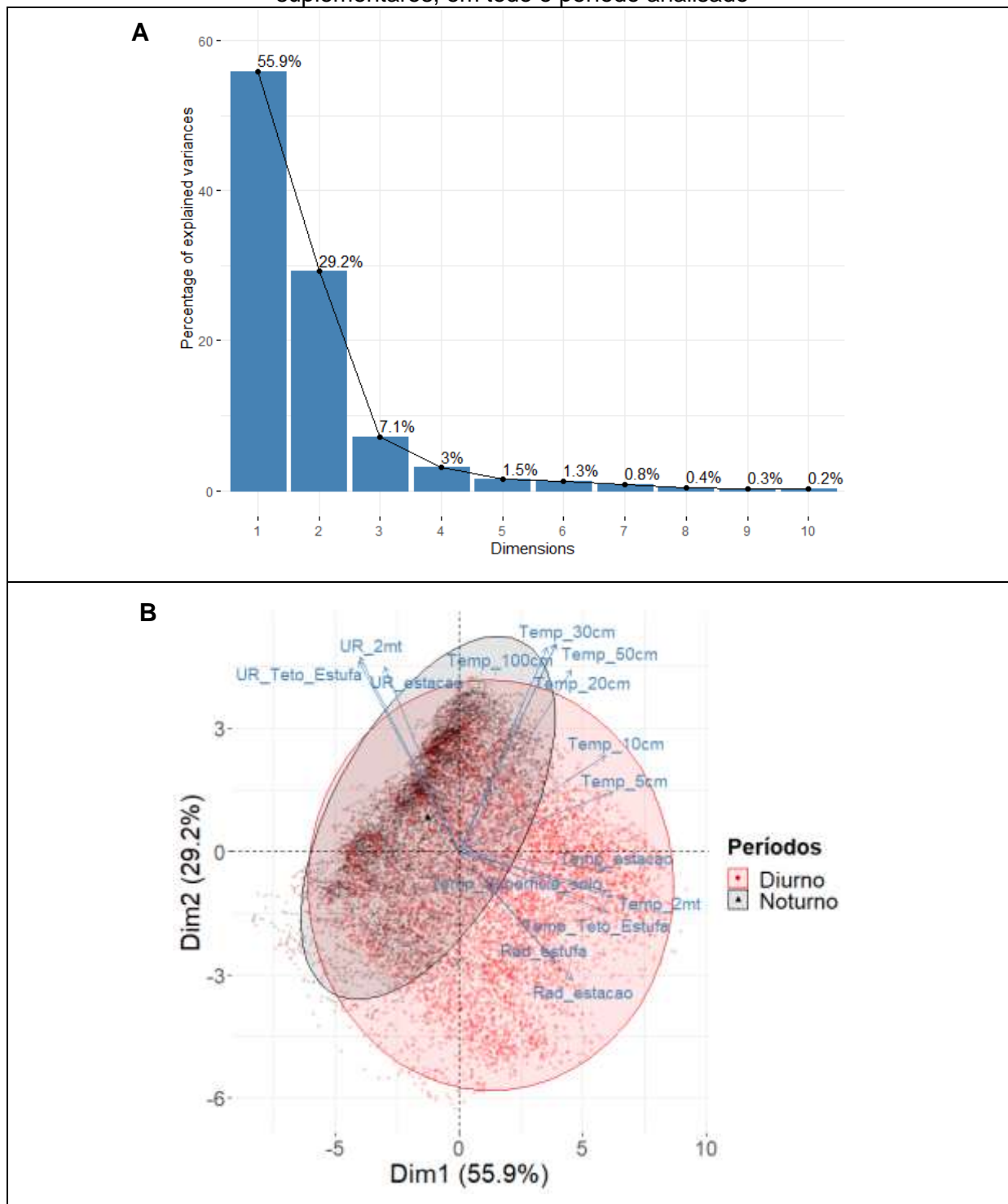
A PCA é uma técnica de redução de dimensionalidade frequentemente usada nas ciências de dados e estatísticas para simplificar conjuntos de dados complexos, onde muitas variáveis estão inter-relacionadas e podem ser difíceis de serem percebidas na análise univariada diretamente. Para tanto são geradas novas variáveis que são obtidas a partir de uma combinação linear das variáveis originais do conjunto de dados, de forma a capturar a maior quantidade possível da variabilidade presente nos dados originais. Essas novas variáveis são chamadas de dimensões (DIM) ou componentes principais (PC).

A análise multivariada PCA apresentou duas principais dimensões DIM 1 e DIM 2, como pode ser observado nas Figuras 11 à 15, sendo a DIM1 caracterizada por valores médios de temperatura do ar e do solo nas camadas mais superficiais, sendo que quanto mais positivos os valores na dimensão maiores foram os valores médios; enquanto a DIM2 é caracterizada por um contraste entre os valores médios de umidade relativa do ar e radiação solar.

Na Figura 11A observa-se o gráfico *Scree Plot*, o qual indica o quanto (em porcentagem) cada dimensão está explicando da variabilidade total dos dados originais e a Figura 11B é a representação vetorial da interação das diferentes variáveis nas duas dimensões principais, as quais juntas, explicam 85,1% da variabilidade dos dados e considerando as partições diurna e noturna.

Com base na Figura 11B é possível verificar que a dimensão 1 (DIM1) está mais associada aos valores de temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa) e alguns valores de temperatura do solo (Temp\_Superficie\_solo; Temp\_5cm, Temp\_10cm), ou seja, horários mais elevados nesta dimensão indicam que estas horas apresentaram temperaturas mais elevadas e valores mais baixos de

**Figura 11. A.** *Scree plot* de cada componente principal ou dimensão. **B.** Biplot das dimensões e vetores das variáveis, sendo as partições diurna e noturna as variáveis suplementares, em todo o período analisado



umidade relativa do ar, já DIM1 (mais à esquerda) estão associados aos horários do dia com menores temperaturas. Ao observar a dimensão 2 (DIM2) nota-se que a formação dessa dimensão esteve mais associada à um contraste entre umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa) e temperatura do solo mais

profunda (Temp\_20cm; Temp\_30cm; Temp\_50cm; Temp\_100cm) com a radiação solar (Rad\_estacao; Rad\_estufa), ou seja, valores mais elevados nesta dimensão indicam horários em que a umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa) e a temperatura do solo em profundidades acima de 20 cm (Temp\_20cm; Temp\_30cm; Temp\_50cm; Temp\_100cm) estavam mais elevadas e a radiação solar (Rad\_estacao; Rad\_estufa) apresentava valores mais baixos.

Os estudos desenvolvidos pelos autores Nogarotto *et al.* e Tibulo *et al.* corroboram com os resultados observados. Os autores analisaram variáveis climatológicas e observaram grande correlação inversamente proporcional entre temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa) e umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa). De tal forma que, quando uma dimensão era influenciada pela temperatura do ar a outra era pela umidade relativa do ar. Este resultado também pode ser verificado na Figura 11, onde DIM1 é influenciado majoritariamente pela temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa) e DIM2 pela umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa) e radiação (Rad\_estacao; Rad\_estufa).

Ainda neste sentido, os autores Gebert *et al.* (2018) analisaram variáveis climatológicas no estado do Paraná (PR) e verificaram grande correlação entre variáveis precipitação, temperatura do ar e umidade relativa do ar, sendo umidade relativa do ar e precipitação uma Dimensão e Temperatura do ar outra Dimensão (ou PCs) e juntos esses PCs explicaram mais de 92% da variância total dos dados. Em complemento, os autores Prado *et al.* (2016) observaram que as variáveis eram agrupadas em dois componentes principais um relacionado à temperatura do ar e outro mais correlacionado a umidade relativa do ar e precipitação.

As elipses de concentração, representada na Figura 11, delimita a área que contém 95% dos dados coletados no estudo para a partição diurna e noturna das horas, representando assim o intervalo de concentração dos dados. Neste sentido, é possível verificar que no período diurno, devido ao tamanho e forma circular, os valores de temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa), temperatura do solo (Temp\_Superficie\_solo; Temp\_5cm, Temp\_10cm; Temp\_20cm; Temp\_30cm; Temp\_50cm; Temp\_100cm), radiação solar (Rad\_estacao; Rad\_estufa) e umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa) apresentaram grande variação. Contudo, ao observar o período noturno, a amplitude das temperaturas (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa), foi menor e os valores

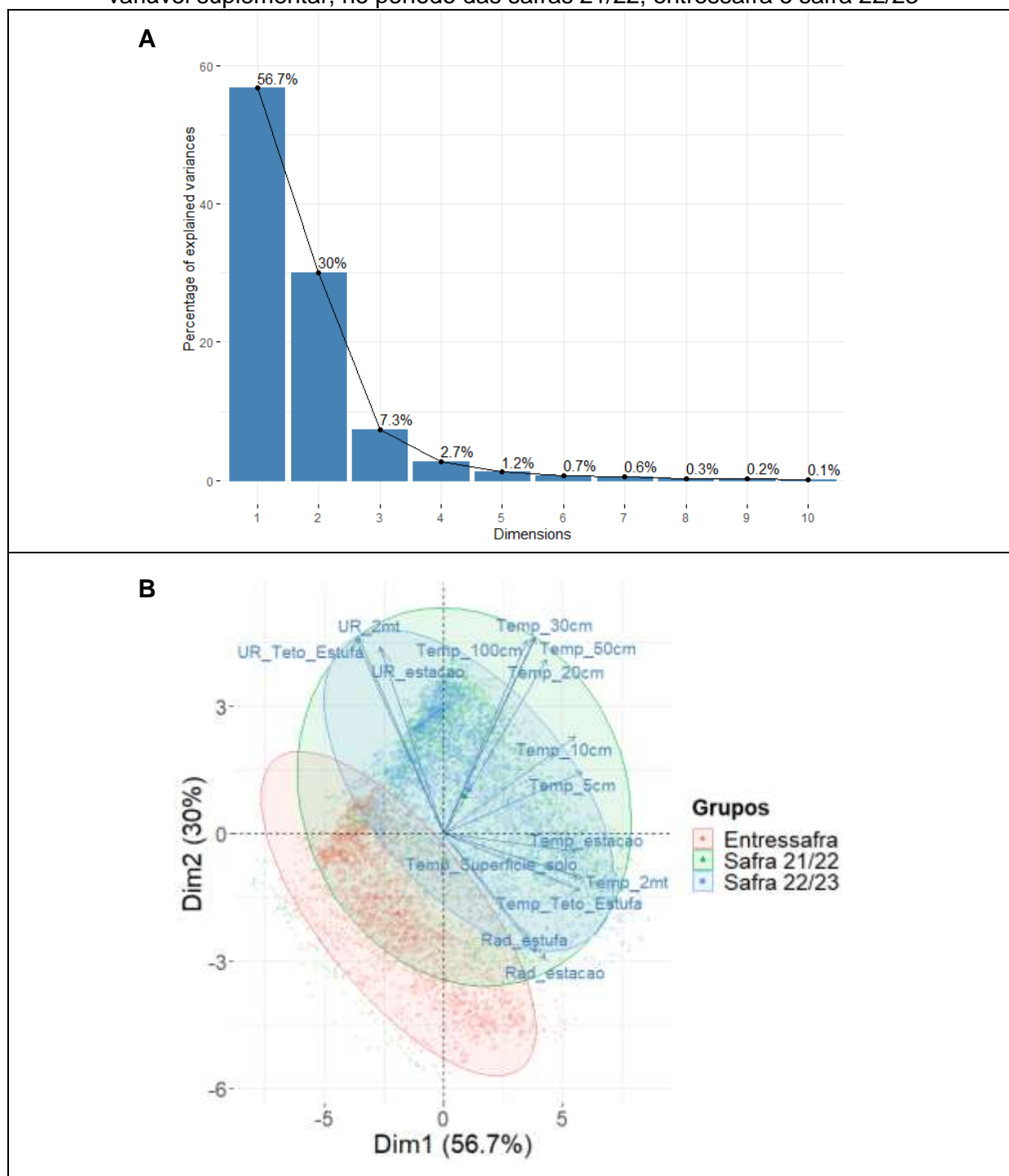
de radiação solar (Rad\_estacao; Rad\_estufa) foram praticamente nulos, tendo em vista o menor alongamento da elipse na cor preta na DIM1 (maior na DIM2) e posição mais centralizada levemente inclinada para a esquerda. No período noturno, também é possível verificar que foi o momento em que a maior parte das horas registradas apresentaram maiores valores de umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa).

Diante desta verificação, devido ao posicionamento da elipse de concentração vermelha (Diurno), mais centralizado e levemente inclinado ao canto inferior direito, no período diurno os valores de temperatura do ar (Temp\_estação, Temp\_2mt, Temp\_Teto\_estufa), temperatura do solo (Temp\_Superficie\_solo; Temp\_5cm, Temp\_10cm) foram maiores do que no período noturno, denotando o comportamento esperado para o período noturno e diurno, ou seja, maiores valores de temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa) e radiação solar (Rad\_estacao; Rad\_estufa) no dia e temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa) mais amenas e umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa) maior durante a noite, conforme citado na literatura (Seeman, 1979; Silva *et al.* 2003; Santos; Junior; Nunes, 2010 e Sousa, R., 2021).

Já a Figura 12A apresenta o *Scree plot* indicando quanto cada componente principal ou dimensão explica da variabilidade total dos dados. Observa-se que a Dimensão 1 explica 56,7% e a Dimensão 2 explica 30%, somadas as duas PC atingem um total de 86,7% da variação total dos dados.

A Figura 12B mostra a distribuição dos horários observados em cada safra e entressafra (como variáveis suplementares), considerando a caracterização das Dimensões 1 e 2 já apresentada, ou seja, a Dimensão 1 mais associadas com as temperaturas do ar e solo próximo da superfície e a Dimensão 2 caracterizada como um contraste entre umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa) e temperatura do solo em maiores profundidades (Temp\_20cm; Temp\_30cm; Temp\_50cm; Temp\_100cm) com radiação solar (Rad\_estacao; Rad\_estufa). Diante dessa configuração, ao observar as elipses de concentração para os três períodos caracterizados (Safra 21/22, Safra 22/23 e entressafra), é factível inferir que o período de entressafra apresentou menores valores de temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa) e umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa), quando comparado com os períodos da Safra 21/22 e Safra 22/23.

**Figura 12. A. Scree plot. B. Biplot** das elipses de concentração (95%), tendo safras como variável suplementar, no período das safras 21/22; entressafra e safra 22/23



Além disso, amplitude das variáveis de temperatura na Entressafra foi menor do que na Safra 21/22 e Safra 22/23 (devido ao tamanho e circularidade da elipse). As variáveis que mais diferenciaram a Entressafra dos períodos de safra foram temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa), temperatura do solo,

exceto superfície (Temp\_Superficie\_solo; Temp\_5cm, Temp\_10cm; Temp\_20cm; Temp\_30cm; Temp\_50cm; Temp\_100cm), umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa) e radiação solar (Rad\_estacao; Rad\_estufa) apresentando horários com bastante diferenças entre umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa) e radiação solar (Rad\_estacao; Rad\_estufa). Todas essas variáveis apresentaram menores valores na Entressafra, fato que pode ser explicado pelo fato de ocorrer durante o inverno e começo da primavera até o início da safra 22/23.

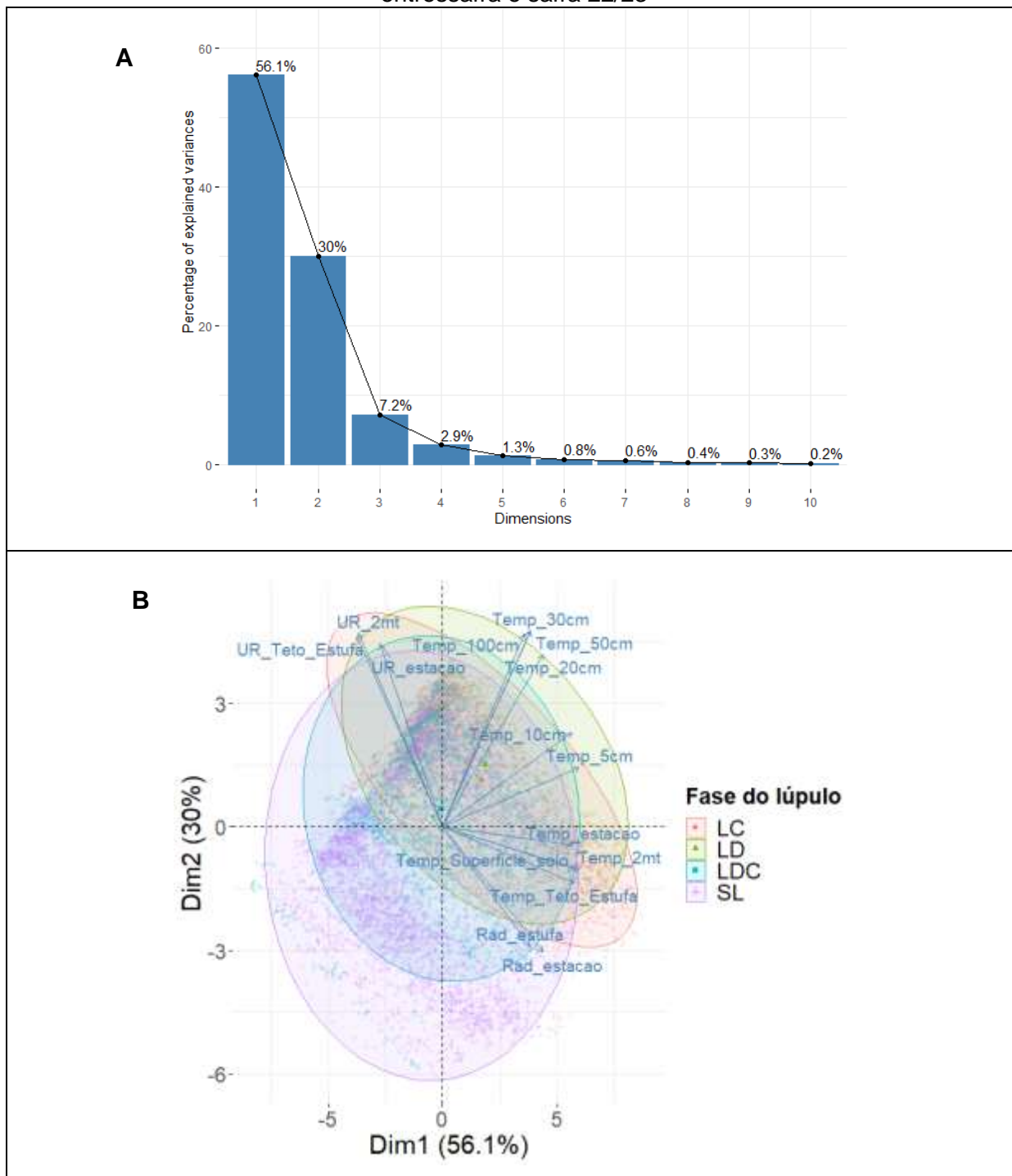
Outra característica importante que a Figura 12B denota é a diferença do agrupamento dos horários das Safra 21/22 e Safra 22/23. É possível observar que na Safra 21/22 houve maior amplitude térmica da temperatura do ar (Temp\_estação) e do solo (Temp\_5cm, Temp\_10cm; Temp\_20cm; Temp\_30cm; Temp\_50cm; Temp\_100cm) e de radiação solar (Rad\_estacao; Rad\_estufa). Por outro lado, houve comportamento semelhante entre as safras em relação as diferenças (contrastos) entre umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa), com a radiação solar.

O gráfico *Scree plot* de cada dimensão, quando se adota os estádios de desenvolvimento da cultura como variáveis suplementares em cada safra está apresentado na Figura 13A, no qual é possível observar que as duas primeiras dimensões explicam conjuntamente 86,1% da variabilidade total dos dados

Já a Figura 13B ilustra o gráfico tipo *biplot* com os dois primeiros componentes principais (dimensões), considerando todas as variáveis meteorológicas avaliadas no estudo e os estádios de desenvolvimento do lúpulo como variáveis suplementares. É importante destacar que a conformação de DIM1 e DIM2 é igual da Figura 11 e 12, o que diferencia este gráfico é o agrupamento dos horários nos estádios de desenvolvimento do lúpulo, permitindo caracterizar as condições meteorológicas em cada estágio. Mediante a isso, conforme mencionado previamente, DIM1 demonstrou uma correlação mais acentuada com os registros de temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa) e temperatura do solo mais próximas a superfície (Temp\_Superficie\_solo; Temp\_5cm, Temp\_10cm), além da radiação solar (Rad\_estacao; Rad\_estufa), enquanto DIM2 mostrou uma correlação direta com os níveis de umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt;

UR\_Teto\_Estufa) e temperatura do solo em maiores profundidades (Temp\_20cm; Temp\_30cm; Temp\_50cm; Temp\_100cm) e inversa com a radiação solar.

**Figura 13. A. Scree plot. B. Biplot** das elipses de concentração (95%), tendo as fases de desenvolvimento do lúpulo como variável suplementar, no período das safras 21/22; entressafra e safra 22/23



Com base na conformação e posicionamento das elipses de concentração de cada estágio de desenvolvimento do lúpulo é possível verificar que as concentrações

dos horários observados em cada estádio apresentaram comportamentos diferentes ao longo dos estádios de desenvolvimento do lúpulo, considerando a caracterização meteorológica.

É possível verificar que no estádio SL foi o período que apresentou em média os menores valores de temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa) e umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa) e os maiores valores de radiação solar (Rad\_estacao; Rad\_estufa). Isso fica evidente devido ao posicionamento da elipse de concentração, localizada mais ao canto inferior esquerdo da Figura 13B.

Vale destacar ainda (Figura 13B), que o estádio SL foi a que apresentou maior variabilidade dos dados de temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa), umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa) e radiação solar (Rad\_estacao; Rad\_estufa, evidenciada pela formação de uma elipse de maior tamanho e com forma mais próxima de uma circunferência.

O estádio LC foi a que apresentou os maiores valores de umidade relativa do ar (UR\_teto\_estufa, Ur\_estacao, UR\_2mt), maiores valores de temperatura na superfície do solo (Temp\_Superficie\_Solo) e temperatura do ar próximo ao teto do ambiente protegido (Temp\_Teto\_Estufa) e menores valores de radiação solar (Rad\_estacao; Rad\_estufa) na maior parte dos horários avaliados, apresentando, também, uma maior variação no contraste entre umidade relativa e radiação, quando comparada aos demais estádios. Por outro lado, este estádio apresentou a menor amplitude das variáveis temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa) e temperatura do solo (Temp\_Superficie\_solo; Temp\_5cm, Temp\_10cm; Temp\_20cm; Temp\_30cm; Temp\_50cm; Temp\_100cm), devido a menor dimensão da elipse na direção dessas variáveis.

O estádio LD, apresentou características meteorológicas similares ao LC e foram verificados os maiores valores de temperatura do solo (Temp\_Superficie\_solo; Temp\_5cm, Temp\_10cm; Temp\_20cm; Temp\_30cm; Temp\_50cm; Temp\_100cm) e os menores valores de radiação solar (Rad\_estacao; Rad\_estufa), sendo essa condição atípica para a época e pode ter influenciado no desenvolvimento das plantas.

Por fim, no estádio LDC, a elipse de concentração apresentou formato grande e próximo ao de uma circunferência e, posicionada mais ao centro do gráfico. Essas características indicam que nesse estádio os valores observados das variáveis meteorológicas nos horários do estudo apresentaram variações similares nas

temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa), temperatura do solo (Temp\_Superficie\_solo; Temp\_5cm, Temp\_10cm; Temp\_20cm; Temp\_30cm; Temp\_50cm; Temp\_100cm), umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa) e radiação (Rad\_estacao; Rad\_estufa). Em média, observa-se que neste estádio as temperaturas foram mais amenas, além da umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa) e radiação solar (Rad\_estacao; Rad\_estufa) apresentando-se com valores mais elevados ou ambas com valores mais baixos.

De forma geral, verifica-se que os estádios LC e LD apresentaram os maiores valores de temperatura e umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa) e os menores valores de radiação solar. Por outro lado, o estádio SL apresentou maiores valores de radiação solar e os menores valores de temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa), e umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa), todas as variáveis neste estádio apresentaram grande amplitude.

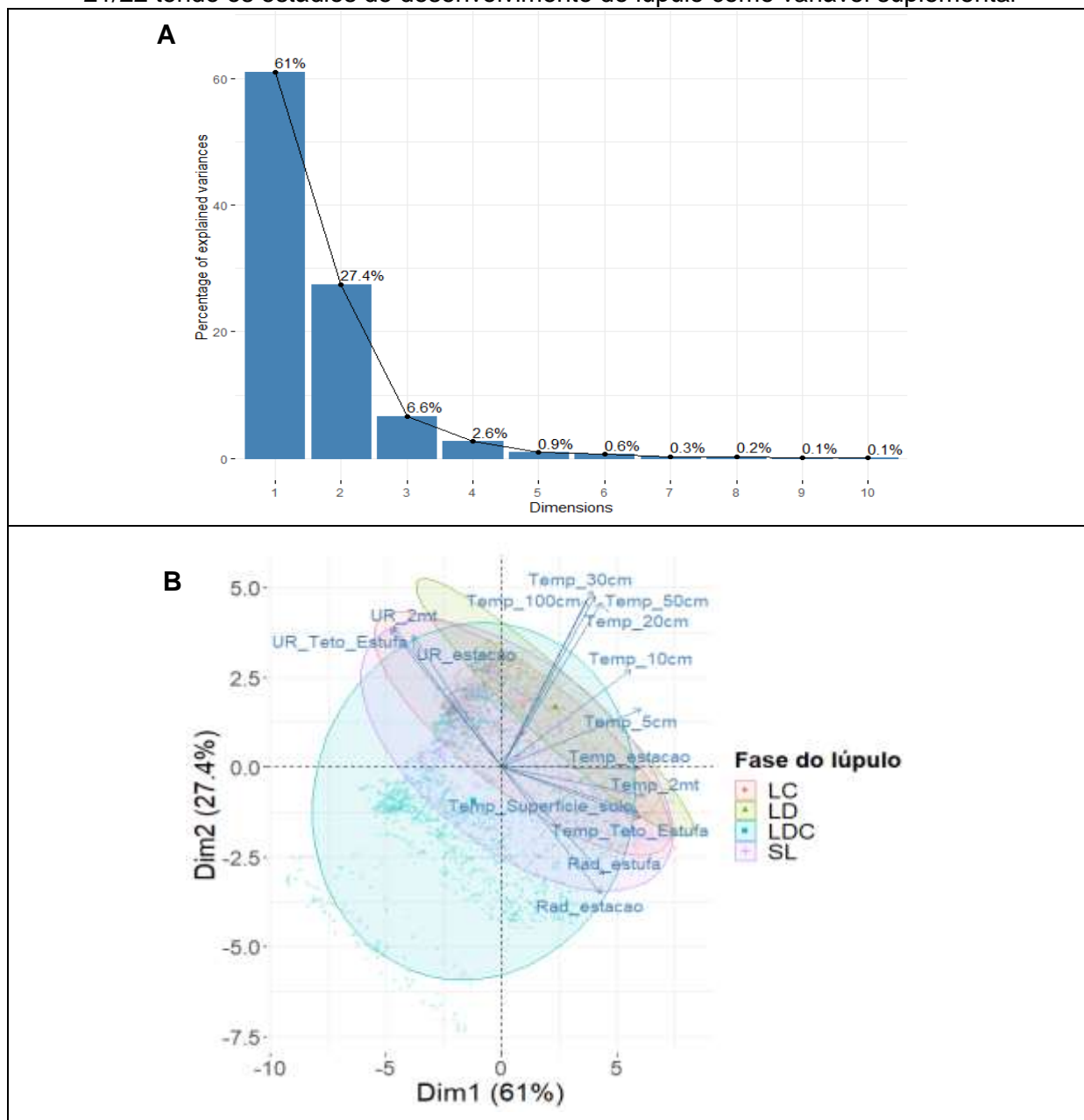
Considerando agora apenas o período da safra 21/22, a Figura 14 apresenta o gráfico *Scree plot* (Figura 14A) de cada dimensão e o *Biplot* (Figura 14B) das duas principais componentes, considerando as variáveis e os diferentes estádios de desenvolvimento do lúpulo como variáveis suplementares.

Observa-se na Figura 14B a mesma configuração de associações das variáveis observada na Figura 12 (considerando conjuntamente o período das duas safras e entressafra).

Ao observar a conformação das elipses de concentração, nota-se que o estádio SL apresenta seu centro (conhecido com centroide), mais próximo ao centro dos eixos, apresentando variações maiores nas variáveis radiação solar interna (Rad\_estufa), temperatura do ar (Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa) e umidade relativa (UR\_2mt e UR\_Teto\_Estufa); caracterizando-se tanto por apresentar horas do dia com mais umidade e menos radiação e com menores temperaturas, quanto uma situação inversa, resultando em um ponto médio próximo ao centro eixos. Os estádios LC e LD também influenciados por essas variáveis, porém com maior influência da temperatura do solo (Temp\_Superficie\_solo; Temp\_5cm, Temp\_10cm; Temp\_20cm; Temp\_30cm; Temp\_50cm; Temp\_100cm); ainda o estádio LD apresenta menor amplitude dos dados nas variáveis estudadas e o estádio LDC foi o que apresentou maior variabilidade dos dados de umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa), radiação solar e temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt;

Temp\_Teto\_Estufa) e temperatura do solo (Temp\_Superficie\_solo; Temp\_5cm, Temp\_10cm; Temp\_20cm; Temp\_30cm; Temp\_50cm; Temp\_100cm).

**Figura 14. A. Scree plot. B. Biplot e elipses de concentração (95%) no período da safra 21/22 tendo os estádios de desenvolvimento do lúpulo como variável suplementar**

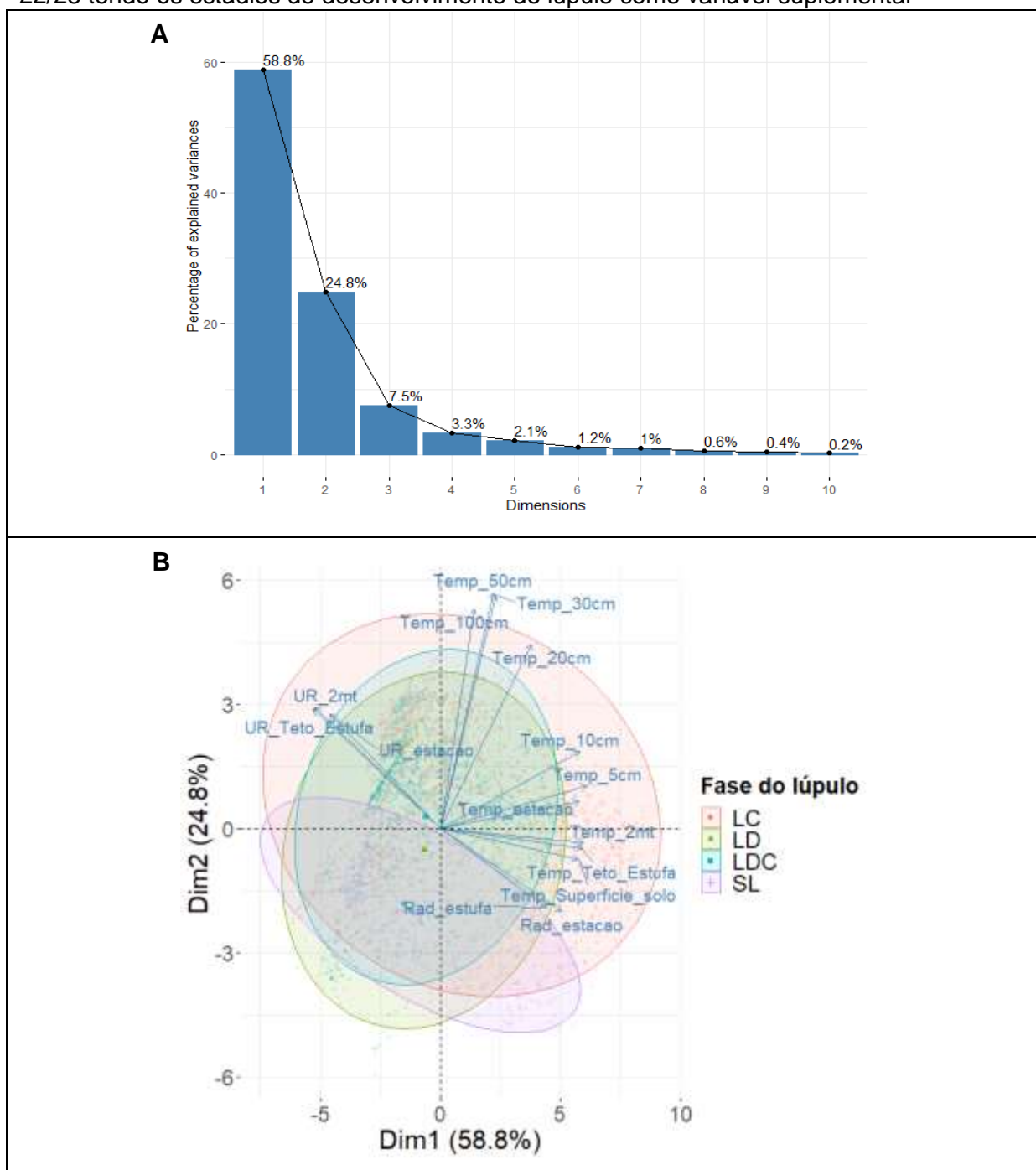


O gráfico *Scree plot* das dimensões no período da safra 22/23, considerando as variáveis e os diferentes estádios de desenvolvimento do lúpulo como variáveis suplementares, está apresentado na Figura 15A, e segue a mesma conformação das dimensões apresentadas na Figura 12. Na figura 15B está ilustrado o gráfico *Biplot*.

É possível observar comportamento bem distinto da safra 21/22; e a semelhança entre os estádios LD e LDC, apesar de os centroides estarem separados, o que denota

diferença significativa, sendo o estágio LD mais influenciado por maior radiação solar e menor umidade do ar e temperatura do solo (Temp\_Superficie\_solo; Temp\_5cm, Temp\_10cm; Temp\_20cm; Temp\_30cm; Temp\_50cm; Temp\_100cm); já o estágio LDC influenciado por maior umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa), e menores valores de radiação solar e temperatura do solo (Temp\_5cm, Temp\_10cm; Temp\_20cm; Temp\_30cm; Temp\_50cm; Temp\_100cm).

**Figura 15. A. Screeplot. e B. Biplot das elipses de concentração (95%) no período da safra 22/23 tendo os estádios de desenvolvimento do lúpulo como variável suplementar**



O estádio LC apresentou maior variabilidade dos dados com centroide próximo ao centro dos eixos com maior atuação das variáveis temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa), temperatura do solo (Temp\_Superficie\_solo; Temp\_5cm, Temp\_10cm; Temp\_20cm; Temp\_30cm; Temp\_50cm; Temp\_100cm) e umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa).

O estádio SL foi o mais distinto no período, apresentando menores valores de temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa), temperatura do solo (Temp\_Superficie\_solo; Temp\_5cm, Temp\_10cm; Temp\_20cm; Temp\_30cm; Temp\_50cm; Temp\_100cm), menores valores de umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa); as variáveis radiação solar externo e interno do ambiente protegido apresentaram grande influência nesse estádio.

Para verificar se os valores médios obtidos nas dimensões (DIM) (centroides) apresentam diferenças significativas entre os grupos formados pelas variáveis suplementares, os dados foram submetidos à análise estatística inferencial, sendo o teste *t* de Student para as partições do dia e para comparação dos dois períodos de safras; e a Análise de Variância (Anova) para os estádios de desenvolvimento do lúpulo, cujo resultados estão apresentados na Tabela 10.

Onde é possível observar que, ao comparar os horários dos períodos noturno e diurno, o escore médio da dimensão 1 (DIM1) apresenta valor de 1,27 positivo para a partição diurna, que nestes horários observa-se valores mais elevados quando se observa um contraste maior entre temperaturas do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa) e umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa), ou seja, valores de temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa) mais elevados e menores valores de umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa). E valor 1,27 negativo na partição noturna, indica horários com menores temperaturas do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa) e maior umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa).

**Tabela 10.** Scores médios e desvio padrão das duas dimensões, nos diferentes estádios do lúpulo com as partições diurna e noturna, com as diferentes estações do ano, com as safras e entressafra

		DIM1	DIM2
Período do dia	Diurno	1,27 (3,02) <sup>A</sup>	-0,82 (2,04) <sup>A</sup>
	Noturno	-1,27 (2,10) <sup>B</sup>	0,82 (1,80) <sup>B</sup>
	Teste t	p < 0,001	p < 0,001
Estações do ano	Verão 21/22	1,62 (2,55) <sup>a</sup>	1,33 (1,54) <sup>a</sup>
	Outono 22	-1,51 (2,75) <sup>c</sup>	-0,94 (1,99) <sup>c</sup>
	Inverno 22	-1,66 (2,42) <sup>c</sup>	-2,20 (1,52) <sup>d</sup>
	Primavera 22	0,82 (3,02) <sup>b</sup>	0,47 (1,73) <sup>b</sup>
	Verão 22/23	0,70 (2,04) <sup>b</sup>	1,28 (1,25) <sup>a</sup>
	Anova	p < 0,001	p < 0,001
Safras	Safra 21/22	0,86 (2,86) <sup>b</sup>	0,87 (1,82) <sup>b</sup>
	Entressafra	-1,90 (2,36) <sup>c</sup>	-1,88 (1,56) <sup>c</sup>
	Safra 22/23	1,06 (2,49) <sup>a</sup>	1,03 (1,54) <sup>a</sup>
	Anova	p < 0,001	p < 0,001

Letras diferentes entre duas médias indica diferença significativa ( $p < 0,05$ ). Letras minúsculas para Anova complementada pelo teste Tukey e letras maiúsculas para teste t.

Já a dimensão 2 (DIM2) apresenta o valor de 0,82 negativo para a partição diurna e um valor médio de 0,82 positivo para a partição noturna, uma vez que as variáveis com maior correlação a essa dimensão foram umidade do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa), e temperatura do solo (em maiores profundidades) (Temp\_20cm; Temp\_30cm; Temp\_50cm; Temp\_100cm) e radiação solar (Rad\_estacao; Rad\_estufa); sendo que o valor médio positivo para partição noturna condiz com os valores obtidos que foram maiores nessa partição indicando que no período noturno observa-se um ambiente com maior umidade relativa do ar e temperaturas do solo e baixa ou nenhuma radiação solar (Tabela 10).

Ao longo do período analisado, se observa que ocorreram anormalidades nas variáveis analisadas, o verão 21/22 apresentou o maior escore para as duas dimensões ou seja, maiores valores médios de temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa), temperatura do solo (Temp\_Superficie\_solo;

Temp\_5cm, Temp\_10cm; Temp\_20cm; Temp\_30cm; Temp\_50cm; Temp\_100cm) e radiação solar (Rad\_estacao; Rad\_estufa). No outono de 22, o escore menor comparado ao verão de 21/22, devido à diminuição dos valores médios de temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa), temperatura do solo (Temp\_Superficie\_solo; Temp\_5cm, Temp\_10cm; Temp\_20cm; Temp\_30cm; Temp\_50cm; Temp\_100cm), da radiação solar (Rad\_estacao; Rad\_estufa) e da umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa), e na sequência o inverno de 22 ainda com valores baixos das mesmas variáveis.

Já na primavera de 22 foram observados os maiores valores para as variáveis temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa), temperatura do solo (Temp\_Superficie\_solo; Temp\_5cm, Temp\_10cm; Temp\_20cm; Temp\_30cm; Temp\_50cm; Temp\_100cm), radiação solar (Rad\_estacao; Rad\_estufa) e umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa), porém o escore médio foi menor comparado verão de 21/22, devido à grande amplitude dos dados. O verão 22/23 pode ser considerado atípico, apresentando escore menor em ambas as dimensões, comparado ao verão de 21/22.

Para os períodos de safra e entressafra houve diferença significativa entre a safra de 21/22 e a safra de 22/23 em ambas as dimensões e que pode ter correlação com a diminuição da produção na safra 22/23. Ainda que os valores médios dos escores, em ambas as safras, sejam positivos, os valores médios significativamente maiores para a safra 22/23 indicam que esta safra apresentou, em média, horários com maiores temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa), maior umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa), maior temperatura do solo em profundidades maiores (Temp\_20cm; Temp\_30cm; Temp\_50cm; Temp\_100cm) e menor radiação solar (Rad\_estacao; Rad\_estufa), sendo essa situação com maior intensidade comparado à safra 21/22. Já no período relativo à safra 2021/2022 a radiação solar (Rad\_estacao; Rad\_estufa) foi relativamente maior com menores valores de umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa).

Os estádios de desenvolvimento do lúpulo foram comparados em relação aos valores médios dos escores das dimensões DIM1 e DIM2, considerando todo o período do estudo e separadamente para as safras 21/22 e 22/23. Para isso, os dados foram submetidos a Anova para o período todo; somente para a safra 21/22 e para a safra 22/23 (Tabela 11).

Durante todo o período analisado, os estádios LC e LD, em média, apresentaram o mesmo comportamento e diferente dos estádios SL e LDC na DIM1, que representa que os estádios LC e LD, apresentaram horários com valores médios de temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa) e temperatura do solo em algumas profundidades (Temp\_Superficie\_solo; Temp\_5cm, Temp\_10cm; Temp\_20cm; Temp\_30cm; Temp\_50cm; Temp\_100cm) mais elevados, seguido do estádio LDC que apresentou valores negativos indicando menores valores de temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa) e do solo em algumas profundidades (Temp\_Superficie\_solo; Temp\_5cm, Temp\_10cm).

O estádio SL apresentou os menores escores na DIM2 indicando maiores valores médios de radiação solar (Rad\_estacao; Rad\_estufa) e menores valores de umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa).

Assim como na DIM1, na DIM2 o estádio LD apresentou o maior escore, sendo indicativo de horários com maiores valores de umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa) e temperatura do solo em maiores profundidades (Temp\_20cm; Temp\_30cm; Temp\_50cm; Temp\_100cm); seguido dos estádios LC,LDC e o estádio SL que apresentou o menor escore sendo que nesse estádio o contraste entre umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa), temperatura do solo (Temp\_Superficie\_solo; Temp\_5cm, Temp\_10cm; Temp\_20cm; Temp\_30cm; Temp\_50cm; Temp\_100cm) foi mais influenciado pela radiação solar (Rad\_estacao; Rad\_estufa).

Para o período da safra 21/22, na DIM1 o estádio LD apresentou, em média, o maior escore, representando o contraste de maiores valores de temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa), temperatura do solo em algumas profundidades (Temp\_Superficie\_solo; Temp\_5cm, Temp\_10cm) e radiação solar (Rad\_estacao; Rad\_estufa) com menores valores de umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa).

**Tabela 11.** Escores médios e desvio padrão das duas dimensões nos diferentes estádios do lúpulo (período todo, safra 21/22 e safra 22/23)

Estádios	Período Todo		Safra 21/22		Safra 22/23	
	DIM1	DIM 2	DIM 1	DIM 2	DIM 1	DIM 2
LC	1,71 (2,77) <sup>a</sup>	1,14 (1,66) <sup>b</sup>	0,89 (2,62) <sup>b</sup>	0,93 (1,38) <sup>b</sup>	0,88 (3,39) <sup>a</sup>	0,56 (1,89) <sup>a</sup>
LD	1,84 (2,56) <sup>a</sup>	1,51 (1,58) <sup>a</sup>	2,29 (2,44) <sup>a</sup>	1,66 (1,46) <sup>a</sup>	-0,69 (2,41) <sup>b</sup>	-0,52 (1,75) <sup>c</sup>
LDC	-0,06 (2,47) <sup>b</sup>	0,45 (1,72) <sup>c</sup>	-1,21 (2,86) <sup>c</sup>	-0,95 (2,03) <sup>d</sup>	-0,60 (2,24) <sup>b</sup>	0,28 (1,65) <sup>b</sup>
SL	-0,92 (2,79) <sup>c</sup>	-0,94 (2,13) <sup>d</sup>	0,66 (2,74) <sup>b</sup>	0,32 (1,54) <sup>c</sup>	-0,84 (2,72) <sup>b</sup>	-2,09 (1,16) <sup>d</sup>
Anova	p < 0,001	p < 0,001	p < 0,001	p < 0,001	p < 0,001	p < 0,001

Letras diferentes entre duas médias indica diferença significativa para Anova complementada pelo teste Tukey ( $p < 0,05$ ).

Os estádios SL e LC não apresentaram diferenças significativas entre si, e os valores, representam as maiores temperaturas do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa) e temperatura do solo (Temp\_Superficie\_solo; Temp\_5cm, Temp\_10cm; Temp\_20cm; Temp\_30cm; Temp\_50cm; Temp\_100cm) em algumas profundidades em contraste com a umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa) e radiação solar (Rad\_estacao; Rad\_estufa). O menor escore foi apresentado no estádio LDC, representando os menores valores médios de temperaturas do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa) e temperatura do solo (Temp\_Superficie\_solo; Temp\_5cm, Temp\_10cm; Temp\_20cm; Temp\_30cm; Temp\_50cm; Temp\_100cm) registrados no período. Na DIM2, todos os estádios apresentaram diferença significativa entre si, sendo o maior escore do estádio LD, seguido dos estádios LC, SL e LDC que apresentou o menor escore, evidenciando a influência da umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa) nessa dimensão, o maior escore no estádio LD que apresentou maiores valores de temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa) e temperatura do solo (Temp\_Superficie\_solo; Temp\_5cm, Temp\_10cm; Temp\_20cm; Temp\_30cm; Temp\_50cm; Temp\_100cm), em contraste com os menores valores de umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa).

Já no estádio LDC o escore negativo evidencia o registro de menores temperaturas do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa) do período, menores valores de temperatura do solo (Temp\_Superficie\_solo; Temp\_5cm, Temp\_10cm; Temp\_20cm; Temp\_30cm; Temp\_50cm; Temp\_100cm) e pequena redução nos valores de radiação solar (Rad\_estacao; Rad\_estufa).

No período da safra 22/23, na DIM1 os valores de escore médio foram muito parecidos, sendo diferente significativamente para o estádio LC, único estádio a apresentar valores positivos, representando os maiores valores médios de temperatura do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa) e temperatura do solo (Temp\_Superficie\_solo; Temp\_5cm, Temp\_10cm; Temp\_20cm; Temp\_30cm; Temp\_50cm; Temp\_100cm) do período e os menores valores médios de umidade do ar; para os demais estádios as temperaturas do ar (Temp\_estacao; Temp\_2mt; Temp\_Teto\_Estufa) e temperatura do solo (Temp\_Superficie\_solo; Temp\_5cm, Temp\_10cm; Temp\_20cm; Temp\_30cm; Temp\_50cm; Temp\_100cm) obtiveram valores mais baixos com elevados valores de umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa). Na DIM2 todos os estádios apresentaram diferença

significativa, sendo positivo para os estádios LC e LDC e negativo para os estádios LD e SL, este último o que apresentou o menor escore médio, em função dos maiores valores de radiação dentro do ambiente protegido (Rad\_estufa) e menores valores de umidade relativa do ar (UR\_estacao; UR\_2mt; UR\_Teto\_Estufa).

Os diferentes estádios de desenvolvimento do lúpulo apresentaram características específicas nas safras 21/22 e 22/23 e responderam de maneiras diferentes às condições meteorológicas, principalmente os estádios LDC e SL. O contraste entre umidade e radiação foi mais elevado no estádio LD na safra 21/22 e no estádio LC na safra 22/23. Da mesma forma, na safra 21/22 o estádio LD apresentou maiores temperaturas do ar e o estádio LC na safra 22/23.

## 1.5 CONCLUSÕES

As diferenças médias entre estádios e safras observadas em ambiente protegido não apresentou as mesmas características observadas nas variáveis fora deste, indicando que o microclima sofreu influência da presença da cultura.

A PCA auxiliou no entendimento da dinâmica das associações das variáveis, como elas se comportam nos diferentes estádios, safras e estações analisados; e que as variáveis mais influenciaram foram a temperatura do ar (independente se a 2m ou próximo ao teto da estrutura), a temperatura do solo mais superficial e o contraste de umidade relativa do ar e radiação solar.

A PCA permitiu concluir que baseado nas dimensões geradas, as variáveis temperatura do ar, temperatura do solo nas camadas superficiais, umidade relativa do ar e radiação solar apresentam grande correlação com os estádios de desenvolvimento da cultura do lúpulo.

Destaca-se que as variáveis agrometeorológicas analisadas influenciam a produtividade de lúpulo. A compreensão dessas diferenças pode ajudar a otimizar as práticas de cultivo e manejo ambiental, ajustando as condições meteorológicas para maximizar o crescimento e a qualidade do lúpulo em cada estádio de seu desenvolvimento.

Alterar época de poda para que o estádio LDC não coincida com períodos de elevados valores de temperatura do ar e umidade relativa do ar, pode contribuir para aumento de produtividade, neste trabalho, caso a safra de verão fosse podada antes de outubro de 2022 poderia ter produzido mais.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, F. C. **Influência da rega na produtividade e na qualidade da produção do lúpulo (*Humulus lupulus* L.), variedade Nugget, na região da Galiza**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrônômica) – Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2018.
- ANDRIOLLO, J. L. Fisiologia da produção de hortaliças em ambiente protegido. **Horticultura Brasileira**, v.18, n.1, p.26-33, 2000.
- ANGELOCCI, L. R. **Água na planta e trocas gasosas/energéticas com a atmosfera: Introdução ao tratamento biofísico**. 1.ed. Piracicaba: Autor, 2002. 272p.
- BABOEV, S. K.; BURANOV, A. K.; BOZOROV, T. A.; ADYLOV, B. S. H.; MORGUNOV, A. I.; MUMINZHONOV, K. H. Biological and agronomical assessment of wheat landraces cultivated in mountain areas of Uzbekistan. *Agricultural Biology*, Moscou v. 52, n. 3, p. 553-560, 2017.
- BARTELS, D.; SUNKAR, R. Drought and salt tolerance in plants. **Critical Reviews in Plant Sciences**, Boca Raton, v. 24, n. 1, p. 23-58, 2005.
- BAUERLE, W. L. Disentangling photoperiod from hop vernalization and dormancy for global production and speed breeding. **Scientific Reports**, v. 9, n.1, p. 1-8, 2019.
- BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J. I. **As plantas e o clima: principio e aplicações**. Guaíba: Agrolivros, 2017, 352 p.
- BERNERT, A. F. **Diversidade genética de acessos via ISSR e identificação do sexo de “seedlings” de lúpulo**. 2018. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.
- BLEIHOLDER H., KIRFEL H., LANGELÜDDEKE P., STAUSS R. Codificação unificada dos estádios fenológicos de culturas e ervas daninhas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 26, 1423–1429. 1991.
- BOCQUET, L. et al. *Humulus lupulus* L., a very popular beer ingredient and medicinal plant: overview of its phytochemistry, its bioactivity, and its biotechnology. **Phytochemistry Reviews**, [s.l.], v. 17, n. 5, p. 1.047-1.090, jul. 2018. Springer Nature America, Inc. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11101-018-9584-y>.
- BODSON, M.; OUTLAW JR., W. Elevation in sucrose content of the shoot apical meristema of *sinapis alba* at floral evocation. **Plant Physiology**, Maryland, v. 79, n. 2, p. 20 - 24, 1985.
- CARDOSO, M. D., TAVELLA, L. B., REINEHR, J. Climatic requirements for hop (*Humulus lupulus* L.) cultivation in Brazil. **Ciência Rural**, 49(4), e20181039. 2019.
- DA SILVA, P. H. A.; FARIA F. C. Avaliação da intensidade de amargor e do seu princípio ativo em cervejas de diferentes características e marcas comerciais. Bitterness Units and iso alfa-acids contents of some brands of Brazilian and North American beers. **Ciência e tecnologia de alimentos**, Campinas, Brasil. p. 902-906, outubro/dezembro, 2008.
- DAL PAI, E. **Radiações e frações solares UV, PAR, IV em estufa de polietileno: evolução anual média mensal diária e equações de estimativa**. 2010. 69 f. Dissertação (Mestrado) Universidade Estadual Paulista (UNESP) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, SP, 2010.

DODDS, K. **Hops a guide for new growers**. Department of primary industries, Australian Government, 2017. Disponível em: <<http://www.dpi.nsw.gov.au>. Acesso em: 03 jul. 2023.

DURELLO, R. S.; SILVA, L. M.; BOGUSZ JÚNIOR, S. Química do lúpulo. **Química Nova**, São Paulo, SP, v. 42, n.8, p. 900-919, 2019.

FAGHERAZZI, M. M. **Adaptabilidade de cultivares de lúpulo na região do Planalto Sul Catarinenese**. 2020. 116f. Tese (doutorado - Produção Vegetal) Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias. Lages. 2020.

FARAG, M. A.; WESSJOHANN, L. A. Cytotoxic effect of commercial *Humulus lupulus* L. (hop) preparations: In comparison to its metabolomic fingerprint. Cairo: **Journal of Advanced Research**, 2012.

FORTUNA, G. C.; **Desempenho agrônomo e fitoquímico de variedades de lúpulo produzidas em condições tropicais sob manejo orgânico e convencional**. 2021. Dissertação (mestrado) Universidade Estadual Paulista (UNESP) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Botucatu, SP. 2021.

FREITAS, C. F. **Banco do Brasil abre linha de crédito de R\$ 600 milhões para cultivo de lúpulo no estado do Rio**. 2019. Disponível em: <https://catalisi.com.br/banco-do-brasil-abre-linha-de-credito-de-r-600-milhoes-para-cultivo-de-lupulo-no-estado-do-rio/>. Acesso em 21 jul. 2023.

FRIZZONE, J. A.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; SOUZA, J. L. M. Planejamento de irrigação: análise e decisão de investimento. Brasília, DF: **Embrapa Informação Tecnológica**; Embrapa Meio Norte, p. 283-314, 2005.

FURLAN, R. A.; FOLEGATTI, M. V.. Distribuição vertical e horizontal de temperaturas do ar em ambientes protegidos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 6(jan/abr.), p.93-100. <http://dx.doi.org/doi:10.1590/S1415-43662002000100017>. 2002

GARGANI, E. *et al.* A survey on pests and diseases of Italian Hop crops. Review n. 32. **Italus Hortus**, v. 24, n. 2, p. 1-17, 2017: 1-17.

GEBERT, D. M. P.; KIST, A.; VIRGENS FILHO, J. S. das. DETERMINAÇÃO DE REGIÕES HOMOGÊNEAS DE PRECIPITAÇÃO PLUVIOMÉTRICA NO ESTADO DO PARANÁ POR MEIO DE TÉCNICAS DE ANÁLISE MULTIVARIADA E GEOESTATÍSTICA. **Revista Brasileira de Climatologia**, [S. I.], v. 23, 2021. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v23i0.60406>.

GETTY, B. A. **Induced mutation for improving cascade and centennial hop**. 2019. Dissertation (Master of Science in Crop Science) – Oregon State University, Oregon, 2019.

GONSAGA, R. F. **Desenvolvimento de híbridos de lúpulo adaptados às condições tropicais**. 2021. 113 f. Tese (Doutorado) - Curso de Agronomia, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Jaboticabal, 2021.

GUIMARÃES, J. de J. **Comportamento agrônomo do lúpulo (*Humulus lupulus* L.) em cultivo protegido submetido a irrigações com diferentes faixas de pH da água na região de Botucatu-SP**. Dissertação (mestrado) Universidade Estadual Paulista (UNESP) – Faculdade de Ciências Agrônomicas – Botucatu, SP, p.105, 2020.

GUIMARÃES, B. P.; EVARISTO, R. B. W.; GHESTI, G. F. Prospecção Tecnológica do Lúpulo (*Humulus lupulus* L.) e suas Aplicações com Ênfase no Mercado Cervejeiro

- Brasileiro. **Cadernos de Prospecção**, [S. l.], v. 14, n. 3, p. 858, 2021. <http://dx.doi.org/10.9771/cp.v14i3.33059>. Disponível em: <https://periodicos.ufba.br/index.php/nit/article/view/33059>. Acesso em: 21 jul. 2023.
- HAIR, J. F. et al. **Análise Multivariada de Dados**. 6. ed. Dados eletrônicos. Porto Alegre: Bookman, 2009.
- HOWELL, T. A.; EVETT S. R. **The Penman-Monteith method**. Washington, DC: USDA-Agricultural Research Service, Conservation & Production Research Laboratory, 2004. 14 p.
- IHGC – INTERNATIONAL HOP GROWERS' CONVENTION. (França). Economic Commission: Summary Reports. Paris: **International Hop Growers' Convention**, 2018. 55p. Disponível em: <http://www.hmelj-giz.si/ihgc/doc/2018%20MAY%20IHGC%20EC%20Reports.pdf>. Acesso em: 21 jul. 2023.
- IODICE D'ENZA, A.; MARKOS, A.; PALUMBO, F. Chunk-wise regularised PCA-based imputation of missing data. **Statistical Methods & Applications**, v. 31, n. 2, p. 365-386, 2022.
- JOSSE, J.; PAGÈS, J.; HUSSON, F. Multiple imputation in principal component analysis. **Advances in Data Analysis and Classification**, v. 5, n. 3, p. 231–246, 1 out. 2011.
- KNEEN, R. **Small scale and organic hops production**. Kneen, Left Fields, British Columbia. 2003. Disponível em: <http://www.crannogales.com/hopsmanual.html>. Acesso em: 05 jan 2024.
- KUNZE, W.; **Tecnología Para Cerveceros y Malteros**. Primeira edição, 2006.
- LENZ, L. C.; DAL PAI, E.; ESCOBEDO, J. F.; DAL PAI, A. saldo de radiação em estufa de polietileno. **Revista Brasileira De Climatologia**, v.29, p.49–77. 2021. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/rbclima/article/view/15182>. Acesso em: 07 jul. 2024.
- LOISEL, S.; TAKANE, Y. Comparisons among several methods for handling missing data in principal component analysis (PCA). **Advances in Data Analysis and Classification**, v. 13, p.495-518. 2019.
- MACEDO, V. H. M. *et al.* Agrometeorological and Agronomic Characterization of Megathyrus Grasses Cultivated in Tropical Humid and Semi-Arid Conditions: a multivariate approach. **Frontiers In Plant Science**, [S.L.], v. 13, n. 1, p. 1-14, 25 fev. 2022. Frontiers Media SA. <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2022.809377>. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2022.809377>. Acesso em: 21 jul. 2023.
- MALLER *et al.* Fertigation os zucchini in greenhouse environments. **Waters Resources and Irrigation Management**, v.2, n.3, p.143-148, 2013.
- MARCUSSO, Eduardo Fernandes; MÜLLER, Carlos Vitor. A Economia e o Território do Lúpulo: a história, análise mercadológica e o desenvolvimento do lúpulo no Brasil e no mundo. **Revista Latino-Americana da Cerveja**, Blumenau, v. 2, n. 2, p. 1-20, 2019. Faculdade Épica.
- McADAM *et al.*, 2014, **Quantitative genetic parameters for yield, plant growth and cone chemical traits in hop (*Humulus lupulus* L.)**. Disponível em: <http://www.biomedcentral.com/1471-2156/15/22>. Acesso em 19/09/2019.

MONTEIRO, José Eduardo B. A.(org.). **Agrometeorologia dos cultivos**: o fator meteorológico na produção agrícola. Brasília: Inmet, 2009. 530 p.

MOZNY, M.; TOLASZ, R.; NEKOVAR, J.; SPARKS, T.; TRNKA, M.; ZALUD, Z. The impact of climate change on the yield and quality of Saaz hops in the Czech Republic. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, n. 6-7, p. 913–919, 2009.

NAVA, K. G. **ASPECTOS AGRONÔMICOS EM RESPOSTA À ADUBAÇÃO ORGÂNICA E CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA DE CONES DE LÚPULO (*Humulus lupulus*) PRODUZIDO NO SUL DO BRASIL**. 2023. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências Agrárias, Agroecossistemas, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Dois Vizinhos, 2023.

NAKAWUKA, P.; PETERS, T. R.; KENNY, S.; WALSH, D. Effect of deficit irrigation on yield quantity and quality, water productivity and economic returns of four cultivars of hops in the Yakima Valley, Washington State. **Industrial Crops and Products**, v. 98, p. 82-92, 2017.

NOGAROTTO, D. C.; DE LIMA, M. R. G.; POZZA, S. A.. ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS PARA VERIFICAR RELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS E A CONCENTRAÇÃO DE MP10. **HOLOS**, [S. l.], v. 1, p. 1–17, 2020. <http://dx.doi.org/10.15628/holos.2020.8649>.

NUNES, N. A. S.; LEITE, A. V.; CASTRO, C. C. Phenology, reproductive biology and growing degree days of the grapevine ‘Isabel’ (*Vitis labrusca*, Vitaceae) cultivated in northeastern Brazil. **Brazilian Journal of Biology**, v. 76, n. 4, p. 975–982, out. 2016.

OLIVEIRA, G. M. de et al. ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA PARA AMBIENTE PROTEGIDO. **IRRIGA**, [S. l.], v. 1, n. 1, p. 21–30, 2017. <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2017v1n1p21-30>. Disponível em: <https://actaarborea.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/2799>. Acesso em: 25 jul. 2023.

PEARSON, B. J.; SMITH, R. M.; CHEN, J. Growth, strobile yield, and quality of four *Humulus lupulus* varieties cultivated in a protected open-sided greenhouse structure. **HortScience**, v. 51, n. 7, p. 838-842, 2016.

PEDRO-JÚNIOR, M.J.; SENTELHAS, P.C. Clima e produção. In: C.V. POMMER, ed. **Uva**: tecnologia de produção, pós-colheita, mercado. Porto Alegre: Cinco Continentes, p. 63-107. 2003.

PEZZOPANE, J. E. M.; PEDRO JÚNIOR, M. J.; ORTOLANI, A. A. Modificações microclimáticas provocadas por estufas com cobertura plástica. **Bragantia**, v.54, n.2, p.419-425, 1995.

PRADO, B. Q. DE M. *et al.* Avaliação de variáveis climatológicas da cidade de Uberlândia (MG) por meio da análise de componentes principais. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 21, n. 2, p. 407–413, abr. 2016. DOI:10.1590/S1413-41522016147040

PURQUERIO, L. F. V.; GOTO, R. Dose de nitrogênio em cobertura via fertirrigação e espaçamento entre plantas sobre a cultura da rúcula, em campo e ambiente protegido. In: Congresso Ibérico de Ciências Hortícolas, 5, e Congresso Iberoamericano de Ciências Hortícolas, 4, 2005, Porto. **Anais ...** Porto: Actas Portuguesas de Horticultura, 2005. p.336-341.

R Core Team. **R: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2022 Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>.

RADTKE, V.M. et al. **Zoneamento Agroecológico e Socioeconômico de Santa Catarina**. Florianópolis : Epagri, 1999.

RAJAPAKSE, N.C.; YOUNG, R. E.; MCMAHON, M.J.; Oi, R. Plant height control by photoselective filters: current status and future prospects. **HortTechnology**, Alexandria, v.9, n.4, p.618-624, 1999.

REBOUÇAS, P. M. *et al.* Radiação solar e temperatura do ar em ambiente protegido. **Revista Agrogeoambiental**, [S. l.], v. 7, n. 2, 2014. DOI: 10.18406/2316-1817v7n22015610. Disponível em: <https://agrogeoambiental.ifsuldeminas.edu.br/index.php/Agrogeoambiental/article/view/610>. Acesso em: 20 jul. 2023.

RODRIGUES, M. A.; MORAIS, J. S.; CASTRO, J. P. M. **Jornada de lúpulo e cerveja: novas oportunidades de negócios**. Bragança: Livro de Atas. 2015

ROMANINI, C. E. B. *et al.* Desenvolvimento e simulação de um sistema avançado de controle ambiental em cultivo protegido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.L.], v. 14, n. 11, p. 1194-1201, nov. 2010. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1415-43662010001100009>.

ROSSINI, F.; LORETI, P.; PROVENZANO, M. E.; SANTIS, D.; RUGGERI, R. Agronomic performance and beer quality assessment of twenty hop cultivars grown in Central Italy. **Italian Journal of Agronomy**, v. 11, n. 746, p. 180-187, 2016.

SANTOS, E. F. N.; BARRETO, I. D. de C.; BARBOSA, E. A. S. ; CAMPOS, L. .; SILVA, A. S. A. da . Contribution of multivariate techniques to drought rates in understanding the otto-regions of the São Francisco basin. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 10, n. 3, p. e7210313118, 2021. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i3.13118>.

SANTOS, O. O. *et al.* Desempenho ecofisiológico de milho, sorgo e braquiária sob déficit hídrico e reidratação. **Bragantia**, Campinas, v. 73, n. 2, p. 203-212, 2014.

SANTOS, L. L.; JUNIOR, S. S.; NUNES, M. C. M. Luminosidade, temperatura do ar e do solo em ambientes de cultivo protegido. **Revista de Ciências AgroAmbientais**, Alta Floresta, MT, v.8, n.1, p.83-93, 2010.

SEEMANN, J. Greenhouse Climate. In: SEEMANN, J. et al. **Agrometeorology**. New York: Springer-verlag, 1979. cap. 10. p. 165-178.

SILVA, E. T.; BYLLARDT, L. V. B.; GOMES, S.; WOLF, G. D. Comportamento da temperatura do ar sob condições de cultivo em ambiente protegido. **Ciências agrárias e ambientais**, Curitiba, PR, v. 1, n. 1, p. 51-54, 2003.

SILVA, H. R. **Estudo do efeito de novas técnicas de lupulização no tempo de prateleira da cerveja artesanal**. 2015. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Biológica) – Universidade de Minho, Minho, 2015.

SILVA, M. B. P. da; SOUZA, V. C. de .; CREMASCO, C. P. .; CALÇA, M. V. C.; SANTOS, C. M. dos; CREMASCO, C. P.; GABRIEL FILHO , L. R. A.; RODRIGUES, S. A.; ESCOBEDO, J. F. Estimated reference evapotranspiration of the Paulista Plateau through multiple regressions with missing data estimated via main component analysis. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 11, n. 8, p. e43211831120, 2022. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i8.31120>.

SONSTEBY, A.; HEIDE, O.M., 2017. Flowering performance and yield of established and recent strawberry cultivars (*Fragaria x ananassa*) as affected by raising temperature and photoperiod. **J. Hortic. Sci. Biotech.** v. 92, p. 367–375, 2017.

SOUSA, F. G. G.de. **Determinação de evapotranspiração da cultura e coeficiente de cultivo do lúpulo em diferentes texturas de solo.** 2021. 103 f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, SP. 2021.

SOUSA, R. L. de. **Saldo de radiação no cultivo do lúpulo em ambiente protegido.** 2021. 54 f. Tese (Doutorado) - Curso de Agronomia, Irrigação e Drenagem, Universidade Estadual Paulista - Unesp/Fca, Botucatu, 2021.

STEIDLE NETO, A. J. *et al.* A. Razão entre radiação fotossinteticamente ativa e radiação global no cultivo do tomateiro em casa-de-vegetação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, n.6, p.626-631, 2008.

SPÓSITO, M. B *et al.* A cultura do lúpulo. Piracicaba, SP: Esalq - Divisão de Biblioteca, 2019. 81 p. (**Série Produtor Rural**, 68).

TAIZ L. *et al.* **Fisiologia vegetal.** 6 ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

TIBULO, C.; ZANINI, R. R.; FERRAZ, S. E. T.; BOIASKI, N. T.; TIBULO, V. de C. A RELAÇÃO ENTRE A POLUIÇÃO DO AR E AS PRINCIPAIS VARIÁVEIS CLIMATOLÓGICAS NO MUNICÍPIO DE CANOAS-RS. **Revista Brasileira de Climatologia**, [S. l.], v. 26, 2021. <http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v26i0.65560>.

TIERNEY, N.; COOK, D. Expanding Tidy Data Principles to Facilitate Missing Data Exploration, Visualization and Assessment of Imputations. **Journal of Statistical Software**, [S. l.], v. 105, n. 7, p. 1–31, 2023. DOI: 10.18637/jss.v105.i07. Disponível em: <https://www.jstatsoft.org/index.php/jss/article/view/v105i07>. Acesso em: 06 ago. 2023.

VAN BUUREN, S.; GROOTHUIS-OUDSHOORN, K. *mice*: Multivariate imputation by chained equations in R. **Journal of statistical software**, v. 45, p. 1-67, 2011.

VIALI, L. **Série estatística multivariada: texto I.** Porto Alegre: PUC-RS, 2015.

VICINI, L. *et al.* Técnicas multivariadas exploratórias: teorias e aplicações no software estatística. **Santa Maria**: UFSM, 2018.

VIOL, M. A. *et al.* Déficit hídrico e produção de tomate cultivado em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.11, p.1244-1253, 2017.

## CAPÍTULO 2

### EXIGÊNCIA TÉRMICA DA CULTURA DO LÚPULO (*Humulus lupulus L.*): UMA REVISÃO E ESTUDO DE CASO NO CENTRO SUL PAULISTA

#### 2.1 INTRODUÇÃO

O lúpulo é uma planta cultivada tradicionalmente na Europa e América do Norte, mas mostrou-se adaptativa aos ambientes de produções brasileiros. Essa adaptação ao novo ambiente agrícola denota o potencial da cultura às condições edafoclimáticas brasileiras e deve ser melhor compreendida e detalhada afim de aprimorar o manejo da cultura para maximizar a produtividade.

Há muito que a quantificação térmica é estudada, visando compreender sua influência no desenvolvimento das culturas agrícolas, com objetivo de otimizar a produção e aumentar a eficácia dos manejos. Para tanto o conceito de exigência térmica, que quantifica, em graus-dia, o acúmulo de unidades térmicas ao longo do tempo em uma determinada região, é tido como uma ferramenta efetiva para o manejo das culturas. Essa métrica é baseada na ideia de que o crescimento dos indivíduos está diretamente relacionado à temperatura e necessitam de uma quantidade de unidades térmicas acumulada específica para atingirem estádios de desenvolvimento e completarem seu ciclo. As culturas têm requisitos térmicos específicos para atingir estádios de desenvolvimento chave, fornecendo informações sobre o impacto da temperatura no crescimento das plantas, permitindo prever eventos fenológicos e implementar estratégias de cultivo mais eficientes.

Um componente fundamental relacionado ao conceito de graus-dia é a temperatura basal, que representa os limiares mínimo e máximo para a atividade biológica dos seres. A temperatura basal é um indicador-chave, influenciando a germinação de sementes, o desenvolvimento de brotos, surgimento de flores e a maturação de frutos. A temperatura basal inferior é o ponto de base, abaixo do qual, o desenvolvimento de uma planta é interrompido. Cada espécie tem sua própria temperatura basal inferior, que pode variar dependendo do estágio de desenvolvimento. A temperatura basal superior é o limite máximo de temperatura em que uma planta pode se desenvolver. Acima desse ponto, o desenvolvimento pode ser interrompido ou afetado negativamente, e a planta pode sofrer estresse térmico.

Em casos extremos, temperaturas muito altas podem ser letais para as plantas.

A compreensão dessa relação térmica permite otimizar o manejo, adaptando às necessidades específicas de cada cultura para a região onde está sendo cultivada. Diversos métodos foram desenvolvidos para calcular o acúmulo de graus-dia, baseados nas temperaturas basais superior e inferior e na temperatura do ar.

Nesse sentido, levando em consideração o fator temperatura como um elemento chave na equação do crescimento vegetal, explorar a interação graus-dia com outras variáveis agrometeorológicas permitirá otimizar as estratégias de manejo em função das condições agrometeorológicas específicas do local de cultivo, contribuindo para a adaptação às variações climáticas sazonais bem como para a eficiência do manejo de culturas e para a implementação de práticas sustentáveis.

Pesquisas sobre graus-dias e temperatura basal da cultura do lúpulo são fundamentadas na literatura estrangeira, porém no Brasil ainda são poucos estudos sobre o assunto. Diante desse cenário, a revisão sistemática sobre este assunto pode evidenciar algumas informações importantes já estudadas e direcionar de forma precisa novos estudos.

A revisão sistemática é uma abordagem metodológica com intuito de sintetizar e analisar de forma rigorosa as evidências disponíveis sobre um determinado tema. Seguindo protocolos criteriosos para seleção e avaliação dos estudos relevantes, esse tipo de estudo garante a objetividade na análise. A revisão fornece uma visão abrangente e imparcial sobre o tema estudado, permitindo identificar lacunas e padrões emergentes em estudos individuais, sendo importante ferramenta para orientar futuras pesquisas.

Neste contexto, o objetivo deste estudo foi revisar os métodos de quantificação de graus dias e realizar um estudo de caso para verificar o acúmulo de calor na forma de graus-dias no cultivo de lúpulo em ambiente protegido de um município do centro sul do estado de São Paulo, durante os anos de 2022 e 2023. Desta forma, agregado a ao levantamento sistemático da literatura sobre o graus-dias para a cultura do lúpulo, pretende-se inferir sobre a influência da variável agrometeorológica temperatura do ar nos diferentes estádios de desenvolvimento da cultura.

## 2.2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.2.1 Exigência térmica

A temperatura do ar é fator de grande impacto sobre o desenvolvimento das culturas, atuando sobre a regulação de reações fotoquímicas e bioquímicas da fotossíntese, promovendo alterações metabólicas e fenológicas que afetam diretamente a produtividade e qualidade do produto final (Martins *et al.*, 2019; Taiz *et al.*, 2017).

Em condições meteorológicas diferenciadas, as variedades de lúpulo apresentam comportamento distinto em relação às regiões de produção tradicionais, em clima temperado; como as taxas de crescimento, a possibilidade de mais de um ciclo reprodutivo ao longo do ano e a ausência de dormência são algumas das alterações verificadas em clima tropical (Dodds, 2017; Spósito *et al.*, 2019; Acosta-Rangel *et al.*, 2021; Jastrombek *et al.*, 2022).

A exigência térmica expressa a quantidade de energia que uma cultura precisa para completar satisfatoriamente seu ciclo de produção e é dada pela diferença acumulada entre a temperatura média do ar e a temperatura basal (Pedro Júnior; Sentelhas, 2003). Esse parâmetro é amplamente utilizado em diversas culturas em função da facilidade de aplicação e confiabilidade do método e é chamado de graus-dias (GD).

Quando dados fenológicos e climáticos são combinados, é possível compreender a relação entre a duração das diferentes fases de desenvolvimento da planta e variações sazonais, bem como cada espécie interage com diferentes regiões climáticas (Trentin *et al.*, 2013).

Modelos agrometeorológicos utilizados para estimar o crescimento e produtividade das culturas, necessitam de dados provenientes de estudos sobre a exigência térmica de uma cultura e sua adaptação às condições climáticas de uma determinada região (Trentin *et al.*, 2013) e são fundamentais para compreender e definir melhor a fenologia da cultura (Renato *et al.*, 2013).

Srečec *et al.* (2008), afirma que o acúmulo térmico exigido pela cultura do lúpulo, desde o início da fase vegetativa até a maturidade fenológica está na faixa de 2400 a 2500 GD, para zonas de clima temperado.

### 2.2.2 Temperatura basal inferior e superior

É essencial analisar como a planta responde aos elementos meteorológicos, a fim de identificar os parâmetros agrometeorológicos específicos da cultura. Dentre esses

parâmetros, destaca-se a temperatura do ar, que exerce uma influência significativa no crescimento e desenvolvimento da planta. Nesse contexto, é fundamental determinar as temperaturas cardeais da cultura, também designadas como temperaturas basais (Muttoni *et al.*, 2017; Ferreira *et al.*, 2019; Silva *et al.*, 2020).

A temperatura basal é um importante fator a ser estudado para espécies potencialmente promissoras, como é o caso do lúpulo, afim de conhecer a adaptabilidade de cultivo fora do seu centro de origem (Leite; Pandolfo, 2022).

As temperaturas basais inferiores (Tb) da cultura do lúpulo são citadas por diversos autores e assumem diferentes valores, visto que, na maioria das vezes é determinada por métodos estatísticos, entre eles desvio padrão em dias e graus-dia; coeficiente de variação em dias e graus-dia; o coeficiente de regressão e o menor quadrado médio do erro com base em dados de observações fenológicas e de temperatura média do ar (Andrade, 2004; Arnold, 1959; Lago *et al.*, 2009; Lozada e Angelocci, 1999; Sinclair *et al.*, 2004; Yang *et al.*, 1995) ou através de experimentação em câmaras de desenvolvimento.

Trabalhando com a cultura do lúpulo da variedade Aurora, na Croácia, Srećec *et al.* (2008) admitiram a Tb de 5°C; já Barreto; Pilau (2023), trabalhando com lúpulo variedade Cascade, na cidade de Piracicaba/SP, encontraram valores de 5,2°C e 5,8°C para Tb; Spósito *et al.* (2019) citam a Tb de 6°C; e Darby (2017) cita a Tb de 10°C para o lúpulo nos Estados Unidos da América. Rybacek (1991), sobre os trabalhos com lúpulo na Holanda, cita que a temperatura basal superior (TB) para o lúpulo é de 35°C; Eriksen *et al.* (2020), ao estudarem a variedade Cascade nos Estados Unidos da América, citam a TB de 39°C para a cultura.

### 2.3 MATERIAL E MÉTODOS

Este trabalho foi composto por duas etapas principais, sendo que a primeira etapa envolveu uma revisão sistemática sobre o cultivo de lúpulo e a quantificação de graus-dias, em trabalhos publicados nos últimos 10 (dez) anos, afim de explorar o conhecimento existente. A segunda etapa consistiu em um estudo de caso que avaliou o acúmulo térmico em graus-dias na cultura de lúpulo em ambiente protegido nas condições específicas de Botucatu/SP.

### 2.3.1 Revisão sistemática sobre cultivo de lúpulo e graus-dias

Dentre as etapas da revisão sistemática, tem-se: i) a formulação da pergunta de pesquisa; ii) Protocolo, que inclui os critérios de seleção e avaliação dos estudos; iii) Interpretação dos dados.

A pergunta-chave dessa revisão foi “Quais os possíveis efeitos do acúmulo de graus-dias nos diferentes estádios de desenvolvimento do lúpulo cultivado em ambiente protegido?”, visto que a revisão sistemática sobre este tema pode ajudar a entender como o acúmulo de graus-dias influencia o crescimento, a produção e a qualidade do lúpulo em diferentes condições climáticas e locais de cultivo, possibilitando melhorar o manejo da cultura, indicando o momento ideal para realização de práticas agrônômicas, especialmente a colheita.

A busca ocorreu em diversas plataformas de banco de dados digitais, como plataforma CAPES; *Researchgate*; Scielo, e Elsevier, inserindo palavras-chave relevantes para a pesquisa, como "lúpulo"; “Humulus”; “ambiente protegido”; “*protected environment*” e “graus-dias”; “*growing degree days*”. Utilizando operadores booleanos (E; OU) para combinar as palavras-chave (Quadro 1). Refinando a busca através de filtros como o intervalo de tempo para os últimos dez (10) anos, e idioma português e inglês, para encontrar publicações adequadas.

**Quadro 1.** Lista de combinações de palavras-chaves e operadores booleanos utilizados

Combinação	Palavra-chave e operador booleano
1	Lúpulo e ambiente protegido
2	Lúpulo e ambiente protegido e graus-dias
3	Lúpulo e ambiente protegido ou graus-dias
4	Lúpulo e graus-dias
5	<i>Humulus and growing degree days</i>
6	<i>Humulus and protected environment</i>
7	<i>Humulus and growing degree days or protected environment</i>

Fonte: Elaboração própria.

O critério de seleção das publicações foi ler o título e o resumo verificando se era compatível com o tema abordado nesse trabalho, caso não abordasse ao menos dois componentes das combinações de palavras-chaves, o mesmo era desconsiderado.

Devido ao baixo número de publicações nessa abordagem, optou-se em buscar trabalhos referentes aos temas de pesquisa em ambiente protegido e graus-dia, nas plataformas de banco de dados digitais, sem restrição ao tipo de cultura.

### 2.3.2 Estudo de caso sobre acúmulo térmico em cultivo de lúpulo em ambiente protegido

O experimento foi desenvolvido em ambiente protegido, composta por estrutura metálica do tipo teto em arco, coberta com polietileno de baixa densidade transparente difusor (PEBD 100 $\mu$ m de espessura), pé direito de 2,5m e dimensões de 24m de comprimento por 7m de largura, com laterais fechadas por tela antiafídica; na fazenda Lageado, localizada na área experimental do Departamento de Biotecnologia e Bioprocessos da FCA (Faculdade de Ciências Agrônômica) da Unesp (Universidade Estadual Paulista) no campus de Botucatu – SP, nas coordenadas 22° 51' S e 48° 26' O, com altitude de 786m, possuindo clima temperado quente (mesotérmico) úmido de classificação Cwa, segundo Köppen-Geiger.

A variedade de lúpulo utilizada foi Cascade., que é tida como aromática, apresentando médios teores de alfa-ácidos (4 – 7%), e transferindo à bebida notas cítricas e florais.

As plantas de lúpulo foram submetidas ao manejo com irrigação, reposição de 100% da  $ET_c$  da cultura segundo o método de Penman-Monteith (Howell; Evett, 2004), com um total de 100 plantas.

O sistema de irrigação para conduzir a água até a planta foi por gotejamento superficial, sendo um emissor por planta da AgroJet com vazão de 2L h<sup>-1</sup>.

O espaçamento utilizado dentro do ap, foi de 1,00 m entre linhas de plantio e 0,80 m entre plantas. As plantas foram tutoradas por corda de sisal presa a um arame próximo ao teto do ap.

Foram coletados dados meteorológicos por meio de sensores via estação meteorológica, instalada dentro do ambiente protegido e também fora deste próximo ao local onde foi conduzido o experimento no período de janeiro de 2022 a fevereiro de 2023.

### 2.3.3 Estádios fenológicos do lúpulo

Durante o experimento ocorreram duas colheitas de cones de lúpulo, chamadas de safra 1 de outono, poda em 06 de janeiro de 2022 e colheita em 21 de maio de 2022; e safra 2 de verão, poda em 07 de outubro de 2022 e colheita em 07 de fevereiro de 2023 (Quadro 2).

A cultura do lúpulo apresenta diferentes fases ou estádios fenológicos, alguns autores trabalham com oito diferentes fases (FAGHERAZZI, 2020), outros com nove diferentes fases seguindo a escala fenológica BBCH (Bleiholder *et al.*, 1991). Para melhor associação das diferenças das variáveis agrometeorológicas internas e externas do ap, nesse trabalhamos optou-se por utilizar uma escala fenológica própria, de simples observação visual de diferentes estádios de desenvolvimento da cultura, apresentada no Quadro 1.

**Quadro 2.** Escala fenológica utilizada, data dos períodos de cada estágio fenológico, duração em dias de cada estágio e número de Dias Após a Poda (DAP)

		Sem Lúpulo (SL)	Lúpulo em Crescimento (LC)	Lúpulo Desenvolvido (LD)	Lúpulo Desenvolvido com Cone (LDC)
Descrição		Logo após a realização da poda das plantas	Desenvolvimento das folhas e formação de ramos laterais	Floração e surgimento das inflorescências	Desenvolvimento e maturação dos cones até a colheita
SAFRA 21/22	Duração (dias)	23	28	17	67
	DAP (dias)	1 - 23	24 - 51	52 - 68	69 - 135
	Data	06 - 28 /01/2022	29/01 - 25/02 /2022	26/02 - 15/03 /2022	16/03 - 21/05 /2022
SAFRA 22/23	Duração (dias)	16	54	15	39
	DAP (dias)	1 - 16	17 - 70	71 - 85	86 - 124
	Data	07 - 22 /10/2022	23/10 - 15/12 /2022	16 - 30 /12/2022	31/12 - 07/02 /2023

Fonte: Elaboração própria.

### 2.3.4 Massa fresca e massa seca de cones

Foi realizada a determinação da massa fresca de cones das plantas de lúpulo, com auxílio de uma balança, ao final de cada ciclo, ou seja, ao final da safra 21/22 (21 de maio de 2022) e da safra 22/23 (07 de fevereiro de 2023). Posteriormente as amostras foram armazenadas em estufa para secagem, à 35°C até atingir massa constante; e novamente foram pesadas para obtenção da massa seca de cones.

### 2.3.5 Cálculos de acúmulo de calor em graus-dia

Para determinação do acúmulo de calor foram utilizados três (3) diferentes métodos, sendo o método de Arnold (1959); o método de Ometto (1981) e o método de Dufault (1997).

Baseado apenas na temperatura basal inferior, o método de Arnold (1959) (Equação 1) é dado pela expressão:

$$GD_i = \left( \frac{T_{MAX} + T_{min}}{2} \right) - T_b \quad \text{Equação 1}$$

Em que:

$GD_i$  = graus-dia (°C) acumulados no  $i$ -ésimo dia, com  $i = 1, \dots, n$  dia;

$T_{MAX}$  = temperatura máxima do dia (°C);

$T_{min}$  = temperatura mínima do dia (°C);

$T_b$  = temperatura basal inferior da cultura (°C).

O método de Ometto (1981) é baseado nas temperaturas basais inferior e superior, apresenta cinco condicionantes (Equações 02 a 06), descritas nas expressões:

Quando:  $T_B > T_{MAX} > T_{min} > T_b$ :

$$GD_i = \left( \frac{T_{MAX} - T_{min}}{2} \right) + T_{min} - T_b \quad \text{Equação 2}$$

Quando:  $T_B > T_{MAX} > T_b > T_{min}$ :

$$GD_i = \frac{(T_{MAX} - T_b)^2}{2(T_{MAX} - T_{min})} \quad \text{Equação 3}$$

Quando:  $T_B > T_b > T_{MAX} > T_{min}$ :

$$GD_i = 0 \quad \text{Equação 4}$$

Quando:  $T_{MAX} > TB > T_{min} > Tb$ :

$$GD_i = \frac{2(T_{MAX}-T_{min})(T_{min}-Tb) + (T_{MAX}-T_{min})^2 - (T_{MAX}-TB)}{2(T_{MAX}-T_{min})} \quad \text{Equação 5}$$

Quando:  $T_{MAX} > TB > Tb > T_{min}$

$$GD_i = \frac{1}{2} \frac{((T_{MAX}-Tb)^2 - (T_{MAX}-TB))}{T_{MAX}-T_{min}} \quad \text{Equação 6}$$

Em que:

TB = Temperatura basal superior.

Diferentemente, o método de Dufault (1997), apresenta apenas duas condicionantes baseadas na TB (Equações 07 e 08) descritas nas expressões:

Quando  $TB > T_{MAX}$

$$GD_i = \frac{T_{MAX}-T_{min}}{2} - Tb \quad \text{Equação 7}$$

Quando  $TB < T_{MAX}$

$$GD_i = \frac{((TB - (T_{MAX}-TB)) + T_{min})}{2} - Tb \quad \text{Equação 8}$$

Para o cálculo do  $GD_i$ , foram utilizadas diferentes temperaturas basais inferiores (5,0; 5,2; 5,8; 6,0 e 10,0°C) e temperaturas basais superiores (35 e 39°C) citadas na literatura. E o acúmulo térmico (GD, em °C), a partir da data do transplante de cada safra até o último dia de cada estágio, foi obtida pelo somatório do  $GD_i$  (equação 9):

$$GD = \sum_{i=1}^n GD_i, \text{ para } i = 1, \dots, n \quad \text{Equação 9}$$

## 2.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao realizar a busca sistemática nas diferentes plataformas, foram obtidas 29 publicações. Ao analisar o título e resumo das mesmas, foram descartadas 23 publicações e as seis publicações selecionadas estão apresentadas no Quadro 3.

O pequeno número de publicações específicas sobre o tema, pode significar que o tema já foi amplamente abordado nas demais regiões produtoras anteriormente ou devido à pouca literatura nacional sobre o tema específico. Espera-se que esse estudo possa fomentar outros pesquisadores a realizarem experimentos a fim de determinar

temperaturas basais mais ajustadas para as condições brasileiras, bem como a exigência térmica da cultura nas diferentes regiões produtoras do Brasil.

**Quadro 3.** Publicações selecionadas através da revisão sistemática, nos últimos dez anos

'Autores	Título	Resumo
Barreto; Pilau, 2023 (Brasil)	Temperatura base e plastocrono de uma variedade de lúpulo	Determinação da Tb de uma cultivar de lúpulo em condições climáticas brasileiras
Darby, 2017 (EUA)	<i>Hops Production</i>	Avaliou a produtividade e o acúmulo térmico em diferentes cultivares de lúpulo
Eriksen <i>et al.</i> , 2020 (EUA)	<i>Photosynthetic Activity of Six Hop (Humulus lupulus L.) Cultivars under Different Temperature Treatments</i>	Avaliaram o comportamento de seis cultivares em Yakima Vale sob altas temperaturas.
Leles <i>et al.</i> , 2023 (Brasil)	<i>Performance of Hop Cultivars Grown with Artificial Lighting under Subtropical Conditions</i>	Avaliaram a duração dos estádios fenológicos e desenvolvimento do lúpulo sob suplementação de luminosidade.
Marceddu; Carrubba e Sarno, 2020 (Itália)	<i>Cultivation trials of hop (Humulus lupulus L.) in semi-arid environments</i>	Avaliaram a influência do acúmulo térmico adotando três diferentes Tb na produtividade de lúpulo.
Piconi <i>et al.</i> , 2022 (Brasil)	Determinação da constante térmica do lúpulo ( <i>Humulus lupulus</i> ) por meio da metodologia de graus-dia	Avaliar o acúmulo térmico em graus dia para uma cultivar de lúpulo na região de Botucatu/SP.
Spósito <i>et al.</i> , 2019 (Brasil)	A cultura do lúpulo	Livro sobre implantação e manejo da cultura do lúpulo

Fonte: Elaboração própria.

Durante o período do experimento, foram realizadas duas colheitas de cones (inflorescências), sendo a primeira em maio de 2022 (Safrá 21/22) e a segunda em fevereiro de 2023 (Safrá 22/23), cujos valores médios de número de cones produzidos por planta; massa fresca e massa seca estão apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1.** Média da produtividade de cones por planta; massa fresca e massa de cones.

	Média de Cones por planta (unidade)	Massa fresca média por planta (g)	Massa seca média por planta (g)
Safra 21/22 (colheita maio)	288,54	90,97	25,47
Safra 22/23 (colheita fevereiro)	211,57	85,81	19,29
Redução (%)	26,68	5,67	24,26

Fonte: Elaboração própria.

Observa-se maior produtividade na safra 21/22, fato relacionado as temperaturas amenas e menor radiação solar durante os estádios fenológicos Lúpulo Desenvolvido (LD) e Lúpulo Desenvolvido com cone (LDC), justamente fases em que a planta estava emitindo as flores (LD) e posteriormente desenvolvendo as inflorescências (LDC). Este último estágio (LDC), na safra 21/22, obteve maior duração, contribuindo para aumento da massa de cones. Na safra 22/23 os valores elevados de temperatura do ar e de radiação solar podem ter promovido a aceleração do processo de maturação das inflorescências e maior degradação, como pode ser observado na Figura 1.

**Figura 1.** Colheita de cones **A.** Realizada em 21 de maio de 2022 e **B.** Realizada em 07 de fevereiro de 2023



Fonte: Elaboração própria.

Os valores de massa fresca de cones foram semelhantes aos obtidos por Guimarães (2020), trabalhando com plantas de lúpulo variedade Cascade em vasos dentro de ambiente protegido na cidade de Botucatu/SP; porém diferentes dos obtidos por Nava (2023), que trabalhou com plantas de lúpulo variedade Cascade à campo e adubação orgânica; uma vez que estudos de produtividade de lúpulo demonstram que diferentes variedades; idade das plantas; ambientes de produção e manejo da cultura promovem variabilidade da produção (Fortuna, 2021).

Durante o período analisado para a safra 21/22, a temperatura mais baixa registrada foi de 3,75°C e a temperatura mais alta foi de 32,71°C, sendo a temperatura média para o período de 22,86°C; e para a safra 22/23, a temperatura mais baixa registrada foi de 12,25°C e a temperatura mais alta foi de 39,80°C, sendo a temperatura média para o período de 24,45°C. Segundo Dodds (2017), o lúpulo requer um período entre 30 a 60 dias com temperaturas baixas (inferior à 5°C) para que ocorra a quebra da dormência e o crescimento vigoroso e sincronizado para boa formação do dossel. Em regiões onde não ocorre a vernalização natural, o estresse por déficit hídrico, durante o inverno, pode servir como estímulo para brotação de novos ramos (Leite; Pandolfo, 2022).

Nas Tabelas 2 a 6 estão apresentados os somatórios térmicos obtidos pelo método de Arnold (1959) (Tabela 2); Ometto (1981) (Tabelas 3 e 4) e Dufault (1997) (Tabelas 5 e 6), considerando cinco diferentes temperaturas basais inferiores ( $T_b$ ) (5,0; 5,2; 5,8; 6,0 e 10,0°C) e para os métodos de Ometto (1981) e Dufault (1997) foram consideradas duas temperaturas basais superiores ( $T_B$ ) (35 e 39°C). É possível notar que nos diferentes métodos ao adotar a  $T_b$  mais baixa de 5,0°C, citada na literatura estrangeira para clima temperado, o acúmulo térmico em graus-dia atinge os valores citados pelo mesmo autor, que obteve valores entre 2400 a 2500 GD utilizando o método de Arnold (1959) (Srečec *et al.*, 2008). Ainda assim, assumindo os valores de  $T_b$  citados na literatura nacional de 5,2°C e 5,8°C, obtidos por Barreto; Pilau (2023), avaliaram a variedade Cascade, na cidade de Piracicaba/SP, obtiveram de acúmulo térmico de 2200 a 2300 GD, próximos à referência internacional, e valores de 92 e 96°C dia.nó<sup>-1</sup>, para as  $T_b$  de 5,2 e 5,8°C respectivamente. O método de Dufault (1997) apresentou os menores valores de acúmulo térmico em todas as  $T_b$ , durante a safra 22/23.

Ainda que apresentando algumas condicionantes para cálculo de acúmulo térmico, os diferentes métodos utilizados, apresentaram resultados semelhantes,

principalmente na safra 21/22, na qual os valores médios de temperatura do ar foram menores que o ano seguinte e sem extremos de calor, ou seja, quando a variável temperatura do ar se situa abaixo da temperatura basal superior e acima da temperatura basal inferior, os métodos os valores obtidos são idênticos em todos os métodos utilizados.

Diferentemente, na safra 22/23, os valores médios de temperatura do ar, em alguns dias, foram mais elevados que a temperatura basal superior utilizada (TB), de 39°C. Tal fato ocorreu durante o estágio LC da safra 22/23, ocasionando as alterações do acúmulo térmico entre os diferentes métodos analisados, sendo que o método de Ometto (1981) apresentou menor variabilidade quando comparadas as TB de 35°C e 39°C entre si e com o método de Arnold (1959), apresentando redução de 2,37% e 2,26% para as TB 35°C e 39°C respectivamente.

Observa-se que o acúmulo foi maior durante a safra 21/22, com exceção quando a Tb admitida foi de 10,0°C, correlacionado com o período maior em número de dias (135 dias) em relação à safra 22/23 (124 dias), sendo que no método de Dufault (1997), em ambas as TB obtiveram-se valores acumulados menores na safra 22/23, para todas as Tb avaliadas. Ao adotar a Tb de 5°C, citada na literatura estrangeira, o acúmulo térmico observado nesse trabalho mostrou-se coerente com a literatura estrangeira, sendo necessários mais estudos como o de Barreto; Pilau (2023), demonstrando que a Tb pode ser diferente para as condições agrometeorológicas brasileiras inclusive podendo variar entre as diferentes regiões do país; ao adotar as Tb observadas por esses autores, os valores acumulados de GD foram muito próximos aos citados na literatura.

**Tabela 2.** Graus-dias acumulados calculados pelo método de Arnold (1959).

Temp. basal inferior (°C)		Safrá 21/22				Safrá 22/23			
		Estádios fenológicos				Estádios fenológicos			
		SL	LC	LD	LDC	SL	LC	LD	LDC
	Duração (dias)	23	28	17	67	16	54	15	39
5,0	$\sum GD_{estádio}$	434,45	521,80	368,79	1085,77	284,36	1149,42	236,84	668,99
	$\sum GD_{safra}$	434,45	956,25	1325,03	2410,80	284,36	1433,77	1670,61	2339,59
5,2	$\sum GD_{estádio}$	429,85	516,20	365,19	1072,57	281,16	1138,62	234,24	661,59
	$\sum GD_{safra}$	429,85	946,05	1311,23	2383,80	281,16	1419,77	1654,01	2315,59
5,8	$\sum GD_{estádio}$	416,05	499,40	354,39	1032,97	271,56	1106,22	226,44	639,39
	$\sum GD_{safra}$	416,05	915,45	1269,83	2302,80	271,56	1377,77	1604,21	2243,59
6,0	$\sum GD_{estádio}$	411,45	493,80	350,79	1019,77	268,36	1095,4	223,84	631,99
	$\sum GD_{safra}$	411,45	905,25	1256,03	2275,80	268,36	1363,77	1587,61	2219,59
10,0	$\sum GD_{estádio}$	319,45	381,80	278,79	755,77	204,36	879,42	171,84	483,99
	$\sum GD_{safra}$	319,45	701,25	980,03	1735,80	204,36	1083,77	1255,61	1739,59

Fonte: Elaboração própria.

**Tabela 3.** Graus-dias acumulados calculado pelo método de Ometto (1981), considerando a TB de 35°C.

Temp. basal inferior (°C)	Duração (dias)	Safr 21/22				Safr 22/23			
		Estádios fenológicos				Estádios fenológicos			
		SL	LC	LD	LDC	SL	LC	LD	LDC
		23	28	17	67	16	54	15	39
5,0	$\sum GD_{estádio}$	434,45	521,80	368,785	1085,87	284,36	1122,29	236,84	668,985
	$\sum GD_{safra}$	434,45	956,25	1325,03	2410,90	284,36	1406,65	1643,49	2312,47
5,2	$\sum GD_{estádio}$	429,85	516,20	365,19	1072,70	281,16	1111,49	234,24	661,585
	$\sum GD_{safra}$	429,85	946,05	1311,23	2383,93	281,16	1392,65	1626,89	2288,47
5,8	$\sum GD_{estádio}$	416,05	499,40	354,39	1032,48	271,56	1079,09	226,44	639,385
	$\sum GD_{safra}$	416,05	915,45	1269,83	2302,31	271,56	1350,65	1577,09	2216,47
6,0	$\sum GD_{estádio}$	411,45	493,80	350,79	1020,10	268,36	1068,29	223,84	631,99
	$\sum GD_{safra}$	411,45	905,25	1256,03	2276,13	268,36	1336,65	1560,49	2192,47
10,0	$\sum GD_{estádio}$	319,45	381,80	278,79	759,54	204,36	871,68	171,84	483,99
	$\sum GD_{safra}$	319,45	701,25	980,03	1739,57	204,36	1076,04	1247,88	1731,86

Fonte: Elaboração própria.

**Tabela 4.** Graus-dias acumulados calculado pelo método de Ometto (1981), considerando a TB de 39°C.

Temp. basal inferior (°C)	Duração (dias)	Safrá 21/22				Safrá 22/23			
		Estádios fenológicos				Estádios fenológicos			
		SL	LC	LD	LDC	SL	LC	LD	LDC
		23	28	17	67	16	54	15	39
5,0	$\sum GD_{estádio}$	434,45	521,80	368,785	1085,87	284,36	1123,50	236,84	668,985
	$\sum GD_{safrá}$	434,45	956,25	1325,03	2410,90	284,36	1407,86	1644,69	2313,68
5,2	$\sum GD_{estádio}$	429,85	516,20	365,19	1072,70	281,16	1112,70	234,24	661,585
	$\sum GD_{safrá}$	429,85	946,05	1311,23	2383,93	281,16	1393,86	1628,09	2289,68
5,8	$\sum GD_{estádio}$	416,05	499,40	354,39	1032,48	271,56	1080,30	226,44	639,385
	$\sum GD_{safrá}$	416,05	915,45	1269,83	2302,31	271,56	1351,86	1578,29	2217,68
6,0	$\sum GD_{estádio}$	411,45	493,80	350,79	1020,10	268,36	1069,50	223,84	631,99
	$\sum GD_{safrá}$	411,45	905,25	1256,03	2276,13	268,36	1337,86	1561,69	2193,68
10,0	$\sum GD_{estádio}$	319,45	381,80	278,79	759,54	204,36	853,50	171,84	483,99
	$\sum GD_{safrá}$	319,45	701,25	980,03	1739,57	204,36	1057,86	1229,69	1713,68

Fonte: Elaboração própria.

**Tabela 5.** Graus-dias acumulados calculado pelo método de Dufault (1997), considerando a TB de 35°C.

Temp. basal inferior (°C)	Duração (dias)	Safr 21/22				Safr 22/23			
		Estádios fenológicos				Estádios fenológicos			
		SL	LC	LD	LDC	SL	LC	LD	LDC
		23	28	17	67	16	54	15	39
5,0	$\sum GD_{estádio}$	434,45	521,80	368,79	1085,77	284,36	1022,55	236,84	668,985
	$\sum GD_{safra}$	434,45	956,25	1325,03	2410,80	284,36	1306,90	1543,74	2212,72
5,2	$\sum GD_{estádio}$	429,85	516,20	365,19	1072,57	281,16	1011,75	234,24	661,59
	$\sum GD_{safra}$	429,85	946,05	1311,23	2383,80	281,16	1292,90	1527,14	2188,73
5,8	$\sum GD_{estádio}$	416,05	499,40	354,39	1032,97	271,56	979,35	226,44	639,39
	$\sum GD_{safra}$	416,05	915,45	1269,83	2302,80	271,56	1250,90	1477,34	2116,73
6,0	$\sum GD_{estádio}$	411,45	493,80	350,79	1019,77	268,36	968,55	223,84	631,99
	$\sum GD_{safra}$	411,45	905,25	1256,03	2275,80	268,36	1236,90	1460,74	2092,73
10,0	$\sum GD_{estádio}$	319,45	381,80	278,79	755,77	204,36	752,55	171,84	483,99
	$\sum GD_{safra}$	319,45	701,25	980,03	1735,80	204,36	956,90	1128,74	1612,73

Fonte: Elaboração própria.

**Tabela 6.** Graus-dias acumulados calculado pelo método de Dufault (1997), considerando a TB de 39°C.

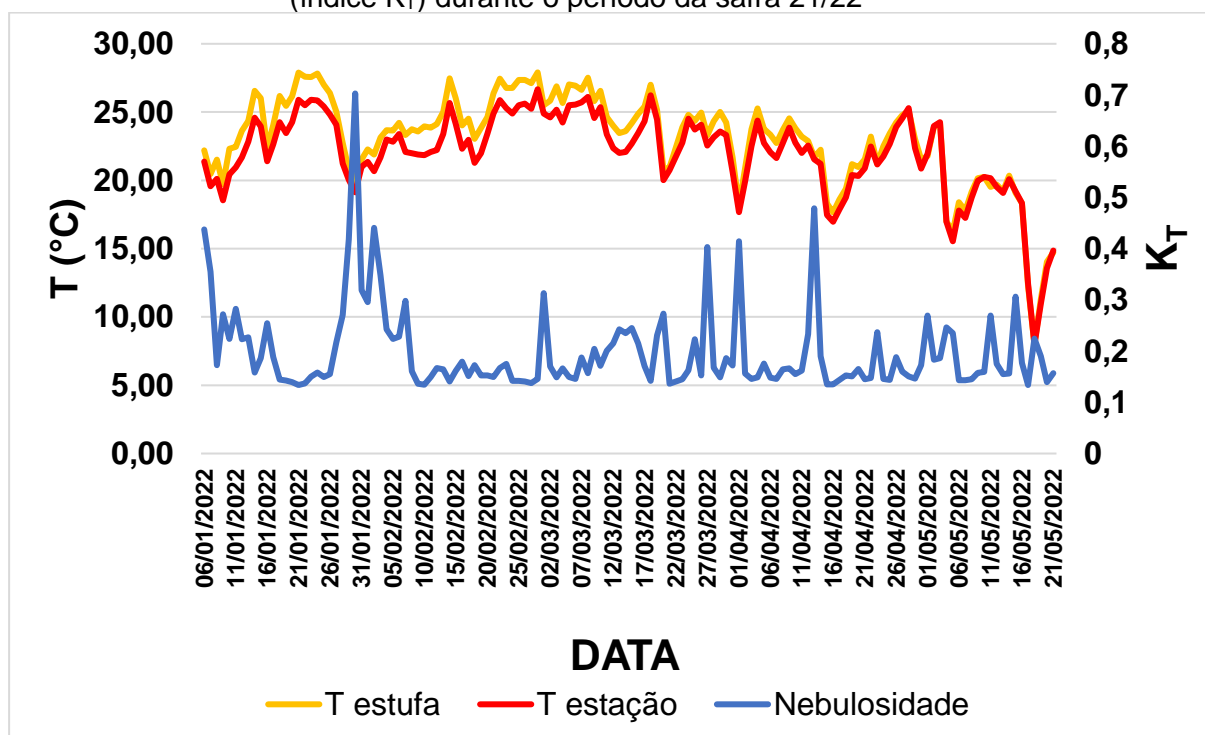
Temp. basal inferior (°C)	Duração (dias)	Safrá 21/22				Safrá 22/23			
		Estádios fenológicos				Estádios fenológicos			
		SL	LC	LD	LDC	SL	LC	LD	LDC
		23	28	17	67	16	54	15	39
5,0	$\sum GD_{estádio}$	434,45	521,80	368,79	1085,77	284,36	1075,60	236,84	668,99
	$\sum GD_{safra}$	434,45	956,25	1325,03	2410,80	284,36	1359,95	1596,79	2265,78
5,2	$\sum GD_{estádio}$	429,85	516,20	365,19	1072,57	281,16	1064,80	234,24	661,59
	$\sum GD_{safra}$	429,85	946,05	1311,23	2383,80	281,16	1345,95	1580,19	2241,78
5,8	$\sum GD_{estádio}$	416,05	499,40	354,39	1032,97	271,56	1032,40	226,44	639,39
	$\sum GD_{safra}$	416,05	915,45	1269,83	2302,80	271,56	1303,95	1530,39	2169,78
6,0	$\sum GD_{estádio}$	411,45	493,80	350,79	1019,77	268,36	1021,60	223,84	631,99
	$\sum GD_{safra}$	411,45	905,25	1256,03	2275,80	268,36	1289,95	1513,79	2145,78
10,0	$\sum GD_{estádio}$	319,45	381,80	278,79	755,77	204,36	805,60	171,84	483,99
	$\sum GD_{safra}$	319,45	701,25	980,03	1735,80	204,36	1009,95	1181,79	1665,78

Fonte: Elaboração própria.

Durante a safra 21/22, todos os métodos apresentaram os mesmos valores acumulados, já para a safra 22/23, em virtude dos valores elevados de temperatura do ar em alguns dias, os métodos apresentaram diferenças nos valores acumulados, sendo que o método de Ometto (1981) apresentou menor variação dos valores, ou seja os valores ficaram mais semelhantes em relação ao método de Arnold, amplamente utilizado na literatura. Já o método de Dufault (1997) apresentou valores diferentes dos demais métodos e menor que o valor obtido pelo método de Arnold, especialmente quando adotada a TB 39°C.

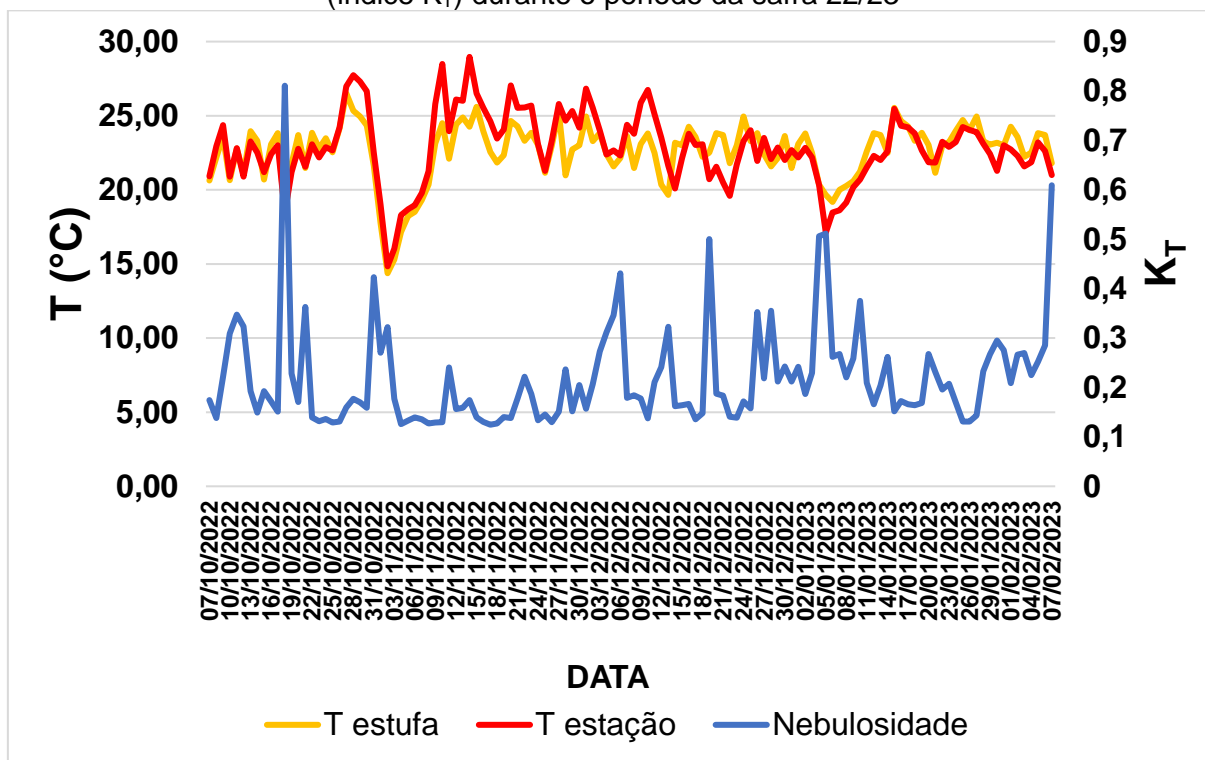
Nas Figuras 2 e 3 estão apresentados os valores médios diários de temperatura do ar e os valores de nebulosidade (índice  $K_T$ ) durante as safras 21/22 e 22/23, respectivamente; onde é possível verificar que durante a safra 21/22 (Figura 2) os valores de temperatura foram menores e com menores variações além de menor nebulosidade e maior predominância de radiação solar direta em relação aos da safra 22/23 (Figura 3). Considerando que as safras ocorreram em diferentes períodos do ano, é esperado que esses valores sejam diferentes, porém mesmo ao comparar o mês de janeiro nota-se diferença nos valores apresentados no ano de 2022 comparado à 2023, fator que pode ter contribuído para a diferença na produtividade de cones entre as safras.

**Figura 2.** Valores médios diários de temperatura do ar ( $T$  °C) e valores de nebulosidade (índice  $K_T$ ) durante o período da safra 21/22



Fonte: Elaboração própria.

**Figura 3.** Valores médios diários de temperatura do ar (°C) e valores de nebulosidade (índice  $K_T$ ) durante o período da safra 22/23



Fonte: Elaboração própria.

Além disso é possível observar que existe associação entre a temperatura do ar, que influencia o acúmulo térmico, e o estágio fenológico da cultura.

O índice de nebulosidade ou índice  $K_T$ , é um parâmetro utilizado para quantificar a fração de radiação solar global que atinge a superfície terrestre em relação à radiação solar extraterrestre que incide no topo da atmosfera. Baixos valores de  $K_T$  são frequentemente um indicativo de céu nebuloso, caracterizando uma predominância da radiação difusa dentro do espectro solar global. Em oposição, valores elevados de  $K_T$  são característicos de um céu claro, onde a radiação direta é mais proeminente (Teramoto; Escobedo, 2012).

Analisando a produtividade obtida, os valores de acúmulo térmico e os valores de temperatura e umidade relativa do ar, para as condições deste estudo, a safra 21/22 apresentou maiores valores de produtividade, tendo como prováveis efeitos positivos os fatos de ocorrerem menores variações dos valores de temperatura do ar e o período de florescimento e desenvolvimento de cones (LD e LDC) ocorrerem durante o outono, onde a temperatura do ar apresenta valores menores que às temperaturas das estações como verão, época na qual ocorreu o estágio LDC da safra 22/23. Srečec *et al.* (2008) e Marceddu; Carruba; Sarno (2020), verificaram que o acúmulo

de graus-dias tem correlação negativa com o acúmulo de alfa-ácidos e que valores elevados de evapotranspiração no período de formação de cones resulta em menor produtividade de cones por planta e redução nos teores de alfa-ácidos, sendo indicativo de que os genótipos de lúpulo mais produtivos também podem apresentar uma resposta mais eficiente às condições do ambiente de crescimento, por terem um desenvolvimento vegetativo rápido e vigoroso.

Observa-se que valores mais altos de  $K_T$ , indicativos de condições de céu claro e maior predominância de radiação solar direta, estão associados a temperaturas do ar mais elevadas. Essa correlação é esperada, uma vez que a radiação solar direta é um dos principais fatores que contribuem para o aquecimento do ar, elevando as temperaturas durante o dia. Por outro lado, os períodos em que o índice  $K_T$  registra valores baixos coincidem com temperaturas mais amenas ou baixas. Isso ocorre devido à presença de nuvens, que refletem uma parte significativa da radiação solar de volta para a atmosfera, reduzindo a quantidade de energia solar que chega à superfície terrestre e mantendo as temperaturas mais baixas.

A variação diária e sazonal apresentada nas figuras indica que os picos de temperatura do ar e  $K_T$  geralmente ocorrem ao meio-dia ou no início da tarde, momentos em que o sol está mais próximo do zênite, resultando em uma menor cobertura de nuvens. Durante as horas noturnas e matinais, as temperaturas do ar são mais baixas, acompanhadas por menores valores de  $K_T$ , o que indica uma atmosfera mais estável e menos sujeita a variações na entrada de radiação solar. Em algumas ocasiões, é possível identificar anomalias ou eventos climáticos, onde valores anormalmente baixos de  $K_T$  coincidem com temperaturas mais altas do que o esperado. Isso sugere a presença de fenômenos como nuvens finas ou poeira, que podem reduzir a radiação solar direta sem necessariamente refletir uma grande quantidade de energia, permitindo que a temperatura do ar permaneça alta. Os valores obtidos nesse trabalho diferem dos obtidos por Dal Pai; Escobedo (2014) e Sousa (2021).

No Quadro 4 estão apresentados os métodos utilizados para cálculo de acúmulo térmico, as temperaturas basais superiores e inferiores analisadas e as siglas que representam cada um nas Figuras 4 e 5.

**Quadro 4.** Siglas utilizadas nas figuras 4 e 5, com os respectivos métodos de cálculo de acúmulo térmico e as temperaturas basais superiores e inferiores consideradas

SIGLA	MÉTODO	T. Basal Superior °C	T. Basal Inferior °C
A 5,0	Arnold (1959)	-	5,0
A 5,2	Arnold (1959)	-	5,2
A 5,8	Arnold (1959)	-	5,8
A 6,0	Arnold (1959)	-	6,0
A 10,0	Arnold (1959)	-	10,0
O1 5,0	Ometto (1981)	35	5,0
O1 5,2	Ometto (1981)	35	5,2
O1 5,8	Ometto (1981)	35	5,8
O1 6,0	Ometto (1981)	35	6,0
O1 10,0	Ometto (1981)	35	10,0
O2 5,0	Ometto (1981)	39	5,0
O2 5,2	Ometto (1981)	39	5,2
O2 5,8	Ometto (1981)	39	5,8
O2 6,0	Ometto (1981)	39	6,0
O2 10,0	Ometto (1981)	39	10,0
D1 5,0	Dufault (1997)	35	5,0
D1 5,2	Dufault (1997)	35	5,2
D1 5,8	Dufault (1997)	35	5,8
D1 6,0	Dufault (1997)	35	6,0
D1 10,0	Dufault (1997)	35	10,0
D2 5,0	Dufault (1997)	39	5,0
D2 5,2	Dufault (1997)	39	5,2
D2 5,8	Dufault (1997)	39	5,8
D2 6,0	Dufault (1997)	39	6,0
D2 10,0	Dufault (1997)	39	10,0

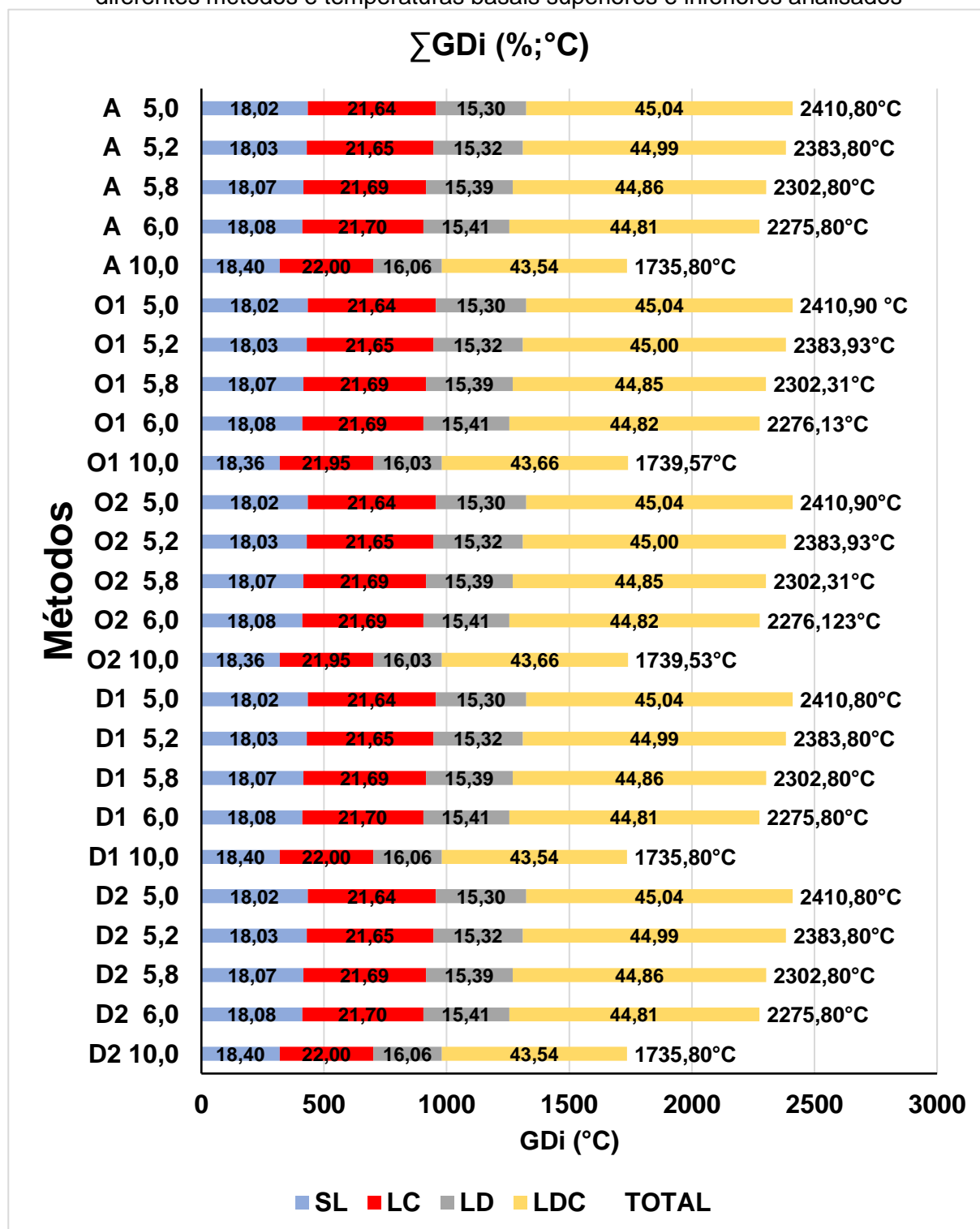
Fonte: Elaboração própria.

Nas Figuras 4 e 5 estão apresentados os acúmulos de graus-dia da safra 21/22 e safra 22/23 e o percentual deste acúmulo em cada estágio, respectivamente, o eixo vertical representa os métodos analisados para cálculo de acúmulo energético seguido da temperatura basal inferior analisada, de forma que a letra representa o método (conforme o Quadro 4).

Quanto à duração das safras é possível observar que ao analisar todo o período, os valores de dias bem como o acúmulo térmico são similares entre as safras, porém ao analisar os diferentes estádios fenológicos observa-se que o estágio sem lúpulo (SL) foi mais longo na safra 21/22, que pode ser explicado pelo fato de ser a primeira

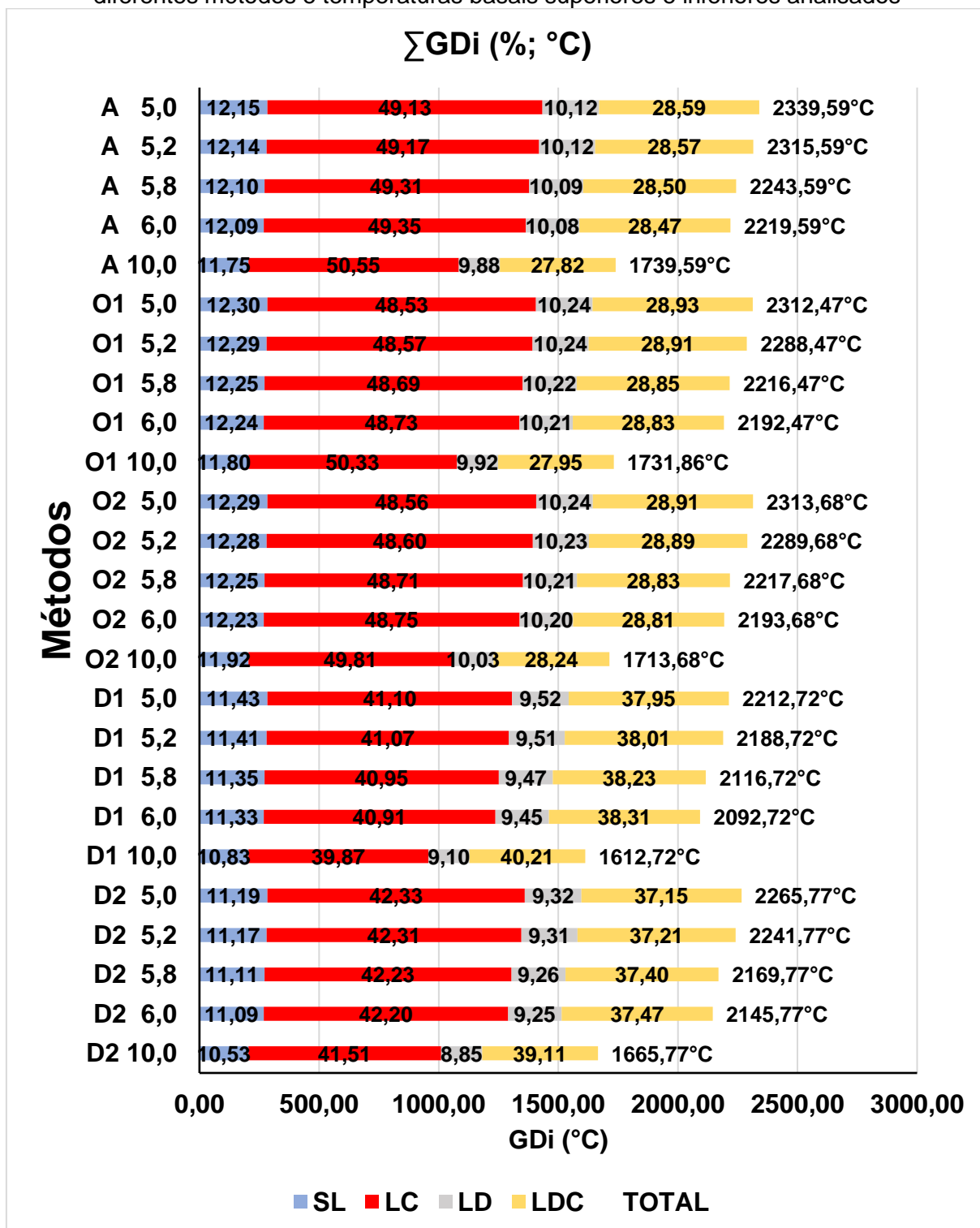
rebrotar e o sistema radicular ainda estar em formação enquanto na safra 22/23 já estava mais estruturado e permitiu uma brotação mais rápida.

**Figura 4.** Graus-dias acumulados no período da safra 21/22 e percentual por estágio, nos diferentes métodos e temperaturas basais superiores e inferiores analisados



Fonte: Elaboração própria.

**Figura 5.** Graus-dias acumulados no período da safra 22/23 e percentual por estágio, nos diferentes métodos e temperaturas basais superiores e inferiores analisados



Fonte: Elaboração própria.

Marceddu; Carruba; Sarno (2020), analisando o ciclo de produção de variedades de lúpulo na Itália, observaram valores entre 130 a 147 dias após o transplante; Leles *et al.* (2023), avaliando o ciclo de 5 variedades de lúpulo, observaram valores de 90 e

110 dias após a poda para surgimento das inflorescências e de 135 dias após a poda para a colheita, corroborando com o conceito de que as características edafoclimáticas de cada região e as variedades de lúpulo são fatores determinantes da produtividade e qualidade do lúpulo.

O estágio lúpulo em crescimento (LC) foi o que apresentou maior diferença entre as safras sendo quase duas vezes mais longo na safra 22/23 e acumulando mais que o dobro de unidades térmicas que o mesmo estágio na safra 21/22, isso porque nesse período foram registradas os maiores valores de temperatura do ar do período, atingindo em vários dias temperatura acima de 35°C, o que pode reduzir a atividade metabólica da planta (Dodds, 2017). Eriksen *et al.* (2020), ao analisarem a assimilação de carbono na variedade Cascade verificaram que os maiores valores foram obtidos à temperatura de 27°C com pouco decréscimo à temperatura de 39°C.

O estágio lúpulo desenvolvido (LD) obteve valores de duração de dias parecidos em ambas as safras, porém os valores acumulados foram maiores na safra 21/22, isso porque foi nesse período que as maiores temperaturas foram registradas durante a safra 21/22.

Ainda na safra 21/22 ocorreu maior acúmulo no estágio LDC, enquanto os demais estádios somados atingiram valores semelhantes, devido principalmente, ao estágio LDC também ser o mais longo com 67 dias, vale considerar que o estágio LDC da safra 21/22, ocorreu durante o fim do verão, período que normalmente os valores de temperatura são mais elevados, conseqüentemente, proporcionam maior acúmulo térmico.

Na safra 22/23 o estágio LC apresentou o maior acúmulo, enquanto os demais estádios somados atingiram valores semelhantes, devido principalmente, ao estágio LC também ser o mais longo com 54 dias.

O estágio LD foi o estágio mais curto, em dias, em ambas as safras, porém o acúmulo térmico foi superior na safra 21/22.

Os estádios SL e LD apresentaram menor acúmulo térmico em ambas as safras, sendo aproximadamente 18% e 15%, respectivamente na safra 21/22 e; aproximadamente 12% e 10%, respectivamente na safra 22/23; ao analisar que o estágio SL na safra 21/22 ocorreu em janeiro de 22 com elevados valores de temperatura do ar, umidade relativa e bastante horas de luz. Já na safra 22/23 o estágio SL ocorreu em novembro de 22, com valores de temperatura do ar elevados e menores valores de umidade relativa do ar. O estágio LD na safra 21/22, ocorreu

em março, com menor fotoperíodo e menores valores de temperatura do ar; já na safra 22/23, ocorreu em dezembro, com elevados valores de temperatura do ar, umidade relativa do ar e maior fotoperíodo.

Os estádios LC e LDC apresentaram os maiores acúmulos térmicos em ambas as safras sendo aproximadamente 21% e 45%, respectivamente na safra 21/22; para a safra 22/23 o acúmulo foi inverso, sendo maior no estádio LC obtendo através dos métodos de Arnold (1959) e Ometto (1981) aproximadamente 50% do acúmulo já para o método de Dufault (1997) foi de aproximadamente 41% quando admitida a TB de 35°C e de aproximadamente 42% quando admitida a TB de 39°C. No estádio LDC nos métodos de Arnold (1959) e Ometto (1981) o acúmulo foi de 29% já para o método de Dufault (1997) foi de aproximadamente 38% quando admitida a TB de 35°C e de aproximadamente 37% quando admitida a TB de 39°C. O estádio LC na safra 21/22, ocorreu em fevereiro, com redução do fotoperíodo, elevados valores de temperatura e umidade; na safra 22/23 ocorreu em novembro e dezembro de 22, com elevados valores de temperatura e umidade relativa do ar apresentado grande variação, e maior fotoperíodo. O estádio LDC, o mais longo da safra 21/22, ocorreu entre março e maio, com menores valores de temperatura do ar e umidade relativa do ar, e também menor fotoperíodo; já na safra 22/23 ocorreu em janeiro e início de fevereiro de 23, com elevados valores de temperatura do ar e menores valores de umidade relativa do ar, mas ao final do estádio os valores de temperatura do ar diminuíram bastante e a umidade relativa do ar aumentou nesse período.

## 2.5 CONCLUSÕES

Os estudos sobre acúmulo térmico em outros países já estão consolidados, porém no Brasil, por ser uma cultura que recentemente obteve maior destaque para cultivo, faz-se necessário estudar mais a fundo esse tema.

Os diferentes métodos de cálculo de acúmulo térmico apresentam pouca diferença entre si, porém o que mostrou ser mais adequado para a região foi o método de Dufault (1997), ainda assim o método de Arnold (1959) por ser de fácil aplicação pode ser utilizado.

O acúmulo térmico em graus-dia pode ser uma ferramenta simples e eficiente para auxiliar na melhor tomada de decisão de manejo da cultura incluir a o ajuste da poda.

A variável temperatura do ar apresenta grande influência sobre o desenvolvimento da planta e conseqüentemente na produtividade.

A época de plantio/poda pode influenciar significativamente a produtividade, o manejo de plantio/poda deve ocorrer de modo a garantir que o estágio de desenvolvimento e maturação de inflorescências (LDC) não coincida com períodos de elevados valores de temperatura do ar.

O acúmulo térmico é maior nos estádios de crescimento de folhas e ramos (LC) e durante o desenvolvimento e maturação das inflorescências (LDC), sendo que maior acúmulo de graus-dias na safra 21/22 durante o estágio LDC, somado aos valores menores de temperatura do ar, pode ter contribuído para a maior produtividade.

Os valores assumidos para temperatura basal inferior de 5,2°C e 5,8°C, obtidos por Barreto, Pilau (2003) apresentaram bastante concordância com os valores da literatura e podem ser utilizados em pesquisas nas condições climáticas brasileiras bem como a temperatura basal superior de 35°C.

## REFERÊNCIAS

- ACOSTA-RANGEL, A.; RECHCIGL, J.; BOLLIN, S.; DENG, Z.; AGEHARA, S. Hop (*Humulus lupulus* L.) phenology, growth, and yield under subtropical climatic conditions: Effects of cultivars and crop management. **Australian Journal of Crop Science**, v. 15, n. 5, p. 764-772, 2021. <http://doi.org/10.21475/ajcs.21.15.05.p3192>.
- ANDRADE, R. G. **Estimativa da temperatura base inferior e avaliação dos modelos beta, RCM e GDD em diferentes subperíodos das culturas de milho, arroz e feijão**. 2004. 67f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004.
- ARNOLD, C. Y. The determination and significance of the base temperature in a linear heat unit system. **Proceedings of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v. 74, n.1 p. 430-445, 1959.
- BARRETO, I.A.C.; PILAU, F. G. Temperatura base e plastocrono de uma variedade de lúpulo. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v.31, e027116, 2023.
- DAL PAI, E.; ESCOBEDO, J. F. Estimativa da radiação atmosférica em função dos índices radiométricos kt e kd para Botucatu-SP. **Energia na Agricultura**, v. 30, n. 2, p. 172-179, 2014.
- DARBY, H. **Hops Production**, University Vermont. 2017. Disponível em: [https://www.canr.msu.edu/uploads/234/78941/Hops\\_Production\\_-\\_Heather\\_Darby.pdf](https://www.canr.msu.edu/uploads/234/78941/Hops_Production_-_Heather_Darby.pdf). 2017. Acesso em: 25 nov. 2023.
- DODDS, K. **Hops a guide for new growers**. Department of primary industries, Australian Government, 2017. Disponível em: <<http://www.dpi.nsw.gov.au>. Acesso em: 03 jul. 2023.
- DUFAULT, R. J. Determining heat unit requirements for broccoli in coastal South Carolina. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v.122, n.2, p.169-174, 1997
- ERIKSEN, R.L.; RUTTO, L.K.; DOMBROWSKI, J.E.; HENNING, J.A. Photosynthetic Activity of Six Hop (*Humulus lupulus* L.) Cultivars under Different Temperature Treatments. **HORTSCIENCE**, v.55, n.4, p. 403-409, 2020.
- FAGUNDES, J.D.; STRECK, N.A.; STORCK, L.; REINIGER, L.R. Temperatura base e soma térmica de subperíodos de desenvolvimento de *Aspilia montevidensis*. **Bragantia**, v. 69, n. 9, p. 499-507, 2010.
- FERREIRA, M. DE C.; MARTINS, F. B. ; FLORÊNCIO, G. W. L.; SILVA, J. P. G. C.; PASIN, L. A. A. P. Cardinal temperatures and thermal requirements for the initial development of two Brazilian native species. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 54, e00525, 2019. DOI: 10.1590/S1678-3921.pab2019.v54.00525
- HOWELL, T. A.; EVETT S. R. **The Penman-Monteith method**. Washington, DC: USDA-Agricultural Research Service, Conservation & Production Research Laboratory, 2004. 14 p.
- JASTROMBEK, J. M.; FAGUERAZZI, M. M.; PIEREZAN, H. DE C.; RUFATO, L.; SATO, A. J.; RICCE, W. DA S.; MARQUES, V. V.; LELES, N. R.; ROBERTO, S. R. Hop: An Emerging Crop in Subtropical Areas in Brazil. **Horticulturae**, v. 8, n. 5, p. 393, 2022. DOI: 10.3390/horticulturae8050393.

KNEEN, R. **Small scale and organic hops production**. Kneen, Left Fields, British Columbia. 2003. Disponível em: <http://www.crannogales.com/hopsmanual.html>  
Acesso em: 23 nov. 2023.

LAGO, I.; STRECK, N.A.; CARVALHO, M.P.; FAGUNDES, L.K.; PAULA, G.M.de.; LOPES, S.J. Estimativa da temperatura base do subperíodo emergência-diferenciação da panícula em arroz cultivado e arroz vermelho. **Revista Ceres**, v. 56, p. 288-295, 2009.

LEITE, G. B.; PANDOLFO, C. Requerimentos agroclimáticos para a cultura do lúpulo. **Agropecuária Catarinense**. . v. 35. P. 83-86. 2022.  
<https://doi.org/10.52945/rac.v35i2.1273>

LELES, N. R. *et al.* Performance of Hop Cultivars Grown with Artificial Lighting under Subtropical Conditions. *Plants*. v.12, no. 10 p. 1971. 2023.  
<https://doi.org/10.3390/plants12101971>

LIMA, E.P.; SILVA, E.L. da. Temperatura base, coeficientes de cultura e graus-dia para cafeeiro arábica em fase de implantação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.12, p.266-273, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662008000300007>

LOZADA, B.I.; ANGELOCCI, L.R. Determinação da temperatura-base e graus-dia para a estimativa da duração do sub-período de semeadura à floração de um híbrido de milho. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 7, n. 1, p. 31-36, 1999.

MARCEDDU, R.; CARRUBBA, A.; SARNO, M. Cultivation trials of hop (*Humulus lupulus* L.) in semi-arid environments. **Heliyon** v.6, n.10, e05114, 2020. DOI: 10.1016/j.heliyon.2020.e05114.

MARTINS, F.B.; FERREIRA, M.C.de; OLIVEIRA, L.F.S.dos; RAMALHO, V.; GONÇALVES, E.D. Temperatura do ar no desenvolvimento reprodutivo de cultivares de oliveira. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 34, n. 2, p. 179- 190, 2019.

MÜLLER, L.; MANFRON, P.A.; MEDEIROS, S.L.P.; STRECK, N.A.; MITTELMAN, A.; NETO, D.D.; BANDEIRA, A.H.; MORAIS, K.P. Temperatura base inferior e estacionalidade de produção de genótipos diploides e tetraploides de azevém. **Ciência Rural**, v. 39, n. 5, p. 1343-1348.

MUTTONI, M.; ALBERTO, C. M.; BARTZ, A. C.; UHLMAN, L. O.; TARTAGLIA, V. DE L.; STRECK, N. A. Cardinal temperatures for planting-emergence phase in gladiolus. **Ciência Rural**, v.47, n.10, e20160824, 2017. DOI: 10.1590/0103-8478cr20160824.

OMETTO, J.C. **Bioclimatologia vegetal**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 425p.

PEDRO-JÚNIOR, M.J.; SENTELHAS, P.C. Clima e produção. In: C.V. POMMER, ed. **Uva: tecnologia de produção, pós-colheita, mercado**. Porto Alegre: Cinco Continentes, p. 63-107. 2003.

PICONI, G. G. *et al.* Determinação da constante térmica do lúpulo (*Humulus lupulus*) por meio da metodologia de graus-dia. II Enbralúpulo. **Anais**. 2022. Disponível em: [https://www.even3.com.br/anais/eenbralupulo/441751-DETERMINACAO-DA-CONSTANTE-TERMICA-DO-LUPULO-\(HUMULUS-LUPULUS\)-POR-MEIO-DA-METODOLOGIA-DE-GRAUS-DIA](https://www.even3.com.br/anais/eenbralupulo/441751-DETERMINACAO-DA-CONSTANTE-TERMICA-DO-LUPULO-(HUMULUS-LUPULUS)-POR-MEIO-DA-METODOLOGIA-DE-GRAUS-DIA). Acesso em: 25 nov. 2023.

RENATO, N. dos S.; SILVA, J.B.L.; SEDIYAMA, G.C.; PEREIRA, E.G. Influência dos métodos para cálculo de graus-dia em condições de aumento de temperatura para

as culturas de milho e feijão. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.28, p.382-388, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-77862013000400004>

RYBACEK, V. **Hop Production**, vol. 16. 1st edition. Holland: Elsevier Science. 286 p., 1991.

SILVA, L. V. DA; REIS, F. Y. DA S.; MARTINS, F. B.; CASSEMIRO, J. M. Desenvolvimento vegetativo de *Cesalpineia ferrea* e *Anadenanthera macrocarpa*: I- Estimativa das temperaturas cardinais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v.35, n.1, p.23-33, 2020. DOI: 10.1590/0102-7786351006.

SINCLAIR, T.R.; GILBERT, R. A.; PERDOMO, R. E.; SHINE Jr., J. M.; POWELL, G.; MONTES, G. Sugarcane leaf area development under field conditions in Florida, USA. **Field Crops Research**, v.88, n.1, p.171-178, 2004

SOUSA, R. L. de. **Saldo de radiação no cultivo do lúpulo em ambiente protegido**. 2021. 54 f. Tese (Doutorado) - Curso de Agronomia, Irrigação e Drenagem, Universidade Estadual Paulista - Unesp/Fca, Botucatu, 2021.

SPÓSITO, M. B *et al.* A cultura do lúpulo. Piracicaba, SP: Esalq - Divisão de Biblioteca, 2019. 81 p. (**Série Produtor Rural**, 68).

SREČEC, S.; KVATERNJAK, I.; KAUČIĆ, D.; ŠPOLJAR, A.; ERHATIĆ, R. Influence of climatic conditions on accumulation of  $\alpha$ -acids in hop clones. **Agriculturae Conspectus Scientificus**, v.73, n.3, p.161-166, 2008.

STRECK, N.A.; LAGO, I.; SAMBORANHA, F.K.; GABRIEL, L.F.; SCHWANTES, A.P.; SCHONS, A. Temperatura base para aparecimento de folhas e filocrono da variedade de milho BRS Missões.

TAIZ L. *et al.* **Fisiologia vegetal**. 6 ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

TERAMOTO, E.T.; ESCOBEDO, J.F. Evolução diurna e anualda frequência das coberturas de céu em Botucatu/SP. **Energia na agricultura**, v. 27, n. 1, p. 37-52, 2012.

TRENTIN, R.; HELDWEIN, A.B.; STRECK, N.A.; TRENTIN, G.; SILVA, J.C. da. Subperíodos fenológicos e ciclo da soja conforme grupos de maturidade e datas de semeadura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.48, p.703-713, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/s0100-204x2013000700002>.

VILLA NOVA, N. A. *et al.* **Estimativa de graus-dia acumulados acima de qualquer temperatura base, em função das temperaturas: máximas e mínima**. 1. ed. São Paulo: Universidade de São Paulo- Instituto de Geografia, 1972. 8 p. (Caderno de Ciências da Terra, 30).

YANG S.; LOGAN J.; COFFEY D.L. Mathematical formulae for calculating the base temperature for growing degree days. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 75, p. 61-74, 1995.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo possibilitou caracterizar as condições meteorológicas em cada estádio e safras, bem como as associações entre as variáveis agrometeorológicas analisadas e a produtividade em cada safra e possivelmente a qualidade dos cones. A partir da PCA, foi possível observar melhor a dinâmica de interação entre as diferentes variáveis e expandir a capacidade de visualização dessas correlações.

Além disso, a ferramenta de acúmulo térmico pode ser uma forma simples de identificar melhores épocas de manejos específicos da cultura como poda e colheita, auxiliando no planejamento agrícola. Em cultivo irrigado, dar preferência para podar as plantas, visando que os estádios de crescimento vegetativo e posteriormente de desenvolvimento reprodutivo não coincidam com épocas de elevadas temperaturas.

Espera-se que este estudo, ao analisar diferentes variáveis meteorológicas para as condições de Botucatu/SP, possa auxiliar outros pesquisadores na busca de melhores definições de como essas variáveis se correlacionam com a cultura do lúpulo e na determinação de temperaturas basais inferior e superior da cultura mais adequadas com as condições climáticas brasileira.

## REFERÊNCIAS

FERREIRA, D. F. **Estatística Multivariada**. Lavras: Editora UFLA. 2008. 662p.

PEDRO-JÚNIOR, M.J.; SENTELHAS, P.C. Clima e produção. In: C.V. POMMER, ed. **Uva**: tecnologia de produção, pós-colheita, mercado. Porto Alegre: Cinco Continentes, p. 63-107. 2003.

VIALI, L. **Série estatística multivariada**: texto I. Porto Alegre: PUC-RS, 2015.