



UNIVERSIDADE
ESTADUAL de LONDRINA

NATHALIA RODRIGUES LELES

**CULTIVARES DE LÚPULO EM SAFRAS SUCESSIVAS COM
ILUMINAÇÃO SUPLEMENTAR ARTIFICIAL EM CLIMA
SUBTROPICAL**

NATHALIA RODRIGUES LELES

**CULTIVARES DE LÚPULO EM SAFRAS SUCESSIVAS COM
ILUMINAÇÃO SUPLEMENTAR ARTIFICIAL EM CLIMA
SUBTROPICAL**

Tese de Doutorado apresentada ao
Departamento de Agronomia da Universidade
Estadual de Londrina, como requisito parcial à
obtenção do título de Doutora em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Sergio Ruffo Roberto
Co-orientador: Prof. Dr. Alessandro Jefferson
Sato

Londrina
2026

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

LELES, Nathalia Rodrigues.

Cultivares de lúpulo em safras sucessivas com iluminação suplementar artificial em clima subtropical / Nathalia Rodrigues LELES. - Londrina, 2026.
100 f. : il.

Orientador: Sergio Ruffo Roberto.

Coorientador: Alessandro Jefferson Sato.

Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2026.
Inclui bibliografia.

1. Humulus lupulus L. - Tese. 2. Lupulina - Tese. 3. Luz Led - Tese. 4. Fotoperíodo - Tese. I. Roberto, Sergio Ruffo . II. Sato, Alessandro Jefferson. III. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. IV. Título.

CDU 63

NATHALIA RODRIGUES LELES

CULTIVARES DE LÚPULO EM SAFRAS SUCESSIVAS COM ILUMINAÇÃO SUPLEMENTAR ARTIFICIAL EM CLIMA SUBTROPICAL

Tese de Doutorado apresentada ao
Departamento de Agronomia da Universidade
Estadual de Londrina, como requisito parcial à
obtenção do título de Doutora em Agronomia.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alessandro Jefferson Sato
Universidade Federal do Paraná – UFPR

Prof. Dr. Filipe Pereira Giardini Bonfim
Universidade Estadual Paulista – UNESP

Prof. Dr. Robson Fernando Missio
Universidade Federal do Paraná – UFPR

Prof. Dr. Fabio Pinto Gomes
Universidade Estadual de Santa Cruz – UESC

Dr. Fabiano de Carvalho Balieiro
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – Embrapa

Londrina, 25 de fevereiro de 2026.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primordialmente, a Deus, por sua infinita graça ao renovar minhas forças e por me guiar com a serenidade necessária para enfrentar as complexidades, acadêmicas e pessoais, destes últimos anos.

À Universidade Estadual de Londrina, ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia e à CAPES, pela excelência na formação profissional, pelo suporte técnico-científico fundamental e pela concessão da bolsa de estudos, fundamentais para a conclusão deste trabalho.

Ao meu orientador e professor Dr. Sergio Ruffo Roberto, pelo rigor científico e pela orientação sempre precisa. Minha profunda gratidão por sua sensibilidade e compreensão diante dos desafios enfrentados.

À Universidade Federal do Paraná (UFPR), pela parceria institucional que viabilizou o desenvolvimento desta pesquisa.

Ao meu co-orientador Dr. Alessandro Jefferson Sato, que acompanhou cada etapa da minha formação com excelência técnica e um olhar humano singular. Minha profunda gratidão por sua sensibilidade e compreensão diante dos desafios enfrentados.

Ao viveiro Lupulos Ninkasi pela valiosa parceria e pelo fornecimento das mudas que integraram este estudo.

Ao grupo de pesquisa LUPA, pela cooperação e disposição fundamental na obtenção dos dados que viabilizaram este estudo.

Aos membros da comissão examinadora, pela disponibilidade e pelas valiosas contribuições a este trabalho.

À minha família, por serem a razão de toda a minha perseverança. Ao meu marido, Luiz Gustavo L. Vilvert, agradeço por acreditar nos meus sonhos desde o início e por ser o suporte fiel que viabilizou este doutorado. Aos meus filhos, Josué L. Vilvert e Isaac L. Vilvert, agradeço por despertarem em mim força e resiliência, colorindo com pureza os dias cinzentos desta caminhada.

Aos meus pais, Esmeraldo M. Leles e Lucineia A. R. Leles, e aos meus sogros, Luiz Antonio Vilvert e Marcia A. R. L. Vilvert, pela valiosa rede de amor e cuidado que formaram permitindo que eu conciliasse a vida acadêmica e familiar com serenidade.

Enfim, agradeço a todos aqueles que, com apoio, amizade ou orações, auxiliaram em minha formação e na conclusão desta etapa.

LELES, Nathalia Rodrigues. **Cultivares de lúpulo em safras sucessivas com iluminação suplementar artificial em clima subtropical**. 2026. 100 f. Tese de Doutorado (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2026.

RESUMO

O presente estudo objetivou caracterizar o crescimento vegetativo, a fenologia, o rendimento produtivo e a qualidade tecnológica de cones de cultivares de lúpulo (*Humulus lupulus* L.) cultivadas em safras sucessivas sob iluminação suplementar (artificial) em região de clima subtropical. O experimento foi realizado em Palotina, Paraná, Brasil (24° S) durante as safras de verão (2023-2024), inverno (2024) e outono (2024-2025). As seguintes cultivares de lúpulo foram avaliadas: a) Alpharoma; b) Cascade; c) Chinook; d) Comet; e) Dr Rudi; f) Hallertau Magnum; g) Hallertau Mittelfruher; h) Nugget; i) Saaz; j) Smooth; k) Sorachi Ace; l) Southern Cross; m) Triple Pearl; n) Yakima Gold; o) Zeus. Foram avaliados o crescimento e a duração dos estádios fenológicos das plantas, o rendimento produtivo e a qualidade tecnológica dos cones. A temperatura do ar foi o principal fator modulador do crescimento vegetativo e da fenologia. As respostas das cultivares às oscilações térmicas foram distintas: na safra de verão (2023-2024) as cultivares Cascade e Hallertau Magnum apresentaram-se como precoces, na safra de inverno (2024) foram as cultivares Chinook, Nugget, Saaz e Zeus, enquanto na safra de outono (2024-2025) foram Dr Rudi, Sorachi Ace e Zeus. O desempenho produtivo e qualitativo dos cones também demonstrou suscetibilidade sazonal, com destaque para Cascade, Hallertau Magnum e Sorachi Ace (Verão), Chinook, Comet, Sorachi Ace e Zeus (Inverno), e Chinook, Sorachi Ace e Zeus (Outono). A análise integrada das três safras revelou que, no crescimento das plantas, a cultivar Sorachi Ace manteve um padrão uniforme e estável, independente das variações sazonais. Para o potencial produtivo e a composição química, Chinook, Sorachi Ace e Zeus evidenciaram estabilidade relativa entre os ciclos. Conclui-se que, apesar da variabilidade sazonal, a produção de lúpulo em safras sucessivas foi viável em condições subtropicais sob regime de iluminação suplementar.

Palavras-chave: *Humulus lupulus* L.; Lupulina; Luz LED; Fotoperíodo; Cerveja

LELES, Nathalia Rodrigues. **Hop cultivars in successive season with supplemental artificial lighting in a subtropical climate.** 2026. 100 p. Doctoral Thesis (PhD in Agronomy) - State University of Londrina, Londrina, 2026.

ABSTRACT

The present study aimed to characterize the vegetative growth, phenology, yield performance, and technological quality of hop cones (*Humulus lupulus* L.) from cultivars grown in successive seasons under supplemental (artificial) lighting in a subtropical climate region. The experiment was conducted in Palotina, Paraná, Brazil (24°S) during the summer (2023–2024), winter (2024), and fall (2024–2025) growing seasons. The following hop cultivars were evaluated: a) Alpharoma; b) Cascade; c) Chinook; d) Comet; e) Dr. Rudi; f) Hallertau Magnum; g) Hallertau Mittelfruher; h) Nugget; i) Saaz; j) Smooth; k) Sorachi Ace; l) Southern Cross; m) Triple Pearl; n) Yakima Gold; and o) Zeus. Plant growth, the duration of phenological stages, yield, and the technological quality of the cones were assessed. Temperature was the primary factor modulating vegetative growth and phenology. Cultivar responses to thermal oscillations were distinct: in the summer season (2023–2024), Cascade and Hallertau Magnum were characterized as early-maturing; in the winter season (2024), Chinook, Nugget, Saaz, and Zeus were early-maturing; while in the fall season (2024–2025), Dr. Rudi, Sorachi Ace, and Zeus exhibited earliness. The yield performance and qualitative traits of the cones also demonstrated seasonal susceptibility, with notable performance from Cascade, Hallertau Magnum, and Sorachi Ace (Summer); Chinook, Comet, Sorachi Ace, and Zeus (Winter); and Chinook, Sorachi Ace, and Zeus (Fall). Integrated analysis across the three seasons revealed that the Sorachi Ace cultivar maintained a uniform and stable plant growth pattern, regardless of seasonal variations. Regarding yield potential and chemical composition, Chinook, Sorachi Ace, and Zeus showed relative stability across cycles. It is concluded that, despite seasonal variability, hop production in successive harvests was viable under subtropical conditions using a supplemental lighting regime.

Keywords: *Humulus lupulus* L.; Lupulin; LED light; Photoperiod; Beer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tricomas glandulares que armazenam e secretam a lupulina nos cones de lúpulo: (A) Corte longitudinal com presença de lupulina na base das brácteas; (B) Imagem de microscopia dos tricomas glandulares de lupulina (Nagel et al., 2008)	15
Figura 2 – Distribuição geográfica e área produtiva em hectares dos Estados produtores de lúpulo no mapa do Brasil	19
Figura 3 – Condução de plantas de lúpulo em treliça alta de 5,5 m em Palotina, PR. (A) Sistema de condução em V; (B) plantas de lúpulo com desenvolvimento vegetativo completo	21
Figura 4 – Representação dos estádios fenológicos do lúpulo conforme a escala de BBCH (adaptada de Robbauer et al., 1995, Leles et al., 2023)	24
Figura 5 – Densidade de Fluxo de Irradiância (mw.m^{-2}) das lâmpadas LED Philips Green Power DR/W	28

ARTIGO A

Figura 3.1 – Temperaturas máximas, médias e mínimas do ar e precipitação mensal para Palotina, PR, em 2023, 2024 e 2025	44
Figura 3.2 – Desenvolvimento da altura das plantas (m) de cultivares de lúpulo nas safras de verão de 2023-2024, inverno de 2024 e outono de 2024-2025.	50
Figura 3.3 – Taxas de crescimento das plantas ($\text{HGR} - \text{mm GDDs}^{-1}$) de cultivares de lúpulo nas safras de verão de 2023-2024, inverno de 2024 e outono de 2024-2025	55
Figura 3.4 – Duração em dias dos principais estágios fenológicos das plantas de cultivares de lúpulo nas safras de verão de 2023-2024, inverno de 2024 e outono de 2024-2025. PO: Poda; BR: Brotação; CR: Desenvolvimento Foliar e Crescimento do Ramo Principal; RL: Formação de Ramos Laterais; EI: Emergência das Inflorescências; FL: Floração; DC: Desenvolvimento e Maturação dos Cones; CO: Colheita.	62

ARTIGO B

- Figura 4.1** – Temperaturas máximas, médias e mínimas do ar e precipitação mensal para Palotina, PR, em 2023, 2024 e 202573
- Figura 4.2** – Análise de componentes principais (PCA) para número de cones por ramo lateral (NCR), número de cones por planta (NCP), massa fresca do cone (MC), comprimento do cone (CC), largura do cone (LC), produção de cones fresco por planta (ProdP), produtividade estimada (Prod), teor de alfa-ácido (AA), teor de beta-ácido (BA) e concentração de óleos essenciais (OE) para as cultivares de lúpulo nas safras de verão de 2023-2024, inverno de 2024 e outono de 2024-2025.92
- Figura 4.3** – Heatmap elaborado a partir da análise de correlação e agrupamento hierárquico para número de cones por ramo lateral (NCR), número de cones por planta (NCP), massa fresca do cone (MC), comprimento do cone (CC), largura do cone (LC), produção de cones fresco por planta (ProdP), produtividade estimada (Prod), teor de alfa-ácido (AA), teor de beta-ácido (BA) e concentração de óleos essenciais (OE) para as cultivares de lúpulo nas safras de verão de 2023-2024, inverno de 2024 e outono de 2024-2025. RP= Componentes de rendimento produtivo; QT= Qualidade tecnológica ...95

LISTA DE TABELAS

ARTIGO A

Tabela 3.1 – Modelo de regressão para altura da planta (Ht - Gompertz), R^2 e p-valor dos parâmetros de cultivares de lúpulo nas safras de verão de 2023-2024, inverno de 2024 e outono de 2024-2025.	48
Tabela 3.2 – Modelo de regressão para taxa de crescimento (HGR - Gauss), R^2 e p-valor dos parâmetros de cultivares de lúpulo nas safras de verão de 2023-2024, inverno de 2024 e outono de 2024-2025.....	54
Tabela 3.3 – Estágios de crescimento de acordo com os intervalos de HGRs (mm GDDs ⁻¹) e duração em dias de cada estágio do crescimento de cultivares de lúpulo nas safras de verão de 2023-2024, inverno de 2024 e outono de 2024-2025.	55
Tabela 3.4 – Massa fresca das plantas e número de ramos laterais por planta de cultivares de lúpulo nas safras de verão de 2023-2024, inverno de 2024 e outono de 2024-2025.	59

ARTIGO B

Tabela 4.1 – Número de cones por ramo lateral e número de cones por planta de cultivares de lúpulo nas safras de verão de 2023-2024, inverno de 2024 e outono de 2024-2025.	78
Tabela 4.2 – Massa fresca do cone de cultivares de lúpulo nas safras de verão de 2023-2024, inverno de 2024 e outono de 2024-2025.....	80
Tabela 4.3 – Comprimento e largura do cone de cultivares de lúpulo nas safras de verão de 2023-2024, inverno de 2024 e outono de 2024-2025.....	82
Tabela 4.4 – Produção de cones fresco por planta e produtividade estimada de cultivares de lúpulo nas safras de verão de 2023-2024, inverno de 2024 e outono de 2024-2025.	83
Tabela 4.5 – Teores de alfa- e beta-ácidos de cultivares de lúpulo nas safras de verão de 2023-2024, inverno de 2024 e outono de 2024-2025.....	87
Tabela 4.6 – Concentração de óleos essenciais em cultivares de lúpulo nas safras de verão de 2023-2024, inverno de 2024 e outono de 2024-2025.....	88

SUMÁRIO

	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	15
2.1	IMPORTÂNCIA ECONÔMICA DO CULTIVO DE LÚPULO	15
2.2	CULTIVO DE LÚPULO NO BRASIL	16
2.3	A PLANTA DE LÚPULO	20
2.3.1	Propriedades Químicas do Lúpulo	22
2.3.2	Fenologia da Planta de Lúpulo.....	24
2.4	EXIGÊNCIAS CLIMÁTICAS	25
2.4.1	Fotoperíodo.....	25
2.4.2	Temperatura do Ar	29
2.4.3	Disponibilidade Hídrica.....	30
2.5	PRODUÇÃO EM MAIS DE UMA SAFRA ANUAL	31
2.6	REFERÊNCIAS.....	32
3	ARTIGO A - CRESCIMENTO VEGETATIVO E FENOLOGIA DE CULTIVARES DE LÚPULO EM SAFRAS SUCESSIVAS COM ILUMINAÇÃO SUPLEMENTAR ARTIFICIAL EM CLIMA SUBTROPICAL	39
3.1	RESUMO	39
3.2	INTRODUÇÃO	41
3.3	MATERIAL E MÉTODOS.....	42
3.3.1	Descrição da Área Experimental e Experimento.....	42
3.3.2	Avaliação das Cultivares de Lúpulo	45
3.3.2.1	Crescimento Vegetativo.....	45
3.3.2.2	Fenologia.....	46
3.3.3	Análise Estatística	46
3.4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
3.4.1	Crescimento Vegetativo	47
3.4.2	Fenologia	61
3.5	CONCLUSÃO.....	65
3.6	REFERÊNCIAS.....	66
4	ARTIGO B – RENDIMENTO PRODUTIVO E QUALIDADE TECNOLÓGICA DE CONES DE CULTIVARES DE LÚPULO EM SAFRAS SUCESSIVAS COM SUPLEMENTAÇÃO ARTIFICIAL DE LUZ EM CLIMA SUBTROPICAL.....	69

4.1	RESUMO	69
4.2	INTRODUÇÃO	71
4.3	MATERIAL E MÉTODOS.....	72
4.3.1	Descrição da Área Experimental e Manejo da Cultura de Lúpulo	72
4.3.2	Avaliação das Cultivares de Lúpulo	74
4.3.2.1	Rendimento produtivo.....	75
4.3.2.2	Qualidade Tecnológica dos Cones.....	75
4.3.3	Análises Estatísticas	76
4.4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	77
4.4.1	Rendimento Produtivo.....	77
4.4.2	Qualidade Tecnológica dos Cones	86
4.4.3	Análises Multivariadas.....	90
4.5	CONCLUSÃO.....	96
4.6	REFERÊNCIAS.....	96

1 INTRODUÇÃO

O lúpulo (*Humulus lupulus* L.) é uma planta perene pertencente à ordem Rosales, à família Cannabaceae e ao gênero *Humulus* (Wang et al., 2021). O gênero *Humulus* é composto por três espécies, *Humulus lupulus*, *Humulus japonicus* e *Humulus yunnanensis*, sendo *H. lupulus* a única espécie que produz inflorescências femininas contendo tricomas glandulares que armazenam e secretam lupulina, as quais são utilizadas na indústria cervejeira (Teghtmeyer, 2018; Campos et al., 2023). A lupulina é constituída principalmente por alfa- e beta-ácidos e óleos essenciais que conferem amargor, sabor e aroma na produção de cerveja (Campos et al., 2023; Ting; Ryder, 2017), portanto, 97% da produção mundial de lúpulo é destinada como matéria-prima na produção da bebida (Almeida; Conto, 2024; Durello; Silva; Bogusz, 2019; Righi et al., 2024).

A produção comercial de lúpulo no mundo está distribuída em uma área de 59.916 ha em 23 países (Ihgc, 2023). As maiores áreas produtivas estão concentradas na Alemanha, Estados Unidos, República Tcheca, Polônia e Eslovênia, países de clima temperado entre as latitudes 35° e 55° N ou S do Equador (Ihgc, 2023; Ruggeri et al., 2024; Jastrombek et al., 2022). Nos últimos anos, a expansão do mercado de cerveja artesanal e o surgimento da demanda por uma gama diversificada de lúpulos ao redor do mundo têm encorajado a expansão do cultivo em novas zonas climáticas, abrangendo áreas paralelas às latitudes entre 35° e 55° em ambos os hemisférios (Ruggeri et al., 2024). Essa tendência de produção impulsionou pesquisas em regiões de baixa latitude como Flórida, Estados Unidos (Agehara, 2020; Acosta-Rangel et al., 2021; Acosta-Rangel; Agehara; Rechcigl, 2024) e Paraná, Brasil (Leles et al., 2023; Leles et al., 2024; Jastrombek et al., 2022). O grande desafio para o desenvolvimento da produção de lúpulo nesses países é justamente a adaptação de cultivares às condições geográficas e climáticas locais distintas das encontradas em suas regiões de origem (Ruggeri et al., 2024).

O lúpulo é uma planta de dia curto, com fotoperíodo crítico de 16,5 h, ou seja, quando a duração da luz do dia é menor que 16,5 h o florescimento é induzido, e quando a duração da luz do dia é superior a 16,5 h, as plantas permanecem em crescimento vegetativo, em que os ramos se expandem com os ramos laterais que suportarão a colheita, acumulando biomassa, anulando o florescimento precoce e aumentando a eficiência do florescimento e a qualidade dos cones (Gutiérrez et al.,

2024; Iskra et al., 2019). Nas zonas de baixa latitude e clima subtropical como Flórida, EUA e Paraná, Brasil, o fotoperíodo é sempre indutivo, pois a duração máxima do dia encontrada é de 14 h de luz, consecutivamente, o crescimento vegetativo e a produção de cones são afetados em decorrência do momento da floração (Gutiérrez et al., 2024; Jastrombek et al., 2022).

A suplementação artificial de luz para complementar o fotoperíodo diário durante o crescimento das plantas tem sido utilizado como estratégia para driblar essa limitação climática (Acosta-Rangel; Agehara; Rechcigl, 2024; Leles et al., 2024). Resultados de pesquisa indicam que, ao complementar o fotoperíodo, as plantas apresentam crescimento vegetativo completo atingindo a altura máxima da treliça de sustentação, e têm a floração induzida somente ao desligar a iluminação, permitindo que as plantas apresentem alta capacidade de rendimento produtivo em mais de uma safra ao ano (Acosta-Rangel; Agehara; Rechcigl, 2024; Leles et al., 2023).

A possibilidade de safras sucessivas em climas subtropicais tende a impulsionar a cadeia produtiva do lúpulo em novas regiões, contrastando com as práticas tradicionais de clima temperado que permitem apenas uma safra (Guimarães et al., 2021). No Brasil, a produção em mais de uma safra anual é possível pela ausência de invernos rigorosos, o que proporciona condições favoráveis ao desenvolvimento completo das plantas. A plasticidade fenológica das cultivares permite uma aclimação eficiente e a produção satisfatória de cones de lúpulo ao longo do ano (Leles et al., 2024; Acosta-Rangel; Agehara; Rechcigl, 2024).

Para estabelecer uma produção de lúpulo estável e eficiente, é imprescindível o desenvolvimento de pesquisas focadas na identificação de genótipos adequados ao sistema de safras sucessivas e na determinação dos períodos mais apropriados para poda e colheita, conforme as condições edafoclimáticas regionais (Acosta-Rangel et al., 2021; Ruggeri et al., 2024). Com isso, objetivou-se com este estudo caracterizar o crescimento vegetativo, a fenologia, o rendimento produtivo e a qualidade tecnológica de cones de cultivares de lúpulo cultivadas em safras sucessivas com iluminação suplementar (artificial) em região de clima subtropical. Esta tese foi dividida em dois capítulos: a) Crescimento vegetativo e fenologia de cultivares de lúpulo em safras sucessivas com iluminação suplementar artificial em clima subtropical; e b) Rendimento produtivo e composição química de cones de cultivares de lúpulo em safras sucessivas com suplementação artificial de luz em clima subtropical.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 IMPORTÂNCIA ECONÔMICA DO CULTIVO DE LÚPULO

O lúpulo (*Humulus lupulus* L.) é uma planta perene trepadeira cujo órgão de interesse comercial são as inflorescências femininas, também chamadas de cones ou estróbilos (Campos et al., 2023). Nos cones desenvolvem os tricomas glandulares que armazenam e secretam a lupulina (Figura 1) (Rossini et al., 2021), constituída principalmente por alfa- e beta-ácidos, e óleos essenciais que conferem amargor, sabor e aroma na produção de cerveja (Campos et al., 2023; Ting; Ryder, 2017). Esses compostos químicos não são encontrados em nenhuma outra espécie vegetal, por isso o lúpulo é considerado um ingrediente essencial para a indústria cervejeira, sendo utilizado 97% da produção mundial como matéria-prima na produção da bebida (Almeida; Conto, 2024; Durello; Silva; Bogusz, 2019; Righi et al., 2024).

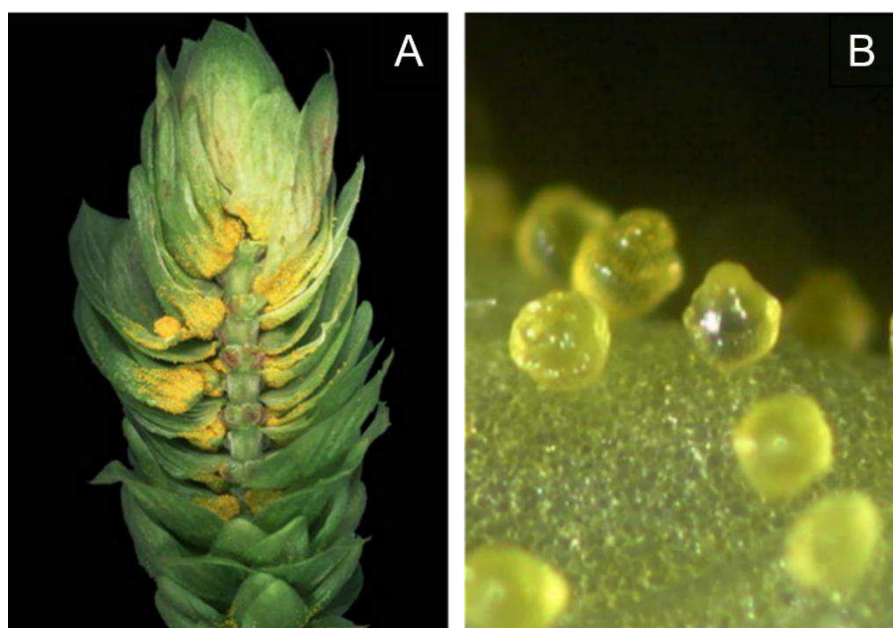


Figura 1 - Tricomas glandulares que armazenam e secretam a lupulina nos cones de lúpulo: (A) Corte longitudinal com presença de lupulina na base das brácteas; (B) Imagem de microscopia dos tricomas glandulares de lupulina (Nagel et al., 2008).

A produção comercial de lúpulo no mundo está distribuída em 23 países, em uma área de 59.916 ha que totaliza uma produção média de 118 mil toneladas de lúpulo ao ano (Ihgc, 2023). As maiores áreas produtivas estão concentradas em cinco países de clima temperado entre as latitudes 35° e 55° N ou S do Equador, sendo

20.629 ha cultivados na Alemanha, 22.268 ha nos EUA, 4.860 ha na República Tcheca, 1.728 ha na Polônia e 1.675 ha na Eslovênia, que totalizam aproximadamente 86% da produção mundial de lúpulo (Ihgc, 2023; Ruggeri et al., 2024; Jastrombek et al., 2022).

O crescimento do mercado global de cerveja artesanal e o surgimento da demanda por uma gama diversificada de lúpulos ao redor do mundo têm encorajado a expansão de novas áreas de cultivo, abrangendo áreas paralelas às latitudes entre 35° e 55° em ambos os hemisférios. Essa tendência de produção impulsionou pesquisas em países de diferentes zonas climáticas, como Sicília, Itália (Marceddu; Carrubba; Sarno, 2020, Carrubba; Marceddu; Sarno, 2022), e regiões de baixa latitude como Brasil (Leles et al., 2023; Leles et al., 2024; Jastrombek et al., 2022) e Flórida, Estados Unidos (Agehara 2020; Acosta-Rangel et al., 2021; Acosta-Rangel; Agehara; Rechcigl, 2024).

2.2 CULTIVO DE LÚPULO NO BRASIL

O Brasil, terceiro maior produtor de cerveja do mundo, produz aproximadamente 16 bilhões de litros de cerveja ao ano (Mapa, 2022; Ibge, 2020; Barthhaas, 2021), com um crescimento acumulado de novos estabelecimentos em 283,1% nos últimos dez anos (Mapa, 2024). Em consequência, o país apresenta uma elevada demanda por lúpulo que é suprida em sua quase totalidade, cerca de 4.700 t ao ano, através da importação de países como os Estados Unidos e a Alemanha (Comex, 2022).

Os primeiros relatos de tentativas frustradas do cultivo de lúpulo no Brasil foram registrados durante o século XIX. Várias tentativas isoladas foram realizadas no decorrer do tempo, todas sem obtenção de sucesso, e até recentemente acreditava-se ser inviável a produção nacional, com a justificativa de condições climáticas indevidas (Gonsaga, 2021; Almeida; Conto, 2024). A duração dos dias inferior ao fotoperíodo crítico das plantas associado ao clima subtropical do país foi considerada como barreira para a adaptação da cultura (Almeida; Conto, 2024). Somente em meados dos anos 2000, quando o número de novas cervejarias artesanais começou a expandir em todo o país, demandando matéria-prima diversa para produzir diferentes tipos de cervejas, as tentativas de cultivo do lúpulo foram retomadas no Brasil (Ruggeri et al., 2024). Um marco significativo foi a obtenção de sucesso do

cultivo na Serra da Mantiqueira no estado de São Paulo, sendo reconhecido nacionalmente como um dos primeiros cultivos de lúpulo no Brasil, em que a planta foi originada a partir do descarte de uma muda de *H. lupulus* em local rico em matéria orgânica. Posteriormente, essa planta foi multiplicada e recebeu o nome de 'Mantiqueira', despertando o interesse pela produção em várias localidades do país (Almeida; Conto, 2024; Fagherazzi; Rufato, 2018). A cultivar 'Mantiqueira' perdeu sua importância no país a partir da introdução de cultivares de lúpulo da Europa e dos EUA por viveiros de lúpulo estabelecidos. Concomitantemente, foram desenvolvidas novas tecnologias de cultivo por instituições de pesquisa distribuídas pelo mundo (Arruda et al., 2021; Guimarães; Evaristo; Ghesti, 2021, Simieli et al., 2021). A demanda crescente por lúpulo associada à disponibilidade de novas tecnologias para o cultivo nacional e adaptação de cultivares internacionais foram fatores que impulsionaram o desenvolvimento de diversas pesquisas para a produção de lúpulo brasileiro (Leles et al., 2023; Müller; Marcusso, 2018; Arruda et al., 2021; Simieli et al., 2021).

Uma série de resultados promissores vem sendo encontrados quanto à adaptação do cultivo ao clima subtropical em variadas latitudes no Brasil. O desempenho fisiológico das cultivares de lúpulo Comet, Chinook, Cascade, Nugget e Columbus foi avaliado em Botucatu (23° S), São Paulo, e as plantas não sofreram limitações fisiológicas, demonstrando aclimação cultural para a região (Neves et al., 2024). A fenologia e a produtividade das cultivares de lúpulo Chinook, Columbus, Cascade e Yakima Gold foram avaliadas em Lages (27° S) e São Joaquim (28° S), Santa Catarina, e apesar dos ciclos fenológicos serem distintos entre os municípios e as cultivares, as plantas de lúpulo se desenvolveram e apresentaram produção de cones desde a primeira colheita agrícola (Fagherazzi et al., 2023). O potencial de florescimento das cultivares de lúpulo Chinook, Millenium e Northern Brewer foi avaliado em Lavras (21° S), Minas Gerais, e as plantas foram capazes de desenvolver flores em qualquer época do ano sob fotoperíodo indutivo floral (abaixo de 16,5 h), no entanto, o florescimento ocorreu de maneira dispersa, levando a menor produção de cones (Gutiérrez et al., 2024).

O uso de iluminação artificial para complementar o fotoperíodo diário e controlar o florescimento precoce das plantas foi avaliado nas cultivares de lúpulo Hallertau Mittelfruher, Mapuche, Northern Brewer, Spalter e Yakima Gold em Palotina (24° S), Paraná, e as plantas apresentaram alta capacidade de rendimento produtivo (Leles et

al., 2023). Além disso, a suplementação luminosa possibilitou o cultivo de lúpulo em duas safras anuais em Palotina (24° S), Paraná, sendo a primeira safra durante a primavera e verão e a segunda durante o outono e inverno, alcançando em ambas rendimento produtivo e qualidade de cones satisfatórios (Leles et al., 2024). Ao comparar a qualidade do lúpulo brasileiro aos produtos importados, observaram-se características distintas em termos de amargor e aroma, considerado como matéria-prima de alta qualidade que leva a produção de cervejas com tipicidade local (Almeida et al., 2020).

Simultâneo ao desenvolvimento de pesquisas com o cultivo de lúpulo, foi fundada a Associação Brasileira dos Produtores de Lúpulo, Aprodúpulo, no ano de 2018, com o objetivo de reunir informações e promover o cultivo no país. Um levantamento realizado em 2023 pela Aprodúpulo evidenciou que o cultivo do lúpulo brasileiro está distribuído em 13 estados brasileiros de diferentes latitudes e condições climáticas que totalizam aproximadamente 112 hectares cultivados e 88 toneladas de lúpulo ao ano (Figura 2) (Aprodúpulo, 2023). As maiores regiões produtivas estão localizadas no sudeste e sul do país, distribuídas em 97,8 ha que produzem 81 t de lúpulo (Aprodúpulo, 2023; Ruggeri et al., 2024; Jastrombek et al., 2022). Geralmente as iniciativas de cultivo se estabelecem em regiões que apresentam concentração de cervejarias artesanais (Rufato; Fagherazzi, 2019; Guimarães; Evaristo; Ghesti, 2021).

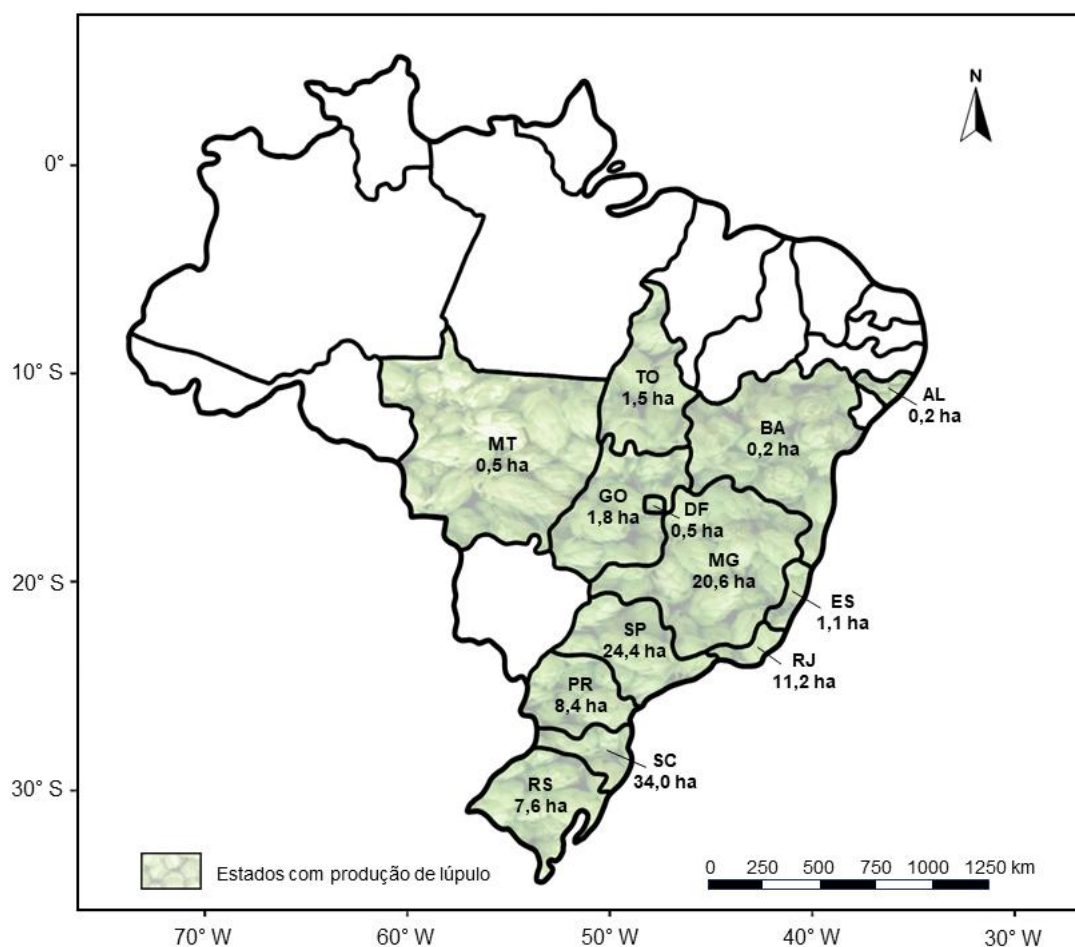


Figura 2 - Distribuição geográfica e área produtiva em hectares dos Estados produtores de lúpulo no mapa do Brasil.

Existem no Brasil 17 viveiros cadastrados no Registro Nacional de Sementes e Mudanças (RENASEM) para comercialização de mudas de lúpulo, entre os quais destacam-se: Ninkasi, Hops Brasil e Van de Bergen, que atuaram desde o início do desenvolvimento da cadeia produtiva, proporcionando o fornecimento de mudas femininas de diferentes cultivares de alta qualidade genética (Mapa, 2022).

Segundo o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, existem 48 cultivares de lúpulo registradas no Brasil, podendo estas possuir certificado de origem genética ou não (Mapa, 2022). Em 2023, em um levantamento realizado nas áreas produtivas nacionais, foram contabilizadas 44 cultivares em produção, sendo as mais produzidas Comet (31,6%), Cascade (24,1%), Saaz (11,1%), Chinook (6,4%) e Zeus (5,2%) (Aprolúpulo, 2023), no entanto, várias outras cultivares foram introduzidas recentemente e sua área de desempenho está sob avaliação.

2.3 A PLANTA DE LÚPULO

O lúpulo é pertencente à ordem Rosales, à família Cannabaceae e ao gênero *Humulus* (Wang et al., 2021). O gênero *Humulus* é composto por três espécies, *Humulus lupulus*, *Humulus japonicus* e *Humulus yunnanensis*, sendo *H. lupulus* a principal espécie cultivada comercialmente por apresentar produção de cones com teores de lupulina que interessam principalmente à indústria cervejeira (Teghtmeyer, 2018).

O lúpulo é uma planta trepadeira, herbácea e perene (Teghtmeyer, 2018). O órgão perene da planta de lúpulo é um caule subterrâneo conhecido como rizoma, o qual é especializado no acúmulo de substâncias de reserva e apresenta importância na formação de brotos após a dormência durante o inverno, com uma longevidade aproximada de 14 anos (Spósito et al., 2019; Gutiérrez et al., 2024). Os brotos formados a partir do rizoma se transformam em guias trepadoras, que sobem no sentido horário em torno de uma estrutura de sustentação com a ajuda de seus tricomas robustos voltados para baixo (Korpelainen; Pietiläinen, 2021). Os ramos de lúpulo têm forte dominância apical e apresentam crescimento indefinido e rápido, com um pico de crescimento de até 25 cm por dia (Fagherazzi, 2020; Jastrombek et al., 2022). As folhas são dispostas em pares de forma oposta aos nós, e se caracterizam como pecioladas, com 3 a 5 lóbulos com margens serrilhadas (Korpelainen; Pietiläinen, 2021; Spósito et al., 2019). As plantas de lúpulo cultivadas comercialmente são tutoradas para crescer em treliças altas, normalmente de 5 a 6 m de altura, sendo tutoradas em diferentes materiais, como fios de sisal ou de algodão (Figura 3) (Jastrombek et al., 2022).



Figura 3 - Condução de plantas de lúpulo em treliça alta de 5,5 m em Palotina, PR. (A) Sistema de condução em V; (B) plantas de lúpulo com desenvolvimento vegetativo completo.

O lúpulo é uma planta dióica, ou seja, desenvolve flores masculinas ou femininas em plantas distintas (Teghtmeyer, 2018). Somente as flores produzidas em plantas femininas de lúpulo interessam na fabricação de cerveja, pois apresentam o desenvolvimento de cerca de 10.000 ou mais glândulas de lupulina (Agehara, 2020; Dodds, 2017). A lupulina se desenvolve em tricomas glandulares na base das brácteas dos cones de lúpulo. Esse composto é constituído por resinas, óleos essenciais, proteínas, polifenóis, lipídios, ceras, celulose e aminoácidos (Durello et al., 2019). No entanto, o valor do lúpulo para indústria cervejeira é atribuído principalmente aos ácidos amargos de lúpulo e aos óleos essenciais, que conferem amargor, sabor e aroma à cerveja (Rossini et al., 2021).

As flores masculinas produzem pólen para fertilizar as flores femininas para produção de sementes, e caem do caule logo após a disseminação do pólen. Uma planta fertilizada pode produzir mais cones por ramo e, portanto, mais lupulina, no entanto, os cervejeiros preferem cones não fertilizados e sem sementes, pois as sementes podem atribuir à cerveja sabores, aroma e amargor indesejados (Teghtmeyer, 2018). Por esta razão, as plantas femininas são multiplicadas em escala comercial para a produção de lúpulo, enquanto as masculinas são utilizadas somente no melhoramento genético para o desenvolvimento de novas cultivares em cruzamentos controlados (Liberatore et al., 2019).

2.3.1 Propriedades Químicas do Lúpulo

O lúpulo é o ingrediente mais versátil da cerveja, contribuindo com inúmeros atributos à bebida por meio de seus compostos químicos (Ting; Ryder, 2017).

Os ácidos amargos conhecidos como precursores do amargor da cerveja, são divididos em alfa-ácidos (humulonas) e beta-ácidos (lupulonas). Juntos esses compostos podem corresponder de 5 a 21% da massa total do cone de lúpulo em base seca (Durello et al., 2019).

Os alfa-ácidos são compostos por cinco isômeros de humulona (humulona, cohumulona, ad-humulona e análogos). A atribuição do sabor amargo à cerveja ocorre devido a isomerização dos compostos em iso-alfa-ácidos ou isohumulonas, durante a fervura do mosto, sob condições de altas temperaturas (Danenhowe et al., 2008; De Keukeleire et al., 2003). Além disso, esses compostos podem atuar como agentes bacteriostáticos, favorecendo a ação das leveduras durante o processo de fermentação e inibindo a ação de algumas bactérias (Rufato; Fagherazzi, 2019).

Os beta-ácidos são compostos por cinco isômeros da lupulona (lupulona, colupulona, ad-lupulona e análogos). Ao contrário dos alfa-ácidos, a influência dos beta-ácidos no amargor final da cerveja é significativamente menor. Isso ocorre porque, em vez de serem isomerizados durante a fervura do mosto, esses compostos são primariamente oxidados (Danenhowe et al., 2008). Em contrapartida à sua baixa influência no amargor, os beta-ácidos possuem importantes atividades biológicas (Karabín et al., 2016). Destaca-se seu potencial papel na atividade antimicrobiana da cerveja (Knez Hrnčič et al., 2019), contribuindo para a estabilidade microbiológica da bebida.

Os óleos essenciais constituem a fração mais volátil e aromática das cultivares de lúpulo. São eles os principais responsáveis por conferir a ampla variedade de aromas e sabores à cerveja, exercendo um forte impacto sensorial na qualidade final da bebida (Ting; Ryder, 2017; Inui et al., 2013).

A maior fração dos óleos essenciais do lúpulo (entre 50 e 80%) é composta por hidrocarbonetos, seguidos pelos compostos oxigenados (cerca de 30%) e, em menor quantidade, pelos compostos que contêm enxofre. Entre os hidrocarbonetos, o beta-mirceno é frequentemente o composto majoritário, contribuindo com notas de aroma herbáceo, verde fresco e cítrico (Durello et al., 2019). Além do beta-mirceno, os sesquiterpenos mais abundantes são o alfa-humuleno (com notas amadeiradas), o

beta-cariofileno (amadeirado e especiarias) e o beta-farneseno (amadeirado, cítrico e doce). Em conjunto, esses quatro terpenos essenciais podem constituir uma proporção significativa, variando entre 57% a 82% do teor de muitos óleos essenciais de lúpulo (Kowalska et al., 2022). Contudo, devido à sua baixa solubilidade em água e alta volatilidade, a maior parte desses hidrocarbonetos é rapidamente volatilizada e perdida durante a fervura do mosto. Por essa razão, eles tendem a impactar menos o aroma final da cerveja quando comparados aos compostos oxigenados, que são mais solúveis e voláteis (Durello et al., 2019).

A segunda maior classe de compostos voláteis dos óleos essenciais é a dos compostos oxigenados, que inclui alguns dos constituintes aromáticos mais importantes na cerveja final devido à sua maior retenção durante o processo de fervura. Entre os mais abundantes e relevantes estão os álcoois terpênicos linalol (aroma floral-frutado com teores $\leq 1,9\%$), o geraniol (notas de rosa e gerânio), o óxido de cariofileno (doce, frutado, amadeirado e herbal), epóxido de humuleno I (notas de aroma de feno), epóxido de humuleno II (cedro e mofado) e epóxido de humuleno III (cedro) (Durello et al., 2019).

A classe dos compostos contendo enxofre representa a menor porcentagem da constituição dos óleos essenciais do lúpulo. No entanto, por possuírem aromas intensos e limiares de percepção muito baixos, seus constituintes impactam o perfil sensorial. Eles podem conferir à cerveja notas agradáveis, como as de trufa, fornecidas pelo S-metil-2-metil tiobutanoato, ou notas herbais e frutadas (abacaxi), como as do S-metil tiohexanoato, ou desagradáveis, como os de groselha preta ou urina de gato, associados ao 4-mercapto-4-metilpentan-2-ona (4MMP) (Durello et al., 2019).

A concentração de alfa- e beta-ácidos, e óleos essenciais pode ser influenciada por inúmeros fatores, como a genética da cultivar, as condições ambientais impostas ao cultivo, as práticas de manejo adotadas, o desempenho agrônômico das plantas, a época de colheita e o processamento pós-colheita (Rodolfi et al., 2019; Leles et al., 2023). A complexa interação entre o genótipo da planta e o ambiente provoca diversos perfis de qualidade entre as regiões de cultivo, causando uma tipicidade de amargor e aroma na matéria-prima a ser utilizada pela indústria cervejeira conhecida como "*terroir*" (Rodolfi et al., 2019; Leles et al., 2023; Ruggeri et al., 2024).

2.3.2 Fenologia da Planta de Lúpulo

As plantas de lúpulo passam por duas fases durante o seu crescimento, a vegetativa e a reprodutiva. O desenvolvimento fenológico do lúpulo pode ser dividido nos seguintes estádios principais: brotação; desenvolvimento foliar e crescimento do ramo; formação de ramos laterais; emergência de inflorescências; floração; desenvolvimento dos cones; e maturação dos cones (Figura 4) (Robbauer et al., 1995).

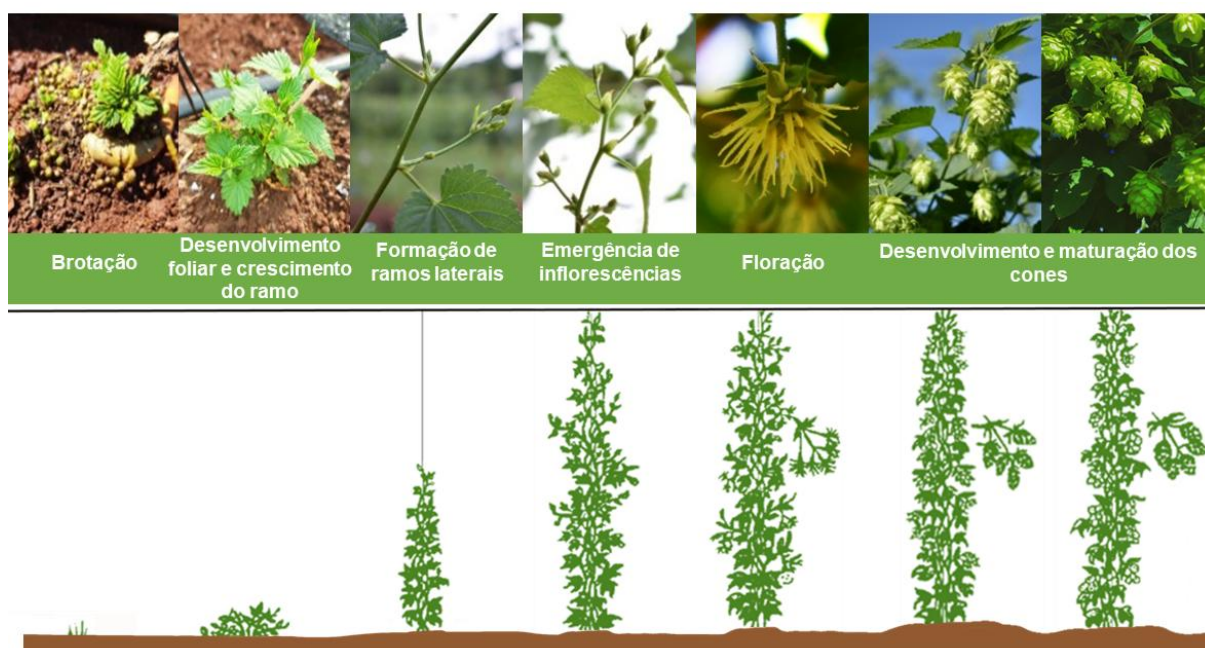


Figura 4 - Representação dos estádios fenológicos do lúpulo conforme a escala de BBCH (adaptada de Robbauer et al., 1995, Leles et al., 2023).

Em regiões tradicionais de cultivo, com condições de clima temperado, as plantas de lúpulo passam por um período de inatividade aproximado de 6 meses durante o inverno. O crescimento vegetativo inicia-se na primavera, com a elevação da temperatura do ar e segue durante todo o verão. No fim do verão e início do outono, quando os dias ficam mais curtos e com menor fotoperíodo, o crescimento vegetativo cessa e as primeiras estruturas reprodutivas começam a se desenvolver, o que é seguido por um desenvolvimento muito rápido de crescimento dos cones durante pelo menos um mês. No início do outono, os nutrientes são translocados para o rizoma, e como consequência, a parte aérea perece (Robbauer et al., 1995).

Em regiões emergentes com condições de clima subtropical, o período de inatividade nas plantas de lúpulo em decorrência do inverno severo não acontece. Em

condições de fotoperíodo inferior a 14 h de luz durante o desenvolvimento vegetativo, a floração geralmente é induzida precocemente, e essa fase se prolonga por um período três vezes maior que o período típico de floração em clima temperado. Nessas condições, também se observa a ocorrência de estágios fenológicos distintos ocorrendo simultaneamente, como a formação de ramos laterais, o desenvolvimento de novas flores e a senescência dos cones (Acosta-Rangel et al., 2021). Em contrapartida, ao fornecer 17 h de fotoperíodo durante o desenvolvimento vegetativo com uso de suplementação luminosa artificial em região de clima subtropical, as fases fenológicas das plantas são ordenadas, com o início da estação apresentando somente crescimento vegetativo até atingirem a altura máxima da treliça de sustentação. Ao desligar a iluminação e reduzir o fotoperíodo, a floração das plantas acontece de forma rápida e sincronizada, e os cones de lúpulo amadurecem praticamente ao mesmo tempo (Leles et al., 2023). O crescimento vegetativo completo antes da diferenciação das flores é considerado fundamental para obter altos rendimentos produtivos, por isso, o ideal é que se encontre uma forma de controlar o florescimento precoce, seja por condições naturais ou artificiais (Rossini et al., 2021; Leles et al., 2023).

2.4 EXIGÊNCIAS CLIMÁTICAS

2.4.1 Fotoperíodo

O fotoperíodo é um dos principais elementos climáticos que influenciam no desenvolvimento das plantas de lúpulo, sendo estas classificadas como plantas de dia curto (Jastrombek, et al., 2022; Agehara, 2020). A duração do dia é considerada como uma indicação ambiental para o controle do florescimento nas plantas de lúpulo (Agehara, 2020), no entanto, é a duração ininterrupta da escuridão que regula o florescimento. O fotoperíodo biológico percebido pelas plantas é o período do nascer ao pôr do sol, mais aproximadamente 30 a 40 minutos para contabilizar o crepúsculo (Whitman et al., 1998). Para plantas de dia curto, o florescimento ocorre apenas quando o fotoperíodo é menor que uma determinada duração, essa duração é conhecida como "fotoperíodo crítico". Para as plantas de lúpulo o fotoperíodo crítico é de 16,5 h, ou seja, quando a duração da luz do dia é menor que 16,5 h o florescimento é induzido, e quando a duração da luz do dia é superior a 16,5 h, as plantas

permanecem em crescimento vertical, os ramos se expandem com os ramos laterais que suportarão a colheita, acumulando biomassa, anulando o florescimento precoce e aumentando a eficiência do florescimento e a qualidade dos cones (Gutiérrez et al., 2024; Iskra et al., 2019; Agehara, 2020).

A regulação da floração é controlada pelo balanço entre promotores e inibidores de florescimento que são produzidos a partir do estímulo fotoperiódico nas folhas. A percepção da luz é realizada pelos fotorreceptores das plantas, incluindo fitocromos, criptocromos e fitotropinas. No geral, a promoção da resposta de plantas ao fotoperíodo ocorre de acordo com a qualidade da luz e a interação dos fitocromos e criptocromos. Os criptocromos são receptores de luz azul com papel desconhecido na regulação da floração nas plantas de lúpulo, mas na planta modelo *Arabidopsis* esse receptor influencia o ritmo circadiano das plantas e interage com o fitocromo para influenciar a floração (Harshitha et al., 2021; Runkle; Lopes; Fisher, 2017). Os receptores fitocromos existem sob duas formas reversíveis, a forma que responde a luz vermelha (Pr) e a que responde a luz vermelha distante (Pfr). A Pr constitui a forma de proteína que absorve a radiação na faixa 660 nm de comprimento de onda, e a Pfr é a forma fisiologicamente ativa do pigmento, e absorve a radiação na faixa de 730 nm. Em plantas de dia curto, quando expostas à luz solar ou artificial, ocorre a conversão de Pr em Pfr pela absorção de luz vermelha que ativa os genes inibidores de floração, no escuro, a conversão de Pfr em Pr ocorre pela absorção de luz vermelha distante que reprime os inibidores das flores, induzindo o florescimento. Portanto, a forma vermelha distante é a que inibe a floração em plantas de dias curtos, promovendo o crescimento vegetativo das plantas (Acosta-Rangel; Agehara; Rechcigl, 2024; Taiz; Zeiger, 2017; Zandonadi, 2021).

O fotoperíodo natural varia ao longo do ano, especialmente à medida que a latitude se afasta do Equador. A faixa de latitudes entre 35° e 55° ao norte ou ao sul do equador é considerada ideal para o desenvolvimento do lúpulo (Dodds, 2017), pois o fotoperíodo durante a primavera e verão superior a 16,5 h de luz controla o florescimento precoce e permite o crescimento vegetativo completo das plantas, e a redução da duração do dia no final do verão e outono induz o florescimento no momento adequado para obtenção de altos rendimentos produtivos (Rossini et al., 2021; Robbauer et al., 1995). Por muito tempo, o cultivo de lúpulo em latitudes paralelas à faixa de 35° e 55° foi fortemente limitado pela duração inadequada do dia (Acosta-Rangel et al., 2021). O uso de iluminação suplementar (artificial) para

controlar a floração e o rendimento do lúpulo, é uma ferramenta considerada inovadora, que possibilita a produção bem-sucedida de lúpulo em regiões não tradicionais, onde a duração natural do dia induz o florescimento precoce e não promove o crescimento adequado do lúpulo (Jastrombek et al., 2022; Agehara, 2020). No Brasil, país também com clima subtropical, onde a duração da luz do dia pode ser inferior a 14 h nas regiões de maior altitude, os resultados do uso de iluminação suplementar (artificial) para controlar a floração e a produtividade de lúpulo são promissores (Leles et al., 2023; Leles et al., 2024).

2.4.1.1 Iluminação Artificial

O uso de iluminação artificial para suplementar o fotoperíodo em plantas sensíveis à duração do dia é uma prática comum em muitos cultivos. Para o controle da floração é necessário que as fontes luminosas utilizadas forneçam comprimentos de onda de aproximadamente 660 nm (luz vermelha), visando a maior eficiência de conversão do fitocromo Pr em Pfr (Zandonadi, 2021; Acosta-Rangel; Agehara; Rechcigl, 2024). A densidade de fluxo de fótons fotossintéticos necessária é muito baixa, geralmente menor que $1 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, sendo a iluminância (intensidade de luz) sugerida de 7 e 10 *footcandle*, que corresponde em radiação fotossinteticamente ativa (RFA) a aproximadamente 0,30-0,43 W m^{-2} . Dentre os tipos de lâmpadas que podem ser utilizados, encontram-se os bulbos incandescentes, que podem ser convencionais, halógenas ou halógenas dicróicas, as lâmpadas fluorescentes, as lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão e as lâmpadas de LED (Light Emitting Diode) (Zandonadi, 2021).

As lâmpadas LED são formadas por um diodo emissor de luz que, com a passagem da corrente elétrica, emite luz visível através de um processo chamado eletroluminescência (Zandonadi, 2021). Essas lâmpadas são as mais recentes no mercado e possuem várias vantagens em relação às demais, incluindo consumo de energia altamente eficiente, maior vida útil e diversificação na qualidade da luz (Dutta Gupta, 2017). O menor consumo de energia se explica porque essas lâmpadas geram o fluxo luminoso sem a utilização de reatores e com menor quantidade de potência que outras lâmpadas, como incandescentes e fluorescentes (Zandonadi, 2021). A capacidade de controlar a composição espectral da luz ofertada possibilita que as lâmpadas LED sejam utilizadas em aplicações específicas dentro dos cultivos

(Morrow, 2008). Portanto, o surgimento dessa tecnologia possibilitou o desenvolvimento de lâmpadas próprias para inibir a floração em plantas de dias curtos, como é o caso das lâmpadas de bulbo Philips GreenPower LED DR/W 10 W (Agehara, 2020).

Nos estudos que utilizam a iluminação artificial suplementar para o controle do florescimento em lúpulo, as lâmpadas LED Philips GreenPower são utilizadas como principal fonte luminosa artificial no sistema de suplementação de fotoperíodo (Acosta-Rangel; Agehara; Rechcigl, 2024; Leles et al., 2023; Leles et al., 2024; Agehara, 2020). Estas lâmpadas apresentam espectro de luz predominante de 450 nm (azul) e pico de 650 nm (vermelho) (Figura 5). O fluxo de fótons dessas lâmpadas é muito baixo, cerca de $25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, considerando que a luz solar total pode produzir cerca de $1.900 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, no entanto, é eficiente para a prevenção do florescimento e para a promoção do crescimento vegetativo da haste (Agehara, 2020; Leles et al., 2023).

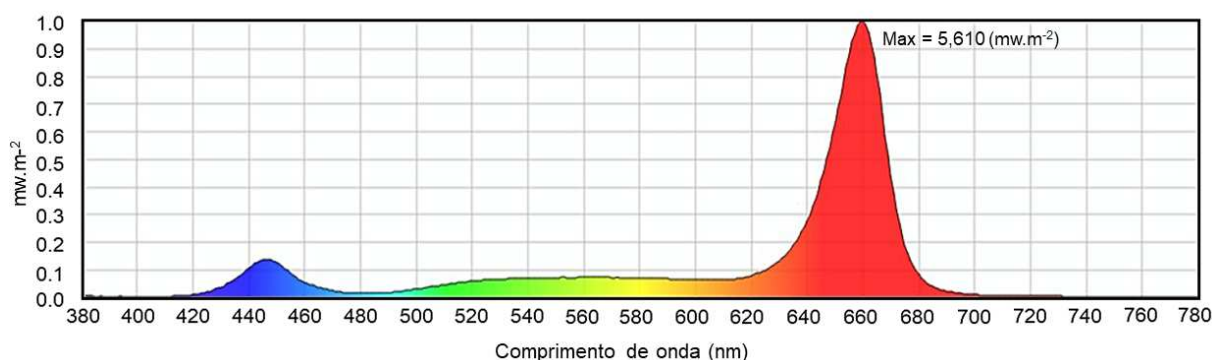


Figura 5 – Densidade de Fluxo de Irradiância (mw.m^{-2}) das lâmpadas LED Philips Green Power DR/W.

O layout de instalação do sistema de iluminação artificial, programa de acionamento e desligamento, bem como outros ajustes deve levar em consideração as condições climáticas de cada local e da cultivar de lúpulo adotada. O programa de acionamento e desligamento deve levar em consideração a latitude de cada região produtiva. Basicamente, quanto menor for a latitude de uma determinada região, maior será o número de horas de iluminação artificial necessárias durante o início da estação de crescimento. No entanto, as condições de temperatura do ar para o crescimento do lúpulo de um determinado local também devem ser consideradas (Jastrombek et al., 2022).

2.4.2 Temperatura do Ar

Por ser uma planta nativa de regiões de clima predominantemente temperado, por muito tempo o desenvolvimento da planta foi associado às temperaturas do ar mais frias e à necessidade de um período de dormência durante o inverno (Acosta-Rangel et al., 2021; Rossini et al., 2021). Nas regiões tradicionais, a elevação gradual da temperatura do ar com a chegada da primavera, se aproximando de 10 °C, induz o desenvolvimento inicial após a dormência da planta, estimulando a brotação e a atividade vegetativa das plantas (Pavlovic et al., 2012). A faixa de temperatura do ar considerada como ideal durante o crescimento do lúpulo está entre 13,2° a 20,5 °C e, em extremos de abaixo de 5°C e acima de 35°C, o crescimento das plantas é paralisado (Acosta-Rangel et al., 2021; Pavlovic et al., 2012). No entanto, com a expansão do cultivo em áreas paralelas às latitudes entre 35° e 55° em ambos os hemisférios, observou-se que a planta se adapta às regiões de clima subtropical com temperaturas médias do ar mais elevadas (Agehara, 2020; Leles et al., 2023).

Em clima subtropical, tem-se observado que o crescimento das plantas é mais precoce durante o verão, momento em que as temperaturas do ar ultrapassam facilmente 20,5 °C (Leles et al., 2024). Alguns estudos apontam que a temperatura do ar entre 21 e 39 °C eleva a capacidade fotossintética das plantas de lúpulo, desde que recebam água suficiente durante o desenvolvimento (Eriksen et al., 2020), portanto, temperaturas do ar mais elevadas podem influenciar positivamente o crescimento das plantas, resultando em ciclos mais precoces (Acosta-Rangel; Agehara; Rechcigl, 2024; Fortuna et al., 2023).

Além disso, a ocorrência de invernos pouco rigorosos, com baixo risco de geadas, como é o caso de várias regiões emergentes de clima subtropical, possibilita a indução de uma segunda safra após a colheita da safra de verão (Jastrombek et al., 2022; Acosta-Rangel; Agehara; Rechcigl, 2024). A primeira safra, conhecida como de verão, inicia-se a partir da brotação do lúpulo podado no meio do inverno, e os cones geralmente são colhidos no início do verão. Após a colheita e poda, rapidamente as plantas são induzidas à brotação em decorrência das temperaturas do ar elevadas do verão, e inicia-se uma nova safra, conhecido como safra de outono ou inverno. A temperatura do ar permanece dentro do considerado ideal para o desenvolvimento da planta durante o outono e inverno, permitindo o crescimento e produção de cones das plantas (Ruggeri et al., 2024; Leles et al., 2024). Isso é interessante do ponto de vista

da maximização da produção agrícola nessas regiões, pois em regiões tradicionais de cultivo, apenas uma safra é obtida por ano (Acosta-Rangel; Agehara; Rechcigl, 2024).

2.4.3 Disponibilidade Hídrica

A necessidade de água pode variar de acordo com a região de cultivo, pois a demanda por evapotranspiração do lúpulo depende da temperatura do ar, do vento, da umidade do ar e do tipo de solo (Alba et al., 2021). A precipitação média necessária é de 500 a 600 mm durante o crescimento vegetativo do lúpulo, sendo a distribuição uniforme das chuvas o principal fator de influência para boa produtividade pois permite que as plantas cheguem ao topo da treliça adequadamente (Rodrigues; Moraes; Castro, 2015; Alba et al., 2021).

O estresse hídrico pode interferir na produção levando a perdas de até 70% (Nakawuka et al., 2017). Sob déficit hídrico, as plantas sofrem um grande impacto na taxa fotossintética devido à limitação estomática e não estomática. O fechamento dos estômatos em resposta à diminuição da disponibilidade de água no solo apesar de ajudar o lúpulo a evitar uma diminuição no potencial hídrico, limita o ganho de carbono e o crescimento da planta (Kolenc et al., 2016; Gloser et al., 2024). O atraso no crescimento inicial das plantas e o momento em que o ramo principal do lúpulo atinge a altura total da estrutura de sustentação podem prejudicar a formação de flores e o rendimento total do cone de lúpulo (Gloser et al., 2024; Acosta-Rangel et al. 2021; Leles et al., 2023). Portanto, mesmo uma ligeira diminuição na disponibilidade hídrica durante os estágios iniciais de desenvolvimento correspondentes ao crescimento vegetativo intensivo resulta em produtividade reduzida das plantas de lúpulo na safra atual (Gloser et al., 2024). Além disso, por serem plantas perenes os efeitos da seca também podem refletir nos anos seguintes, o que significa riscos econômicos plurianuais (Kolenc et al., 2016).

Em áreas de cultivo emergentes, como é o caso de várias regiões do Brasil, o uso de irrigação programada é uma abordagem promissora para mitigar os efeitos prejudiciais do estresse hídrico, especialmente durante o início da estação de crescimento e a floração, levando em consideração a quantidade de chuva e a variação de temperatura do ar de cada região e época do ano (Jastrombek et al., 2022; Gloser et al., 2024; Dodds, 2017). Cabe ressaltar que a irrigação em períodos em que a demanda por água da planta é menor pode levar ao encharcamento do solo e

proporcionar condições favoráveis para a ocorrência de doenças, especialmente no sistema radicular (Jastrombek et al., 2022).

2.5 PRODUÇÃO EM MAIS DE UMA SAFRA ANUAL

Até o momento, foram realizados registros a respeito do cultivo de lúpulo em mais de uma safra ao ano na Flórida (Acosta-Rangel; Agehara; Rechcigl, 2024; Gallardo; Agehara; Rechcigl, 2025) e no Paraná, Brasil (Leles et al., 2024). Em todos os locais, a obtenção de safras de outono e inverno está associada ao uso de suplementação artificial de fotoperíodo. A duração dos dias geralmente apresenta grande variação durante as estações do ano (Gallardo; Agehara; Rechcigl, 2025). No Brasil, durante a safra de verão, os dias são mais longos atingindo cerca de 14 h de fotoperíodo, no entanto, no outono e inverno, o fotoperíodo reduz para cerca de 11 h, tornando o uso de iluminação artificial suplementar ainda mais necessário (Fagherazzi et al., 2023; Neves et al., 2024). Essa variação é proporcional à latitude em que o cultivo se encontra, podendo ser maior ou menor dependendo da região de cultivo.

As estações de verão, de outono e de inverno também apresentam variação na temperatura do ar, encontrando médias maiores no verão em comparação com o outono e inverno. O aumento da temperatura do ar durante a estação de verão foi associado ao crescimento mais precoce das plantas, e a redução de temperatura do ar no outono a ciclos mais tardios (Leles et al., 2024; Acosta-Rangel; Agehara; Rechcigl, 2024). O rápido crescimento inicial das plantas no verão pode resultar em plantas mais vigorosas, e consequentemente mais produtivas que nas estações de outono e inverno (Leles et al., 2024), isso porque o rendimento produtivo do lúpulo está correlacionado ao desenvolvimento vegetativo das plantas (Leles et al., 2023).

Sob condições de ambiente controlado que visam a redução da variação externa, as safras sucessivas não apresentam variações significativas quanto ao desenvolvimento vegetativo e produtivo das plantas (Bauerle, 2019). No entanto, o controle do ambiente a campo é limitado, sofrendo a influência do clima contrastante entre as estações do ano (Acosta-Rangel; Agehara; Rechcigl, 2024).

A emergência dos ramos também apresenta padrões de desenvolvimento diferentes entre as estações de crescimento. As plantas de lúpulo formam brotos axilares ao longo dos caules e brotos adventícios nos rizomas, na primavera e verão a brotação surge apenas de brotos adventícios, enquanto no outono e inverno a

emergência de novos ramos ocorre não apenas de brotos adventícios, mas também de brotos axilares na porção não colhida dos caules (Acosta-Rangel; Agehara; Rechcigl, 2024).

O cultivo de lúpulo em safras sucessivas ainda é pouco abordado em literatura, tendo um número limitado de trabalhos científicos com resultados esclarecedores sobre o assunto. Apesar disso, safras em estações como outono e inverno vêm sendo consideradas viáveis, sobretudo quando se utiliza a suplementação luminosa, apresentando alta plasticidade fenológica, capacidade de aclimação às condições climáticas e aspectos quantitativos e qualitativos satisfatórios (Leles et al., 2024; Acosta-Rangel; Agehara; Rechcigl, 2024).

2.6 REFERÊNCIAS

ACOSTA-RANGEL, A.; AGEHARA, S.; RECHCIGL, J. Double-season production of hops (*Humulus lupulus* L.) with photoperiod manipulation in a subtropical climate. **Scientia Horticulturae**, v. 332, n. 113177, 2024. DOI: 10.1016/j.scienta.2024.113177

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. DOI: 10.21475/ajcs.21.15.05.p3192.

AGEHARA, S. Using Supplemental Lighting to Control Flowering of Hops in Florida. **UF/IFAS Extension**, 2020. Disponível em: <<https://edis.ifas.ufl.edu/publication/HS1365>>. Acesso em: 26 fev. 2025.

ALBA, J. M. F.; MIGUEL, P.; ALMEIDA, I. R.; BUENO, J. M. M.; NACHTIGALL, S. D.; LEIDEMER, J. D.; JUNIOR, A. P. **Zoneamento edafoclimático de culturas agrícolas no município de Gravataí, RS**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2021. (Documento 507).

ALMAGUER, C.; SCHÖNBERGER, C.; GASTL, M.; ARENDT, E. K.; BECKER, T. *Humulus lupulus*— a story that begs to be told. A review. **Journal of The Institute of Brewing**, p. 289-314, 2014. DOI: 10.1002/jib.160.

ALMEIDA, A. R.; BRISOLA MACIEL, M. V. O.; GANDOLPHO, B. C. G.; MACHADO, M. H.; TEIXEIRA, G. L.; BERTOLDI, F. C.; NORONHA, C. M.; VITALI, L.; BLOCO, J. M.; BARRETO, P. L. M. Brazilian Grown Cascade Hop (*Humulus lupulus* L.): LC-ESI-MS-MS and GC-MS Analysis of Chemical Composition and Antioxidant Activity of Extracts and Essential Oils. **Soc. Brew. Química**, v. 79, p. 156-166, 2020. DOI: 10.1080/03610470.2020.1795586.

ALMEIDA, A. R.; CONTO, L. C. Lúpulo no Brasil: Uma cultura promissora em ascensão. **Food Science Today**, v. 3, n. 1, p. 1-6, 2024. DOI: 10.58951/fstoday.2024.001.

APROLÚPULO - Associação Brasileira dos Produtores de Lúpulo. Dados e estatísticas. **Mapa do lúpulo brasileiro 2023**. Disponível em: <<https://www.aprolupulo.com.br/>>. Acesso em: 26 fev. 2025.

ARRUDA, T. R.; PINHEIRO, P. F.; SILVA, P. I.; BERNARDES, P. C. A new perspective of a well-recognized raw material: Phenolic content, antioxidant and antimicrobial activities and α - and β -acids profile of Brazilian hop (*Humulus lupulus* L.) extracts. **LWT - Food Sci. Technol.**, v. 141, 2021. DOI: 10.1016/j.lwt.2021.110905.

BARTHHAAS. **Barthhaas report hops 2020/2021**, 2021. Disponível em: <<https://www.barthhaas.com/en/campaign/barthhaas-report-2021>>. Acesso em: 26 fev. 2025.

BAUERLE, W. L. Disentangling photoperiod from hop vernalization and dormancy for global production and speed breeding. **Scientific Reports**, v. 9, 2019. DOI:10.1038/s41598-019-52548-0.

CAMPOS, O. P.; FORTUNA, G. C.; GOMES, J. A. O.; NEVES, C. S.; BONFIM, F. P. G. Morphological characteristics, trichomes, and phytochemistry of inflorescences of '*Humulus lupulus*' L: Comparison of cropping systems and varieties. **Australian Journal of Crop Science**, v. 17, n. 3, p. 263-274, 2023. DOI: 10.3316/informit.197703104266944.

CARRUBBA, A.; MARCEDDU, R.; SARNO, M. Hop (*Humulus lupulus* L.): Suitability of traditional cultivars to a low-trellis farming system in a semiarid environment. **HortScience**, v. 57, p. 1409-1415, 2022. DOI: 10.21273/HORTSCI16754-22.

COMEX - Portal do Comércio Exterior do Brasil. **Exportação e Importação Geral**. 2022. Disponível em: <<http://comexstat.mdic.gov.br/pt/geral>>. Acesso em: 25 fev. 2025.

DANENHOWER, T.M.; FORCE, L.J.; PETERSEN, K.J.; BETTS, T.A.; BAKER, G.A. HPLC Analysis of α - and β -acids in hops. **Journal of Chemical Education**, v. 85, p. 954–956, 2008.

DE KEUKELEIRE, J.; OOMS, G.; HEYERICK, A.; ROLDAN-RUIZ, I.; VAN BOCKSTAELE, E.; DE KEUKELEIRE, D. Formation and accumulation of α -acids, β -acids, desmethylxanthohumol, and xanthohumol during flowering of hops (*Humulus lupulus* L.). **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 51, p. 4436–4441, 2003. DOI: 10.1021/jf034263z.

DODDS, K. **Hops a guide for new growers**. Tumut: Development Officer Temperate Fruits, 2017. ISBN 978-1-76058-008-7. Disponível em: <https://www.dpi.nsw.gov.au/__data/assets/pdf_file/0007/712717/hops-guide-for-new-growers.pdf>. Acesso em: 26 fev. 2025.

DURELLO, R. S.; SILVA, L. M.; BOGUSZ JR, S. Química do lúpulo. **Química nova**, v. 42, n. 8, p. 900-919. 2019. DOI: 10.21577/0100-4042.20170412.

DUTTA GUPTA, S. **Light Emitting Diodes for Agriculture**. Singapore: Springer, 2017.

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. DOI: 10.21273/HORTSCI14580-19.

FAGHERAZZI, M. M. Adaptabilidade de cultivares de lúpulo na região do Planalto Sul Catarinense. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual de Santa Catarina, Lages, 2020.

FAGHERAZZI, M. M.; RUFATO, L. Produzir lúpulo no Brasil, utopia ou realidade? **Revista Agronomia Brasileira**, v. 2, 2018. DOI: 10.29372/rab201803.

FAGHERAZZI, M. M.; SARNIGHAUSEN, V. R.; RUFATO, L.; NERBASS, F. R.; SANTOS, M. F. S. Climatological conditions of the southern Santa Catarina state highlands for hop production. **Revista Ceres**, v. 70, n. 4, p. 1-7, 2023. DOI: 10.1590/0034-737X202370040001.

FORTUNA, G. C.; GOMES, J. A. O.; CAMPOS, O. P.; NEVES, C. S.; BONFIM, F. P. G. Agronomic performance of *Humulus lupulus* L. varieties cultivated in organic and conventional systems in São Paulo center-west, Brazil. **Ciência Rural**, v. 53, n. 8, 2023. DOI: 10.1590/0103-8478cr20210704.

GALLARDO, M.; AGEHARA, S.; RECHCIGL, J. Optimization of trellis design and height for double-season hop (*Humulus lupulus* L.) production in a subtropical climate: Growth, morphology, yield, and cone quality during establishment years. **European Journal of Agronomy**, v. 162, 2025. DOI: 10.1016/j.eja.2024.127415.

GLOSER, V.; BALÁŽ, M.; SVOBODA, P.; JUPA, R.; GLOSER, J. High sensitivity of hop plants (*Humulus lupulus* L.) to limited soil water availability: the role of stomata regulation and xylem vulnerability to embolism. **Irrigation Science**, v. 42, p. 907-918, 2024. DOI: 10.1007/s00271-024-00929-3.

GONSAGA, R. F. Desenvolvimento de híbridos de lúpulo adaptados às condições tropicais. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2021. Disponível em: < https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/213747/gonsaga_rf_dr_jabo_sub.pdf?sequence=11&isAllowed=y >. Acesso em: 26 fev. 2025.

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**, Salvador, v. 14, n. 3, p. 858-872, 2021. DOI: 10.9771/cp.v14i3.33059.

GUTIÉRREZ, R. M.; OLIVEIRA, R. R.; RIBEIRO, T. H. C.; OLIVEIRA, K. K. P.; SILVA, J. V. N.; ALVES, T. C.; AMARAL, L. R.; GOMES, M. S.; GOMES, M. S.; CHALFUN-JÚNIOR, A. Unveiling the phenology and associated floral regulatory pathways of *Humulus lupulus* L. in subtropical conditions. **Planta**, v. 259, n. 150, 2024. DOI 10.1101/2023.09.15.557988.

HARSHITHA, H.M.; CHANDRASHEKAR, S.Y.; HARISHKUMAR K.; PRADEEP KUMAR, C.M. Photoperiod manipulation in flowers and ornamentals for perpetual flowering. **The Pharma Innovation Journal**, v. 10, n. 6, p. 127-134, 2021.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Industrial Anual – Produto**. 2020.

IHGC - International Hop Growers' Convention. **Economic Commission - Summary Reports**. IHGC: Nuremberg – Germany, 2023.

INUI, T.; TSUCHIYA, F.; ISHIMARU, M.; OKA, K.; KOMURA, H. Different beers with different hops. Relevant compounds for their aroma characteristics. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 61, p. 4758–4764, 2013. DOI: 10.1021/jf3053737.

ISKRA, A. E.; LAFONTAINE, S. R.; TRIPPE, K. M.; MASSIE, S. T.; PHILLIPS, C. L.; TWOMEY, M. C. Influence of Nitrogen Fertility Practices on Hop Cone Quality. *J. Am. Soc. Brew. Chem.* v. 77, p. 199-209, 2019. DOI:10.1080/03610470.2019.1616276.

JASTROMBEK, J. M.; FAGUERAZZI, M. M.; DE CÁSSIO PIEREZAN, H.; RUFATO, L.; SATO, A. J.; DA SILVA RICCE, W.; MARQUES, V. V.; LELES, N. R.; ROBERTO, S. R. Hop: An Emerging Crop in Subtropical Areas in Brazil. *Horticulturae*, v. 8, n. 393, 2022. DOI: 10.3390/horticulturae805039.

KARABÍN, M.; HUDCOVÁ, T.; JELÍNEK, L.; DOSTÁLEK, P. Biologically active compounds from hops and prospects for their use. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, v. 15, p. 542–567, 2016. DOI: 10.1111/1541-4337.12201.

KNEZ HRNČIČ, M.; ŠPANINGER, E.; KOŠIR, I.; KNEZ, Ž.; BREN, U. Hop Compounds: extraction techniques, chemical analyses, antioxidative, antimicrobial, and anticarcinogenic effects. *Nutrients*, v. 11, p. 257, 2019. DOI: 10.3390/nu11020257.

KOLENC, Z.; VODNIK, D.; MANDELIC, S.; JAVORNIK, B.; KASTELEC, D.; ČERENAK, A. Hop (*Humulus lupulus* L.) response mechanisms in drought stress: Proteomic analysis with physiology. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 105, p. 67-78, 2016. DOI: 10.1016/j.plaphy.2016.03.026.

KORPELAINEN, H.; PIETILÄINEN, M. Hop (*Humulus lupulus* L.): Traditional and Present Use, and Future Potential. *Economic Botany*, v. 75, p. 302-322, 2021. DOI: 10.1007/s12231-021-09528-1.

KOWALSKA, G.; BOUCHENTOUF, S.; KOWALSKI, R.; WYROSTEK, J.; PANKIEWICZ, U.; MAZUREK, A.; SUJKA, M.; WŁODARCZYK-STASIAK, M. The hop cones (*Humulus lupulus* L.): Chemical composition, antioxidant properties and molecular docking simulations. *Journal of Herbal Medicine*, v. 33, 2022. DOI: 10.1016/j.hermed.2022.100566.

LELES, N. R.; SATO, A. J.; MORENO, G.; ARALDI, L. B.; ALMEIDA, A. L. D.; CARLI, V. W.; ROBERTO, S. R. Performance of hop cultivars (*Humulus lupulus* L.) under the annual double harvest system under artificial light supplementation in a subtropical climate. *Semina Ciências Agrárias*, v. 45, n. 6, p. 1833-1850, 2024. DOI: 10.5433/1679-0359.2024v45n6p1833.

LELES, N. R.; SATO, A. J.; RUFATO, L.; JASTROMBEK, J. M.; MARQUES, V. V.; MISSIO, R. F.; FERNANDES, N. L. M.; ROBERTO, S. R. Performance of Hop Cultivars

Grown with Artificial Lighting under Subtropical Conditions. **Plants**, v. 12, n. 10, 2023. DOI: 10.3390/plants12101971.

LIBERATOREA, C. M.; CALABUIG-SERNAB, A.; RODOLFIA, M.; CHIANCONEA, B.; SEGUÍ-SIMARROB, J. M. Phenological phases of flowering in hop (*Humulus lupulus* L.) and their correspondence with microsporogenesis and microgametogenesis. **Scientia Horticulturae**, v. 256, 2019. DOI: 10.1016/j.scienta.2019.108639.

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Anuário da Cerveja 2024**. Brasília: Secretaria de Defesa Agropecuária, 2024.

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Anuário da Cerveja 2021**. Brasília: Secretaria de Defesa Agropecuária, 2022.

MAPA, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Lúpulo no Brasil: perspectivas e realidades**. Brasília: Secretaria de Agricultura Familiar e Cooperativismo, 2022.

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

MORROW, R. C. LED Lighting in Horticulture. **HortScience**, v. 43, p. 1947-1950, 2008. DOI: 10.21273/HORTSCI.43.7.1947.

MÜLLER, C. V.; MARCUSSO, E. F. **Mapa Informa: as cervejarias continuam a crescer**. Brasília, DF: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2018. Disponível em: < <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inspecao/produtos-vegetal/publicacoes/as-cervejas-continuam-a-crescer-pdf.pdf>>. Acesso em: 26 fev. 2025.

NAGEL, J.; CULLEY, L.; LU, Y.; LIU, E.; MATTHEWS, P.; STEVENS, J.; PAGE, J.; EST Analysis of Hop Glandular Trichomes Identifies an O Methyltransferase That Catalyzes the Biosynthesis of Xanthohumol. **The Plant Cell**, v. 20, p. 186-200, 2008. DOI: 10.1105/tpc.107.055178

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. DOI: 10.1016/j.indcrop.2017.01.037.

NEVES, C. S.; AIRES, E. S.; CAMPOS, O. P.; FORTUNA, G. C.; GOMES, J. A. O.; CALLILI, D.; ONO, E. O.; RODRIGUES, J. D.; BONFIM, F. P. G. Physiological and productive performance of hop (*Humulus lupulus* L.) varieties grown under subtropical conditions in Brazil. **Australian Journal of Crop Science**, v. 18, n. 5, p. 280-287, 2024. DOI: 10.21475/ajcs.24.18.05.p3937.

PAVLOVIC, V.; PAVLOVIC, M.; CERENAK, A.; KOSIR, I. J.; CEH, B.; ROZMAN, C.; TURK, J.; PAZEK, K.; KROFTA, K.; GREGORIC, G. Environment and weather influence on quality and market value of hops. **Plant Soil Environ.**, v. 58, p. 155–160, 2012. DOI: 10.17221/499/2011-PSE.

RIGHI, E.; ANTUNES, E. D. A.; FONSECA, F. L.; PUTTI, G. Análise bibliográfica da produção científica sobre lúpulo. **Cadernos de Gestão e Empreendedorismo**, v. 12, n. 1, 2024. DOI: 10.32888/cge.v12i1.62603.

ROBBAUER, V. G.; BUHR, L. HACK, H.; HAUPTMANN, S.; KLOSE, R.; MEIER, U.; STAUB, R.; WEBER, E. Phanologische Entwicklungsstadien von Kultur-Hopfen (*Humulus lupulus* L.). **Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd.**, v. 47, n. 10, p. 249-253, 1995, ISSN 0027-7479.

RODOLFI, M.; CHIANCONE, B.; LIBERATORE, C.M.; FABBRI, A.; CIRLINI, M.; GANINO, T. Changes in chemical profile of Cascade hop cones according to the growing area. **J. Sci. Food Agric.**, v. 99, p. 6011-6019, 2019. DOI: 10.1002/jsfa.9876.

RODRIGUES, M. A.; MORAIS, J. S.; CASTRO, J. P. O lúpulo: da cultura ao extrato. Técnica cultural tradicional. In: Jornadas de lúpulo e cerveja, **Anais [...]**. Bragança: 2015. Disponível em: <<https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/11625/3/LivroDeActas.pdf>>. Acesso em: 25 fev. 2025.

ROSSINI, F.; VIRGA, G.; LORETI, P.; IACUZZI, N.; RUGGERI, R.; PROVENZANO, M. E. Hops (*Humulus lupulus* L.) as a Novel Multipurpose Crop for the Mediterranean Region of Europe: Challenges and Opportunities of Their Cultivation. **Agriculture**, v. 11, n. 6, 2021. DOI: 10.3390/agriculture11060484.

RUFATO, L.; FAGHERAZZI, M. M. **Aspectos técnicos da cultura do lúpulo**. Florianópolis: UDESC, 2019. (Série plantas úteis)

RUFATO, L.; FAGHERAZZI, M. M. **Aspectos técnicos da cultura do lúpulo**. Florianópolis: UDESC, 2019. (Série plantas úteis)

RUGGERI, R.; ROSSINI, F.; ROBERTO, S. R.; SATO, A. J.; LOUSSERT, P.; RUTTO, L. K.; AGEHARA, S. Development of hop cultivation in new growing areas: The state of the art and the way forward. **European Journal of Agronomy**, v. 161, 2024. DOI: 10.1016/j.eja.2024.127335.

RUNKLE, E.; LOPEZ, R.; FISHER, P. Chapter 5. Photoperiodic control of flowering. In: LOPEZ, R.; RUNKLE, E. (ed.). Light management in controlled environments. Willoughby, OH: Meister Media Worldwide, 2017. p. 48–58.

SIMIeli, B. M.; GAZOLA, R. P. D.; PAGLIARINI, M. K.; VARGAS, P. F.; CASTILHO, R. M. M. Development and production of hop in a high temperature region. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 13, 2021. DOI: 10.33448/rsd-v10i13.20863.

SPÓSITO, M. B.; ISMAEL, R. V.; BARBOSA, C. M. A.; TAGLIAFERRO, A. L. **A cultura do lúpulo**. Piracicaba: ESALQ, 2019. n. 68. ISSN 1414-4530.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. Tradução de: MASTROBERTI, A. A. et al. 6a ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888 p.

TEGHTMEYER, S. Hops. **Journal of Agricultural & Food Information**, v. 19, n. 1, p. 9-20, 2018. DOI: 10.1080/10496505.2018.1403248.

TING, P. L.; RYDER, D. S. The Bitter, Twisted Truth of the Hop: 50 Years of Hop Chemistry. **Journal of the American Society of Brewing Chemists**, v. 75, n. 3, 2017. DOI: 10.1094/ASBCJ-2017-3638-01.

WANG, G.; FAN, C.; QIU, Y.; ZHAO, Y.; ZHANG, J.; XIN, H.; LI, X. The complete chloroplast genome of *Humulus lupulus* cv. 'Fubei-1' (Rosales: Cannabaceae). **Mitochondrial DNA PART B**, v. 6, n. 8, p. 2439-2441, 2021. DOI: 10.1080/23802359.2021.1926352.

WHITMAN, C.M.; HEINS, R.D.; CAMERON, A.C.; CARLSON, W.H. Lamp type and irradiance level for daylength extensions influence flowering of *Campanula carpatica* 'Blue Clips', *Coreopsis grandiflora* 'Early Sunrise', and *Coreopsis verticillata* 'Moonbeam'. **J. Am. Soc. Hort. Sci.**, v. 123, p. 802-807, 1998.

ZANDONADI, A. S. Luz artificial no controle do florescimento de crisântemo de corte. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2021. Disponível em: <<https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/29563/1/texto%20completo.pdf>>. Acesso em: 25 fev. 2025.

3 ARTIGO A - CRESCIMENTO VEGETATIVO E FENOLOGIA DE CULTIVARES DE LÚPULO EM SAFRAS SUCESSIVAS COM ILUMINAÇÃO SUPLEMENTAR ARTIFICIAL EM CLIMA SUBTROPICAL

3.1 RESUMO

O presente estudo objetivou caracterizar o crescimento vegetativo e a fenologia de cultivares de lúpulo cultivadas em safras sucessivas com suplementação artificial em região de clima subtropical. O experimento foi realizado em Palotina, Paraná, Brasil (24° S) durante as safras de verão (2023-2024), inverno (2024) e outono (2024-2025). Utilizou-se lâmpadas LED para estender o fotoperíodo diário para 17 horas na fase vegetativa. As seguintes cultivares de lúpulo foram avaliadas: a) Alpharoma; b) Cascade; c) Chinook; d) Comet; e) Dr Rudi; f) Hallertau Magnum; g) Hallertau Mittelfruher; h) Nugget; i) Saaz; j) Smooth; k) Sorachi Ace; l) Southern Cross; m) Triple Pearl; n) Yakima Gold; o) Zeus. Foram avaliados o desenvolvimento da altura das plantas (Ht), a taxa de crescimento das plantas (HGR), a classificação de quatro estágios de crescimento, o número de ramos laterais, a massa fresca das plantas e a fenologia das cultivares de lúpulo. Ht e HGR foram analisados por regressões de modelo Gompertz e Gaussiano, respectivamente. O número de ramos laterais por planta e a massa fresca das plantas foram submetidos à análise de variância e as médias agrupadas pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,01$). A temperatura do ar foi o principal fator modulador do crescimento vegetativo e da fenologia. Na safra de verão (2023-2024) as cultivares Cascade e Hallertau Magnum apresentaram-se como precoces, na safra de inverno (2024) foram as cultivares Chinook, Nugget, Saaz e Zeus, enquanto na safra de outono (2024-2025) foram Dr Rudi, Sorachi Ace e Zeus. O Estágio I do crescimento vegetativo foi crítico para a classificação da precocidade. A variabilidade do ciclo fenológico foi amplificada nas safras de maior temperatura do ar. A análise integrada das três safras sucessivas demonstrou que a cultivar Sorachi Ace apresentou um padrão de crescimento estável e consistente independente das variações sazonais de cada safra. Portanto, apesar da grande variabilidade ao longo dos ciclos, o desenvolvimento do lúpulo em safras sucessivas demonstrou viabilidade em condições subtropicais sob regime de iluminação suplementar.

Palavras-chave: *Humulus lupulus* L. HGR. Fenologia. Fotoperíodo. Graus dias.

VEGETATIVE GROWTH AND PHENOLOGY OF HOP CULTIVARS IN SUCCESSIVE GROWING SEASONS WITH SUPPLEMENTAL ARTIFICIAL LIGHTING IN A SUBTROPICAL CLIMATE

Abstract: The present study aimed to characterize the vegetative growth and phenology of hop cultivars grown in successive seasons with artificial supplementation in a subtropical region. The experiment was conducted in Palotina, Paraná, Brazil (24° S) during the summer 2023-2024, winter 2024, and fall 2024-2025 growing seasons. LED lamps were used to extend the daily photoperiod to 17 hours during the vegetative phase. The following hop cultivars were evaluated: a) Alpharoma; b) Cascade; c) Chinook; d) Comet; e) Dr. Rudi; f) Hallertau Magnum; g) Hallertau Mittelfruher; h) Nugget; i) Saaz; j) Smooth; k) Sorachi Ace; l) Southern Cross; m) Triple Pearl; n) Yakima Gold; o) Zeus. The parameters evaluated included plant height (Ht), height growth rate (HGR), classification of four growth stages, number of lateral branches, plant fresh mass, and cultivar phenology. Ht and HGR were analyzed using Gompertz and Gaussian regression models, respectively. The number of lateral branches per plant and fresh mass were subjected to analysis of variance (ANOVA), and means were grouped using the Scott-Knott test ($p < 0.01$). Temperature was the primary modulating factor for vegetative growth and phenology. In the summer season (2023-2024), the cultivars Cascade and Hallertau Magnum were characterized as early-maturing. In the winter season (2024), Chinook, Nugget, Saaz, and Zeus were early-maturing, while in the fall season (2024-2025), Dr. Rudi, Sorachi Ace, and Zeus showed precocity. Vegetative growth Stage I was found to be critical for precocity classification. Phenological cycle variability was amplified during seasons with higher temperatures. Integrated analysis of the three successive seasons demonstrated that Sorachi Ace exhibited a stable and consistent growth pattern regardless of seasonal variations. Therefore, despite significant variability across cycles, hop development in successive seasons proved viable under subtropical conditions with supplemental lighting.

Keywords: *Humulus lupulus* L.; HGR; Phenology; Photoperiod; Degree days.

3.2 INTRODUÇÃO

O lúpulo (*Humulus lupulus* L.) é uma planta perene trepadeira cujas inflorescências femininas são consideradas como matéria-prima indispensável para a indústria cervejeira, pois conferem amargor, sabor e aroma à cerveja (Campos et al., 2023). Tradicionalmente, o cultivo de lúpulo no mundo está associado a países de clima temperado, entre as latitudes de 35° e 55° Norte ou Sul da linha do equador (Jastrombek et al., 2022). Em 2023, a área produtiva mundial de lúpulo foi de aproximadamente 59.916 ha distribuídos em 23 países, com as maiores áreas concentradas na Alemanha, EUA, República Tcheca, Polônia e Eslovênia (Ihgc, 2023).

O crescimento exponencial do setor de cervejas artesanais e a demanda por uma gama diversificada de lúpulos de qualidade ao redor do mundo tem impulsionado o surgimento de novas áreas de cultivo, incluindo áreas paralelas as latitudes entre 35° e 55° em ambos os hemisférios (Marceddu; Carrubba; Sarno, 2020; Ruggeri et al., 2024), como Sicília, Itália (Carrubba; Marceddu; Sarno, 2022), Flórida, EUA (Agehara 2020; Acosta-Rangel et al., 2021; Acosta-Rangel; Agehara; Rechcigl, 2024) e Paraná, Brasil (Leles et al., 2023; Leles et al., 2024). O grande desafio para o desenvolvimento da produção de lúpulo nesses países é justamente a adaptação de cultivares às condições geográficas e climáticas locais distintas das encontradas em suas regiões de origem (Ruggeri et al., 2024).

Nos subtrópicos, Flórida, EUA e Paraná, Brasil, o principal desafio está associado ao fotoperíodo diário. O lúpulo é uma planta de dia curto com fotoperíodo crítico de 16,5 h, portanto, o fotoperíodo tem que ser superior a 16,5 h para evitar a floração precoce até que o crescimento vertical das plantas de lúpulo seja completo (Gutiérrez et al., 2024). Nessa zona climática, o fotoperíodo é sempre indutivo, pois a duração máxima do dia encontrada é de 14 h de luz, consequentemente o crescimento vegetativo e a produção de cones são afetados em decorrência do momento da floração (Gutiérrez et al., 2024; Jastrombek et al., 2022). O uso da suplementação artificial de luz para complementar o fotoperíodo diário durante o crescimento das plantas tem sido utilizado como estratégia para driblar essa limitação climática, com resultados promissores quanto à produção de lúpulo em quantidade e qualidade em mais de uma safra ao ano (Acosta-Rangel; Agehara; Rechcigl, 2024; Leles et al., 2024).

A possibilidade de uma segunda safra de cultivo de lúpulo por ano pode impulsionar ainda mais o desenvolvimento da cadeia produtiva em áreas emergentes, isso porque as regiões que seguem práticas tradicionais de cultivo produzem somente uma safra por ano (Guimarães et al., 2021). No Brasil, a segunda safra é possível pela ausência de invernos longos e rigorosos, que possibilitam o crescimento completo das plantas com alta plasticidade fenológica, capacidade de aclimação às condições climáticas e produção de cones de lúpulo satisfatória em cada estação (Leles et al., 2024; Acosta-Rangel; Agehara; Rechcigl, 2024).

Apesar do grande entusiasmo pela expansão do cultivo de lúpulo em regiões não tradicionais, há um amplo espaço a ser explorado e a falta de informações fidedignas sobre as práticas agrônômicas adequadas dificulta o desenvolvimento de uma produção de lúpulo estável e eficiente (Ruggeri et al., 2024). O desenvolvimento de pesquisas básicas que caracterizem o crescimento vegetativo das plantas e a fenologia de cultivares, visando identificar os genótipos mais adequados para o sistema de duas safras por ano, bem como determinar os períodos mais apropriados para poda e colheita de acordo com as condições climáticas de cada região, são imprescindíveis para o desenvolvimento de estratégias de manejo e comercialização da produção (Acosta-Rangel et al., 2021; Ruggeri et al., 2024). Portanto, objetivou-se com este estudo caracterizar o crescimento vegetativo e a fenologia de cultivares de lúpulo cultivadas em safras sucessivas sob iluminação suplementar (artificial) em região de clima subtropical.

3.3 MATERIAL E MÉTODOS

3.3.1 Descrição da Área Experimental e Experimento

Foram avaliados o crescimento vegetativo e a fenologia de cultivares de lúpulo (*Humulus lupulus* L.), conduzidas sob suplementação luminosa artificial durante as safras de verão de 2023-2024, inverno de 2024 e outono de 2024-2025.

O experimento foi realizado em uma área experimental da Universidade Federal do Paraná – UFPR, Setor Palotina (24°17'40.05" S e 55°50'23.16" W), no município de Palotina, Paraná, Brasil. A área está situada em altitude de 332 m, onde o solo predominante é o Latossolo vermelho eutroférico, de origem basáltica e textura argilosa e o clima é do tipo Cfa subtropical úmido, conforme a classificação de Köppen,

com temperatura do ar média anual de 20,8 °C, pluviosidade média anual de 1.508 mm, fotoperíodo máximo do verão de 13,5 h, e mínimo no inverno de 10,5 h (Leles et al., 2023).

A área experimental conta com sistema de irrigação por gotejamento de fita dupla e sistema de suplementação luminosa com lâmpadas LED. A suplementação artificial de luz foi utilizada durante a fase de crescimento vegetativo das cultivares visando controlar a floração precoce das plantas. Após as plantas atingirem a altura total da treliça de 5,5 m, a suplementação luminosa foi desligada permanentemente para que o fotoperíodo curto estimulasse a floração das plantas.

O sistema de suplementação artificial de luz foi composto por lâmpadas bulbos LED Philips GreenPower DR/W 10W, com espectro de luz predominante de 450 nm (azul) e pico de 650 nm (vermelho), desenvolvidas para inibir a floração de plantas de dias curtos, contendo fluxo de fótons de $25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. As lâmpadas foram instaladas no topo das treliças e espaçadas a cada 10 m na linha de plantio. O sistema de acionamento das lâmpadas automático é controlado por um temporizador, que consiste em acionar os LEDs 30 min antes do pôr-do-sol, mantendo-os ligados por um período que totalize 17 h de fotoperíodo diário. A determinação dos horários diários de acionamento e desligamento da suplementação luminosa foi obtida a partir dos horários do pôr-do-sol e fotoperíodo diários para a latitude de Palotina, PR (Leles et al., 2023). Para tanto, os cálculos foram feitos a partir da equação: $N = 2/15 \arcsin(-\tan \varphi \times \tan \delta)$, em que: N = duração do dia em horas; φ = latitude geográfica (valores negativos para o hemisfério Sul); e δ = declinação solar, o qual foi obtido a partir da equação: $\delta = 23.45 \sin [360 (284+n)/365]$, em que: n = dias Julianos do ano. Os valores foram transformados em radianos para seno e tangente (Varejão-Silva, 2006).

As médias mensais de temperatura do ar (°C) e precipitação pluviométrica (mm) foram determinadas a partir de medições diárias pela estação meteorológica S824, localizada na entidade do SIMEPAR no município de Palotina PR (24°31' S, 53°90' W), em 2023, 2024 e 2025 (Figura 3.1).

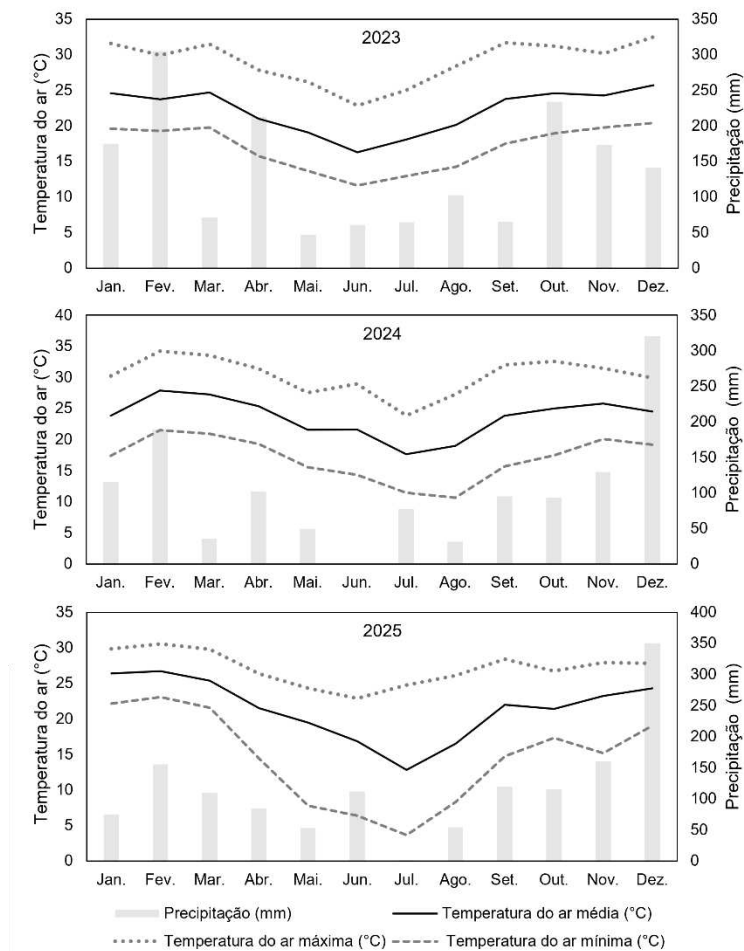


Figura 3.1 - Temperaturas máximas, médias e mínimas do ar e precipitação mensal para Palotina, PR, em 2023, 2024 e 2025.

A soma térmica, em graus dia, foi calculada durante o crescimento vegetativo das plantas, com base na equação: $GD = \sum_{i=1}^k (T_{avg} - T_{base})_i$, em que: GD é o total de graus dia acumulado; i e k indicam o primeiro e último dia de medição, respectivamente, T_{avg} é a temperatura do ar média diária e T_{base} é a temperatura base (ou seja, o valor de temperatura abaixo do qual o crescimento da planta é considerado zero), que para este experimento foi considerada 0 °C, conforme definido por Agehara et al. (2024) e Carrubba, Marceddu e Sarno (2022).

As mudas constituídas de plantas femininas foram propagadas por micropropagação *in vitro* no viveiro Lúpulos Ninkasi, Teresópolis, RJ e plantadas em outubro de 2023, conduzidas em sistema vertical de treliça alta com tutoramento em “V” na linha, com seis ramos por planta (três em cada fio de sustentação), altura de 5,5 m e espaçamento de 1,0 m entre plantas e 3,0 m entre linhas.

Em todas as safras foi realizada a poda de produção rente ao solo para estimular o desenvolvimento das gemas. Na safra de verão, a poda foi realizada no

fim de outubro de 2023, na safra de inverno, no início de abril de 2024 e na safra de outono, no início de novembro de 2024.

3.3.2 Avaliação das Cultivares de Lúpulo

As cultivares de lúpulo avaliadas foram: a) Alpharoma; b) Cascade; c) Chinook; d) Comet; e) Dr Rudi; f) Hallertau Magnum; g) Hallertau Mittelfruher; h) Nugget; i) Saaz; j) Smooth; k) Sorachi Ace; l) Southern Cross; m) Triple Pearl; n) Yakima Gold; o) Zeus. Foi empregado o delineamento inteiramente casualizado com 15 cultivares em 10 parcelas experimentais (plantas).

3.3.2.1 Crescimento Vegetativo

O crescimento vegetativo foi avaliado a partir do desenvolvimento da altura das plantas (m), da taxa de crescimento das plantas (HGR – *Hop Growth Rate*), da classificação de quatro estágios de crescimento, do número de ramos laterais por planta e da massa fresca das plantas após a colheita (Agehara et al., 2024; Carrubba; Marceddu; Sarno, 2022).

A altura de plantas foi mensurada com o auxílio de uma fita métrica a partir do início da condução dos ramos no fio de sustentação, a cada sete dias até que as plantas atingissem a altura da estrutura. O desenvolvimento da altura das plantas (m) foi analisado por regressões não-lineares modelo de Gompertz: $Y = a \exp^{-\exp^{-b(x-t)}}$, em que Y é altura (variável modelada no ponto x), a é o valor máximo que Y pode atingir quando x tende ao infinito, b é a velocidade com que o desenvolvimento da altura ocorre, x é a unidade de tempo na qual Y é medido, t é o número de dias que ocorre a máxima taxa de desenvolvimento da altura.

As taxas de crescimento (HGR) foram calculadas a partir do desenvolvimento de altura de plantas, de acordo com a seguinte fórmula: $HGR = Ht/GD$ em que Ht é o valor da altura em um determinado tempo e GD é o total de graus dia acumulado em um determinado tempo. As tendências de HGR foram ajustadas por regressões não-lineares de função Gaussiana $Y = a \exp^{-b(x-t)^2}$, em que Y é o HGR (variável modelada no ponto x), a é o HGR máximo alcançado, b é a velocidade com que o HGR aumenta antes e decai depois do dia que alcança seu valor máximo, x é a unidade de tempo na qual Y é medido, t é o número de dias em que o HGR atinge o valor máximo.

O crescimento das plantas foi dividido em quatro estágios de crescimento baseados nos valores de HGR e na função de pico apresentada após a aplicação da função gaussiana. O estágio I representa a fase inicial de crescimento lento, caracterizada por valores de HGR abaixo de 3 mm GDD^{-1} . O estágio II é a fase de crescimento rápido, culminando no pico da taxa de crescimento. O estágio III corresponde à fase de crescimento lento pós-pico, e o estágio IV marca a fase tardia, onde o crescimento declina acentuadamente e eventualmente cessa (Agehara et al., 2024).

A massa fresca da planta e o número de ramos laterais por planta de todas as parcelas foram avaliados durante a colheita, com auxílio de uma balança digital de bancada para a massa fresca.

3.3.2.2 Fenologia

A fenologia das cultivares de lúpulo foi determinada quanto à duração em dias dos seguintes estádios (BBCH) a partir da poda: brotação; desenvolvimento foliar e crescimento do ramo; formação de ramos laterais; emergência de inflorescência; floração; desenvolvimento e maturação dos cones (adaptação de Robbauer et al., 1995).

A determinação da mudança de fase foi realizada a partir de observações visuais realizadas a cada três dias, desde a poda até a colheita dos cones. A partir destes dados, foram construídos diagramas com a escala de duração em dias de cada uma das fases fenológicas do lúpulo.

3.3.3 Análise Estatística

O desenvolvimento da altura das plantas e as taxas de crescimento das plantas foram analisados por regressões não-lineares de modelo Gompertz e Gaussiano, respectivamente. O número de ramos laterais por planta e a massa fresca das plantas foram submetidos à análise de variância e as médias foram agrupadas pelo teste de Scott-knott ($p < 0,01$). O software R 4.4.3 foi empregado para todas as análises.

3.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Algumas cultivares não completaram o ciclo fenológico devido ao atraso no desenvolvimento vegetativo e reprodutivo, impossibilitando a coleta de seus dados nessas safras específicas. Na safra de verão (2023-2024), esse comportamento foi observado nas cultivares Alpharoma, Chinook, Dr Rudi, Hallertau Mittelfruher, Nugget, Smooth, Southern Cross. Na safra de inverno (2024), o mesmo ocorreu com as cultivares Cascade, Smooth e Southern Cross. Na safra de outono (2024-2025) as cultivares Alpharoma, Cascade, Comet, Hallertau Magnum, Hallertau Mittelfruher, Saaz e Yakima Gold também não completaram ciclo fenológico.

3.4.1 Crescimento Vegetativo

As regressões não lineares do modelo de Gompertz para altura da planta (Ht) apresentaram parâmetros significativos ($p < 0,01$) para todas as cultivares que concluíram o ciclo fenológico nas safras de verão (2023-2024), inverno (2024) e outono (2024-2025), confirmando o ajuste adequado do modelo aos dados (Tabela 3.1). Em todas as safras analisadas, o parâmetro “a”, referente à altura máxima atingida, apresentou médias numericamente similares entre as cultivares. Quanto à dinâmica de crescimento, o parâmetro “b”, que representa a velocidade de crescimento, variou conforme a safra avaliada. Na safra de verão (2023-2024), as maiores médias foram observadas para as cultivares Hallertau Magnum e Yakima Gold; na safra de inverno (2024), destacaram-se Hallertau Mittelfrüher e Sorachi Ace, enquanto na safra de outono (2024-2025) as cultivares Dr. Rudi e Smooth evidenciaram o crescimento mais acelerado. Complementarmente, a análise do parâmetro “t”, número de dias para atingir o máximo crescimento, também permitiu identificar perfis de precocidade distintos. Na safra de verão (2023-2024), Cascade e Hallertau Magnum atingiram o topo da treliça mais precocemente, ao passo que Saaz e Triple Pearl demonstraram um ciclo mais tardio. Na safra de inverno (2024), a precocidade foi verificada em Chinook, Nugget, Saaz e Zeus, contrastando com o desenvolvimento mais lento de Alpharoma e Dr. Rudi. Por fim, na safra de outono, as menores médias de “t” foram registradas para Dr. Rudi, Sorachi Ace e Zeus, enquanto as cultivares Smooth, Southern Cross e Triple Pearl caracterizaram-se por ciclos de desenvolvimento mais prolongados.

Tabela 3.1 - Modelo de regressão para altura da planta (Ht - Gompertz), R^2 e p-valor dos parâmetros de cultivares de lúpulo nas safras de verão de 2023-2024, inverno de 2024 e outono de 2024-2025.

Cultivares	Safras	Modelo de regressão	R^2	p-valor		
				a	b	t
Alpharoma	Verão	NT	NT	NT	NT	NT
	Inverno	Ht = 5,25 exp ^{-exp^{-0,07} (x - 109,80)}	0,99	6,0e ^{-11***}	<2,2e ^{-16***}	<2,2e ^{-16***}
	Outono	NT	NT	NT	NT	NT
Cascade	Verão	Ht = 6,59 exp ^{-exp^{-0,06} (x - 38,51)}	0,99	4,8e ^{-5***}	2,9e ^{-7***}	3,8e ^{-9***}
	Inverno	NT	NT	NT	NT	NT
	Outono	NT	NT	NT	NT	NT
Chinook	Verão	NT	NT	NT	NT	NT
	Inverno	Ht = 6,10 exp ^{-exp^{-0,07} (x - 77,15)}	0,99	3,5e ^{-8***}	2,2e ^{-14***}	<2,2e ^{-16***}
	Outono	Ht = 5,54 exp ^{-exp^{-0,06} (x - 80,64)}	0,99	<2,2e ^{-16***}	<2,2e ^{-16***}	<2,2e ^{-16***}
Comet	Verão	Ht = 6,03 exp ^{-exp^{-0,06} (x - 81,12)}	0,99	1,0e ^{-13***}	<2,2e ^{-16***}	<2,2e ^{-16***}
	Inverno	Ht = 5,88 exp ^{-exp^{-0,07} (x - 92,09)}	0,99	1,7e ^{-13***}	<2,2e ^{-16***}	<2,2e ^{-16***}
	Outono	NT	NT	NT	NT	NT
Dr Rudi	Verão	NT	NT	NT	NT	NT
	Inverno	Ht = 5,90 exp ^{-exp^{-0,07} (x - 111,40)}	0,99	3,4e ^{-14***}	<2,2e ^{-16***}	<2,2e ^{-16***}
	Outono	Ht = 5,40 exp ^{-exp^{-0,12} (x - 73,11)}	0,99	1,3e ^{-11***}	<2,2e ^{-16***}	<2,2e ^{-16***}
Hallertau Magnum	Verão	Ht = 5,81 exp ^{-exp^{-0,07} (x - 57,74)}	0,99	4,5e ^{-9***}	2,5e ^{-16***}	<2,2e ^{-16***}
	Inverno	Ht = 5,62 exp ^{-exp^{-0,06} (x - 88,41)}	0,99	<2,2e ^{-16***}	<2,2e ^{-16***}	<2,2e ^{-16***}
	Outono	NT	NT	NT	NT	NT
Hallertau Mittelfruher	Verão	NT	NT	NT	NT	NT
	Inverno	Ht = 5,79 exp ^{-exp^{-0,08} (x - 82,46)}	0,99	1,1e ^{-9***}	<2,2e ^{-16***}	<2,2e ^{-16***}
	Outono	NT	NT	NT	NT	NT
Nugget	Verão	NT	NT	NT	NT	NT
	Inverno	Ht = 6,43 exp ^{-exp^{-0,04} (x - 63,58)}	0,99	9,3e ^{-8***}	3,6e ^{-10***}	1,2e ^{-13***}
	Outono	Ht = 5,76 exp ^{-exp^{-0,07} (x - 80,15)}	0,99	1,2e ^{-11***}	<2,2e ^{-16***}	<2,2e ^{-16***}
Saaz	Verão	Ht = 5,65 exp ^{-exp^{-0,05} (x - 98,54)}	0,99	2,3e ^{-12***}	<2,2e ^{-16***}	<2,2e ^{-16***}
	Inverno	Ht = 6,65 exp ^{-exp^{-0,05} (x - 78,10)}	0,99	7,9e ^{-8***}	1,0e ^{-11***}	<2,2e ^{-16***}
	Outono	NT	NT	NT	NT	NT
Smooth	Verão	NT	NT	NT	NT	NT
	Inverno	NT	NT	NT	NT	NT
	Outono	Ht = 5,48 exp ^{-exp^{-0,11} (x - 97,11)}	0,99	<2,2e ^{-16***}	<2,2e ^{-16***}	<2,2e ^{-16***}
Sorachi Ace	Verão	Ht = 5,72 exp ^{-exp^{-0,05} (x - 81,18)}	0,99	<2,2e ^{-16***}	<2,2e ^{-16***}	<2,2e ^{-16***}
	Inverno	Ht = 6,02 exp ^{-exp^{-0,08} (x - 84,29)}	0,99	3,7e ^{-7***}	7,6e ^{-14***}	<2,2e ^{-16***}
	Outono	Ht = 6,56 exp ^{-exp^{-0,08} (x - 78,93)}	0,99	3,0e ^{-7***}	3,6e ^{-11***}	<2,2e ^{-16***}
Southern Cross	Verão	NT	NT	NT	NT	NT
	Inverno	NT	NT	NT	NT	NT
	Outono	Ht = 5,11 exp ^{-exp^{-0,07} (x - 107,00)}	0,99	1,9e ^{-14***}	<2,2e ^{-16***}	<2,2e ^{-16***}
Triple Pearl	Verão	Ht = 5,88 exp ^{-exp^{-0,04} (x - 94,98)}	0,99	1,4e ^{-11***}	<2,2e ^{-16***}	<2,2e ^{-16***}
	Inverno	Ht = 6,22 exp ^{-exp^{-0,06} (x - 94,57)}	0,99	4,5e ^{-10***}	4,8e ^{-16***}	<2,2e ^{-16***}
	Outono	Ht = 5,57 exp ^{-exp^{-0,06} (x - 101,20)}	0,99	<2,2e ^{-16***}	<2,2e ^{-16***}	<2,2e ^{-16***}
Yakima Gold	Verão	Ht = 5,64 exp ^{-exp^{-0,08} (x - 83,68)}	0,99	2,3e ^{-15***}	<2,2e ^{-16***}	<2,2e ^{-16***}
	Inverno	Ht = 6,02 exp ^{-exp^{-0,05} (x - 86,59)}	0,99	1,0e ^{-8***}	2,8e ^{-14***}	<2,2e ^{-16***}
	Outono	NT	NT	NT	NT	NT
Zeus	Verão	Ht = 5,09 exp ^{-exp^{-0,05} (x - 77,02)}	0,99	1,1e ^{-7***}	5,6e ^{-12***}	<2,2e ^{-16***}
	Inverno	Ht = 7,09 exp ^{-exp^{-0,04} (x - 69,76)}	0,99	3,7e ^{-6***}	1,8e ^{-8***}	3,5e ^{-13***}
	Outono	Ht = 6,45 exp ^{-exp^{-0,04} (x - 56,66)}	0,99	3,3e ^{-7***}	7,1e ^{-11***}	5,7e ^{-14***}

***: significativo (p<0,001).

A variação no tempo necessário para as cultivares atingirem a altura máxima permitiu classificá-las em precoces, medianas e tardias nas safras de verão (2023-2024), inverno (2024) e outono (2024-2025) (Figura 3.2). Na safra de verão (2023-2024), a precocidade foi evidenciada em Cascade e Hallertau Magnum; a primeira iniciou a condução aos 15 dias após a poda e atingiu o topo da treliça aos 60 dias, enquanto a segunda iniciou aos 40 dias após a poda, alcançando o topo aos 90 dias. O grupo das medianas, composto por Comet, Sorachi Ace, Yakima Gold e Zeus, iniciou a condução por volta dos 45 dias após a poda e completou o crescimento aos 120 dias. As cultivares tardias, Saaz e Triple Pearl, demandaram 60 dias para o início da condução e 140 dias para atingir o topo. Durante a safra de inverno (2024), as cultivares Chinook, Nugget, Saaz e Zeus destacaram-se como precoces, iniciando a condução aos 15 dias após a poda e chegando ao topo aos 100 dias. As cultivares consideradas medianas, Comet, Hallertau Magnum, Hallertau Mittelfruher, Sorachi Ace, Triple Pearl e Yakima Gold, iniciaram a condução aos 60 dias após a poda e completaram o crescimento aos 110 dias. O comportamento tardio foi observado em Alpharoma e Dr. Rudi, que iniciaram a condução apenas aos 90 dias após a poda, atingindo a altura máxima aos 140 dias. Por fim, na safra de outono (2024-2025), as cultivares Dr. Rudi, Sorachi Ace e Zeus foram classificadas como precoces, atingindo o topo próximo aos 100 dias após a poda, embora Zeus tenha iniciado a condução significativamente antes (15 dias após a poda) que as demais (60 dias após a poda). As cultivares consideradas medianas, Chinook e Nugget, iniciaram a condução aos 60 dias após a poda e alcançaram o topo aos 120 dias. As cultivares Smooth, Southern Cross e Triple Pearl formaram o grupo de crescimento tardio, com início de condução aos 75 dias após a poda e crescimento completo aos 150 dias.

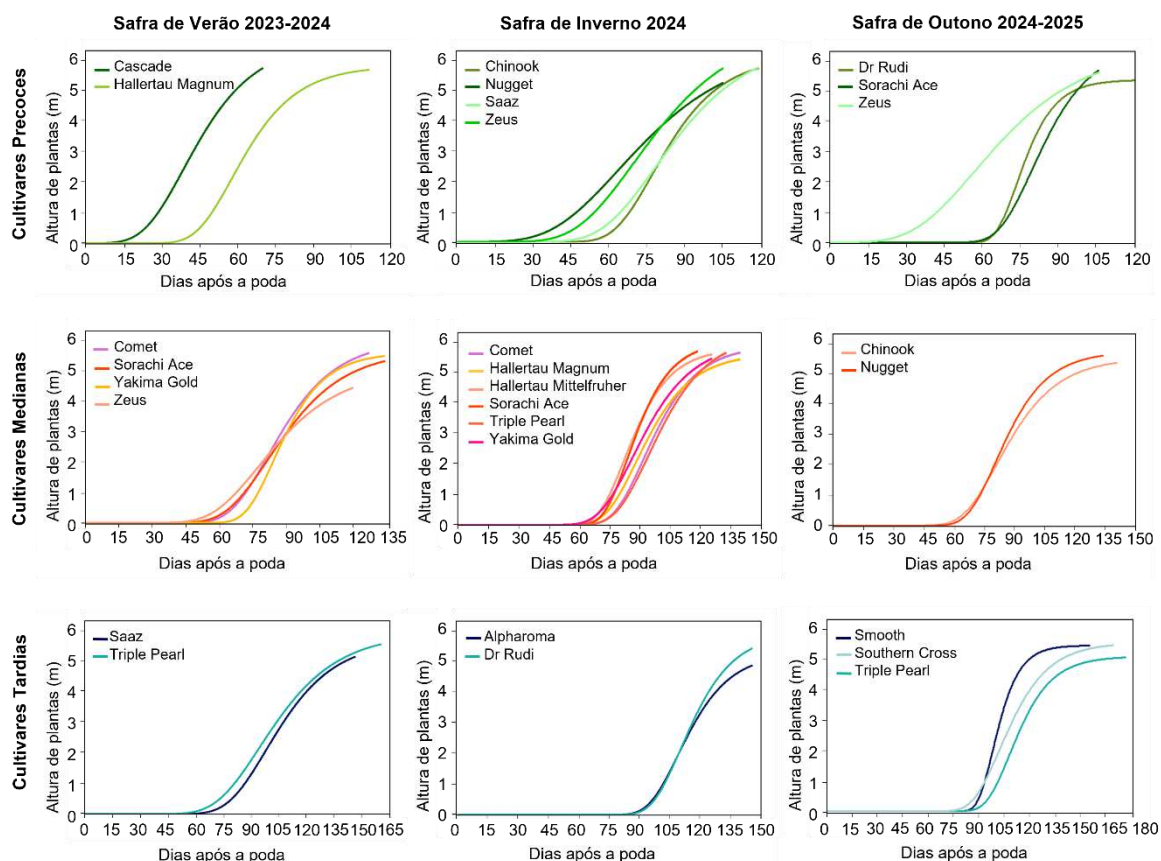


Figura 3.2 - Desenvolvimento da altura das plantas (m) de cultivares de lúpulo nas safras de verão de 2023-2024, inverno de 2024 e outono de 2024-2025.

O modelo Ht gera uma curva sigmoidal, que é a descrição padrão do crescimento vertical do lúpulo (Leles et al., 2023; Leles et al., 2025). Essa curva inicia com uma fase de crescimento lento, onde o estabelecimento da planta prevalece; seguida pela fase exponencial, que se caracteriza por um aumento substancial e acelerado da altura; e, por fim, uma fase de equilíbrio, na qual o crescimento desacelera progressivamente até a planta alcançar a altura final no topo da treliça (Agehara et al., 2024). As diferenças observadas nos parâmetros do modelo Ht entre as cultivares de lúpulo e as safras avaliadas, evidenciam a complexa interação entre o genótipo e o ambiente (Rossini et al., 2016).

Em condições subtropicais, onde o fotoperíodo natural é inferior ao crítico, o padrão de crescimento do lúpulo tende a ser amplamente variável entre cultivares, evidenciado pela variação na altura das plantas (Neves et al., 2025; Acosta-Rangel et al., 2021). No entanto, o uso da iluminação artificial para estender o fotoperíodo pode minimizar essa variabilidade (Jastrombek et al., 2022; Agehara et al., 2024). Os valores do parâmetro “a” do modelo Ht para as safras de verão (2023-2024), inverno

(2024) e outono (2024-2025), indicaram que todas as cultivares avaliadas atingiram uma altura máxima padrão. Esses resultados sugerem que a iluminação artificial possibilitou o crescimento das plantas de lúpulo até o topo da treliça (Neves et al., 2025; Leles et al., 2023). Essa maximização do crescimento vegetativo é fundamental para a produtividade, pois favorece a formação de um maior número de nós e de ramos laterais essenciais para a indução floral que ocorre após a interrupção da luz suplementar (Gallardo; Agehara; Rechcigl, 2025; Jastrombek et al., 2022).

Embora as cultivares tenham atingido uma altura final padrão (parâmetro "a" do modelo) nas safras avaliadas, a dinâmica de crescimento variou entre as cultivares, conforme indicado pelas oscilações nos parâmetros de velocidade de crescimento "b" e tempo necessário para atingir altura máxima "t". As variações observadas no parâmetro "b" destacam que algumas cultivares crescem mais rapidamente após a condução inicial no fio da treliça do que outras. Essa velocidade de crescimento é uma característica genotípica que se mostra altamente sensível e modulável por diferentes condições climáticas (Leles et al., 2025).

Na safra de verão (2023-2024), a cultivar Yakima Gold, embora não classificada como precoce pelo parâmetro "t", registrou o maior valor para o parâmetro "b". Este comportamento deve-se ao fato de a cultivar ter iniciado a condução aproximadamente aos 60 dias após a poda. Nesse período a temperatura média do ar (25 °C) e a irradiância solar eram superiores às do período imediatamente posterior à poda, o que pode ter impulsionado uma resposta de crescimento acelerado (Leles et al., 2024). É importante destacar que a iluminação artificial utilizada para o controle do fotoperíodo possui intensidade luminosa reduzida ($\sim 25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) quando comparada à luz solar plena ($\sim 1900 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Dessa forma, a suplementação atua na regulação do florescimento, mas é a maior disponibilidade de radiação solar incidente que potencializa a taxa fotossintética e o aporte de fotoassimilados necessários para o crescimento vegetativo (Kluge et al., 2015). Além da luminosidade, a temperatura do ar atua como um modulador metabólico importante. A velocidade de crescimento observado na Yakima Gold corrobora estudos anteriores que associaram a cultivar a um melhor desempenho sob temperaturas do ar mais elevadas (Leles, 2023), uma vez que temperaturas do ar entre 21 e 39 °C podem acelerar o metabolismo de algumas cultivares de lúpulo (Eriksen et al., 2020). Do ponto de vista fisiológico, esse comportamento sustenta a estratégia de poda tardia, permitindo o escalonamento de tratos culturais intensivos com outras cultivares, como a seleção

de ramos e a colheita, otimizando a logística e o manejo da cultura (Leles et al., 2023).

Os maiores valores de “b” na safra de inverno (2024) foram de Hallertau Mittelfruher e Sorachi Ace, contrastando com o desempenho inferior ou incompleto do verão. Na safra de outono (2024-2025), o destaque foi para Dr. Rudi e Smooth, cultivares que anteriormente não haviam finalizado seus ciclos (exceto Dr. Rudi no inverno). Essa divergência sugere respostas térmicas contrastantes, enquanto as primeiras foram favorecidas pela menor demanda térmica do inverno, as últimas responderam positivamente às temperaturas do ar elevadas e crescentes do outono (Marceddu, Carruba; Sarno, 2020; Leles et al., 2025).

As variações no parâmetro “t” sugerem que cada cultivar possui um período vegetativo intrínseco para atingir o porte máximo antes da indução floral (Thomas; Schwabe, 1969; McAdam et al., 2014). Nesse contexto, a precocidade verificada em Cascade e Hallertau Magnum (verão 2023-2024), Chinook, Nugget, Saaz e Zeus (inverno 2024), e Dr. Rudi, Sorachi Ace e Zeus (outono 2024-2025), indica que estas variedades demandaram um intervalo de tempo menor para completar o desenvolvimento vegetativo, e consequentemente, exigiram um menor período de exposição ao fotoperíodo estendido via iluminação artificial (Leles et al., 2023).

Além disso, foi possível constatar uma variação significativa no crescimento das cultivares entre as safras. As cultivares Cascade e Hallertau Magnum foram precoces apenas na safra de verão (2023-2025). As cultivares Chinook e Nugget, não completaram ciclo fenológico na safra de verão (2023-2024), foram precoces na safra de inverno (2024) e medianas na safra de outono (2024-2025). A cultivar Saaz foi tardia na safra de verão (2023-2024), precoce na safra de inverno (2024) e não completou ciclo na safra de outono (2024-2025). A cultivar Zeus foi mediana na safra de verão (2023-2024) e precoce nas safras de inverno (2024) e outono (2024-2025). A cultivar Dr Rudi não completou ciclo na safra de verão (2023-2024), foi tardia na safra de inverno (2024) e precoce na safra de outono (2024-2025). A cultivar Sorachi Ace foi mediana nas safras de verão (2023-2024) e inverno (2024) e precoce na safra de outono (2024-2025).

Uma das hipóteses para explicar a acentuada variabilidade no crescimento das cultivares reside no estado fisiológico e de estabelecimento das plantas (Carruba; Marceddu; Sarno, 2022). A safra de verão (2023-2024) correspondeu a primeira safra após o plantio das mudas de lúpulo em 2023. A planta de lúpulo possui um órgão subterrâneo, o rizoma, que é especializado no acúmulo de substâncias de reserva e

na formação de novos brotos (Gutierrez et al., 2024). O rizoma acumula reservas ao final de cada safra, sendo necessário um tempo médio de três anos para que sua capacidade de reserva atinja a estabilização (Donner et al., 2020). Considerando que as safras de inverno (2024) de outono (2024-2025) corresponderam, respectivamente, a segunda e a terceira safra após o plantio, presume-se que, apesar de jovens, as plantas apresentavam maiores reservas disponíveis no rizoma para o início do crescimento do que na primeira safra, o que pode ter influenciado na precocidade do crescimento de algumas cultivares (Agehara; Marceddu, 2025; Teghtmeyer, 2018).

A cultivar Sorachi Ace, embora reclassificada como precoce na safra de outono, apresentou variações mínimas nos parâmetros “t” e “b” entre as safras. Essa mudança de classificação decorreu da estabilidade de seu ciclo de desenvolvimento, enquanto as demais cultivares demandaram maior tempo para atingir o crescimento máximo na safra de outono. Essa estabilidade fenológica é um achado significativo, pois o crescimento uniforme entre safras é raramente observado em campo devido à variabilidade climática sazonal (Bauerle, 2019; Acosta-Rangel; Agehara; Rechcigl, 2024). Portanto, a constância do crescimento de Sorachi Ace frente às oscilações sazonais a caracteriza como um genótipo de desempenho superior para o cultivo em safras sucessivas em regiões subtropicais.

As regressões não lineares do modelo de Gauss para taxa de crescimento (HGR) apresentaram parâmetros significativos ($p < 0,01$) para todas as cultivares que concluíram o ciclo fenológico nas safras de verão (2023-2024), inverno (2024) e outono (2024-2025), confirmando o ajuste adequado do modelo aos dados (Tabela 3.2). Na safra de verão (2023-2024) as maiores médias para o parâmetro “a” (HGR máximo) e “b” (velocidade de formação do pico) foram registradas para as cultivares Cascade, Hallertau Magnum e Yakima Gold, enquanto, a Saaz destacou-se também no parâmetro “b”. O parâmetro “t” (número de dias para atingir HGR máximo) apresentou as menores médias para as cultivares Cascade e Hallertau Magnum, e as maiores para Saaz e Triple Pearl. Na safra de inverno (2024) a cultivar Sorachi Ace sobressaiu-se com as maiores médias nos parâmetros “a” e “b”, enquanto o parâmetro “t” apresentou as menores médias para as cultivares Chinook, Nugget, Saaz e Zeus, e as maiores para Alpharoma e Dr Rudi. Na safra de outono (2024-2025) as cultivares Dr. Rudi e Smooth apresentaram os maiores valores para os parâmetros “a” e “b”, enquanto o parâmetro “t” apresentou as menores médias para as cultivares Dr Rudi, Sorachi Ace e Zeus, e as maiores para Smooth, Southern Cross e Triple Pearl.

Tabela 3.2 - Modelo de regressão para taxa de crescimento (HGR - Gauss), R^2 e p-valor dos parâmetros de cultivares de lúpulo nas safras de verão de 2023-2024, inverno de 2024 e outono de 2024-2025.

Cultivares	Safras	Modelo de regressão	R^2	p-valor		
				a	b	t
Alpharoma	Verão	NT	NT	NT	NT	NT
	Inverno	$HGR = 7,88 \exp^{-0,002 (x - 116,40)^2}$	0,96	$2,1e^{-8***}$	$9,9e^{-15***}$	$<2,2e^{-16***}$
	Outono	NT	NT	NT	NT	NT
Cascade	Verão	$HGR = 6,66 \exp^{-0,002 (x - 47,21)^2}$	0,85	$7,4e^{-3**}$	$2,4e^{-5***}$	$6,5e^{-9***}$
	Inverno	NT	NT	NT	NT	NT
	Outono	NT	NT	NT	NT	NT
Chinook	Verão	NT	NT	NT	NT	NT
	Inverno	$HGR = 7,34 \exp^{-0,002 (x - 86,70)^2}$	0,90	$6,6e^{-5***}$	$1,7e^{-9***}$	$<2,2e^{-16***}$
	Outono	$HGR = 4,53 \exp^{-0,001 (x - 88,16)^2}$	0,90	$8,1e^{-6***}$	$3,1e^{-11***}$	$<2,2e^{-16***}$
Comet	Verão	$HGR = 5,17 \exp^{-0,001 (x - 89,79)^2}$	0,95	$1,2e^{-7***}$	$3,7e^{-13***}$	$<2,0e^{-16***}$
	Inverno	$HGR = 8,59 \exp^{-0,002 (x - 102,80)^2}$	0,94	$6,2e^{-7***}$	$1,1e^{-12***}$	$<2,2e^{-16***}$
	Outono	NT	NT	NT	NT	NT
Dr Rudi	Verão	NT	NT	NT	NT	NT
	Inverno	$HGR = 9,59 \exp^{-0,003 (x - 116,70)^2}$	0,90	$2,6e^{-5***}$	$9,2e^{-11***}$	$<2,2e^{-16***}$
	Outono	$HGR = 8,38 \exp^{-0,006 (x - 79,23)^2}$	0,93	$4,6e^{-5***}$	$2,2e^{-9***}$	$<2,2e^{-16***}$
Hallertau Magnum	Verão	$HGR = 6,62 \exp^{-0,002 (x - 66,43)^2}$	0,92	$4,0e^{-5***}$	$1,9e^{-9***}$	$<2,0e^{-16***}$
	Inverno	$HGR = 7,21 \exp^{-0,002 (x - 99,08)^2}$	0,97	$1,0e^{-9***}$	$6,6e^{-16***}$	$<2,2e^{-16***}$
	Outono	NT	NT	NT	NT	NT
Hallertau Mittelfruher	Verão	NT	NT	NT	NT	NT
	Inverno	$HGR = 8,83 \exp^{-0,003 (x - 93,23)^2}$	0,89	$1,2e^{-4***}$	$3,2e^{-9***}$	$<2,2e^{-16***}$
	Outono	NT	NT	NT	NT	NT
Nugget	Verão	NT	NT	NT	NT	NT
	Inverno	$HGR = 5,04 \exp^{-0,001 (x - 71,37)^2}$	0,86	$5,2e^{-4***}$	$4,6e^{-8***}$	$4,1e^{-14***}$
	Outono	$HGR = 5,68 \exp^{-0,002 (x - 89,23)^2}$	0,95	$1,4e^{-7***}$	$2,8e^{-13***}$	$<2,2e^{-16***}$
Saaz	Verão	$HGR = 5,01 \exp^{-0,002 (x - 107,90)^2}$	0,87	$5,4e^{-5***}$	$2,6e^{-10***}$	$<2,0e^{-16***}$
	Inverno	$HGR = 6,44 \exp^{-0,001 (x - 87,88)^2}$	0,72	$1,2e^{-2*}$	$4,0e^{-6***}$	$2,4e^{-14***}$
	Outono	NT	NT	NT	NT	NT
Smooth	Verão	NT	NT	NT	NT	NT
	Inverno	NT	NT	NT	NT	NT
	Outono	$HGR = 8,17 \exp^{-0,005 (x - 103,80)^2}$	0,98	$4,0e^{-13***}$	$<2,0e^{-16***}$	$<2,0e^{-16***}$
Sorachi Ace	Verão	$HGR = 4,63 \exp^{-0,001 (x - 90,62)^2}$	0,96	$1,2e^{-8***}$	$1,8e^{-14***}$	$<2,2e^{-16***}$
	Inverno	$HGR = 10,92 \exp^{-0,005 (x - 94,71)^2}$	0,92	$3,3e^{-5***}$	$8,6e^{-10***}$	$<2,2e^{-16***}$
	Outono	$HGR = 7,44 \exp^{-0,004 (x - 86,07)^2}$	0,93	$8,1e^{-5***}$	$5,0e^{-9***}$	$<2,0e^{-16***}$
Southern Cross	Verão	NT	NT	NT	NT	NT
	Inverno	NT	NT	NT	NT	NT
	Outono	$HGR = 5,87 \exp^{-0,004 (x - 114,80)^2}$	0,88	$1,1e^{-5***}$	$5,0e^{-12***}$	$<2,0e^{-16***}$
Triple Pearl	Verão	$HGR = 4,28 \exp^{-0,001 (x - 107,10)^2}$	0,75	$1,0e^{-3**}$	$1,6e^{-8***}$	$<2,2e^{-16***}$
	Inverno	$HGR = 9,63 \exp^{-0,003 (x - 104,50)^2}$	0,91	$1,7e^{-5***}$	$1,3e^{-10***}$	$<2,2e^{-16***}$
	Outono	$HGR = 4,73 \exp^{-0,002 (x - 108,90)^2}$	0,88	$8,5e^{-6***}$	$5,3e^{-12***}$	$<2,0e^{-16***}$
Yakima Gold	Verão	$HGR = 6,30 \exp^{-0,002 (x - 91,38)^2}$	0,88	$8,8e^{-5***}$	$1,3e^{-9***}$	$<2,2e^{-16***}$
	Inverno	$HGR = 8,70 \exp^{-0,003 (x - 97,86)^2}$	0,80	$2,3e^{-3***}$	$3,0e^{-7***}$	$<2,2e^{-16***}$
	Outono	NT	NT	NT	NT	NT
Zeus	Verão	$HGR = 3,75 \exp^{-0,001 (x - 84,35)^2}$	0,79	$2,1e^{-3**}$	$2,7e^{-7***}$	$8,2e^{-16***}$
	Inverno	$HGR = 6,23 \exp^{-0,002 (x - 75,73)^2}$	0,88	$4,5e^{-4***}$	$3,8e^{-8***}$	$2,7e^{-15***}$
	Outono	$HGR = 4,08 \exp^{-0,001 (x - 66,23)^2}$	0,83	$5,0e^{-4***}$	$6,7e^{-8***}$	$1,1e^{-13***}$

***: significativo ($p < 0,001$); **: significativo ($p < 0,01$).

O tempo para atingir o HGR máximo acompanhou a dinâmica da altura máxima, mantendo a classificação das cultivares quanto à precocidade nas safras de verão (2023-2024), inverno (2024) e outono (2024-2025) (Figura 3.3). Na safra de verão (2023-2024), as precoces Cascade e Hallertau Magnum exibiram picos de HGR aos 45 e 65 dias após a poda, respectivamente; as medianas Comet, Sorachi Ace, Yakima Gold e Zeus, aos 90 dias; e as tardias Saaz e Triple Pearl, aos 105 dias. Na safra de inverno (2024), as cultivares precoces Nugget e Zeus registraram o pico de HGR aos 75 dias, seguidas por Chinook e Saaz, aos 85 dias; entre as medianas, Hallertau Mittelfruher e Sorachi Ace atingiram o pico aos 90 dias, enquanto Comet, Hallertau Magnum, Triple Pearl e Yakima Gold o fizeram aos 100 dias após a poda; já as tardias, Alpharoma e Dr. Rudi, atingiram o pico aos 115 dias. Na safra de outono (2024-2025), a precoce Zeus apresentou o pico de HGR aos 65 dias após a poda, seguida por Dr. Rudi e Sorachi Ace, aos 80 dias; as medianas, Chinook e Nugget, exibiram o pico próximo aos 90 dias; enquanto as tardias registraram o pico aos 100 dias para Smooth e aos 110 dias para Southern Cross e Triple Pearl.

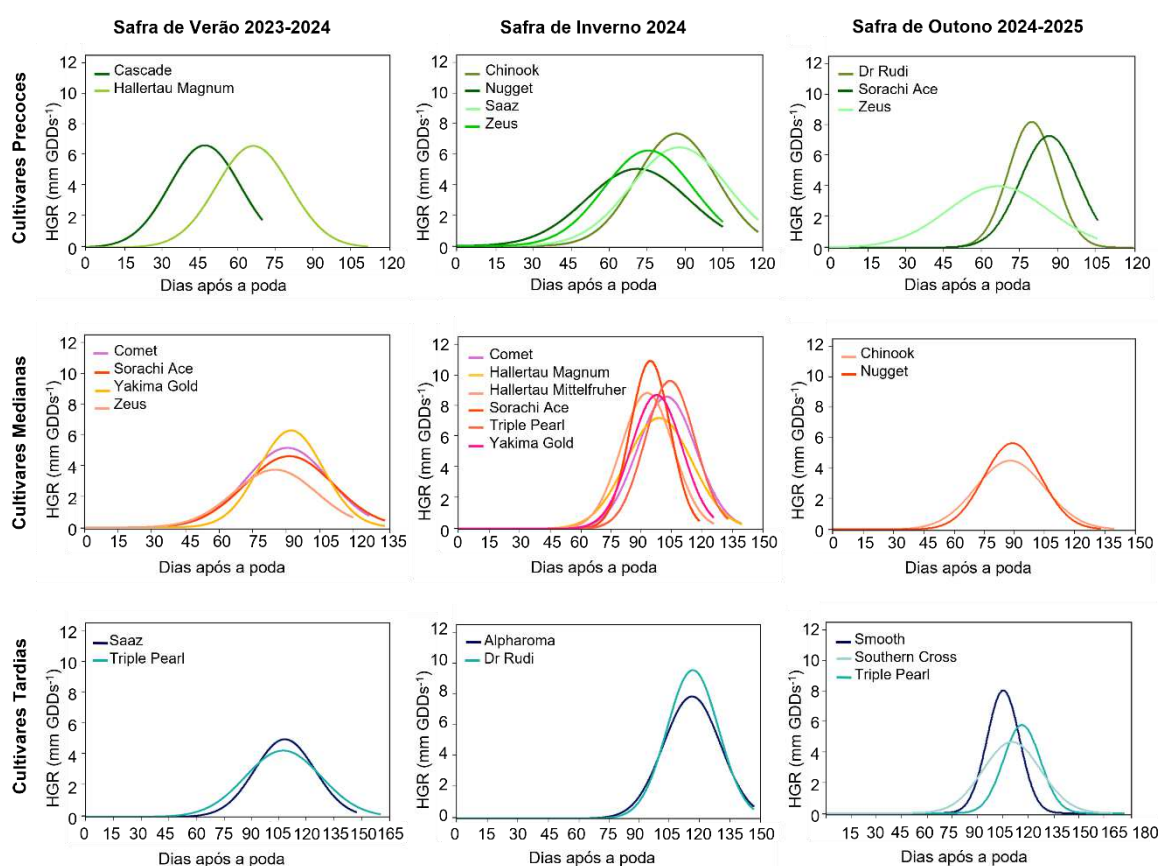


Figura 3.3 - Taxas de crescimento das plantas (HGR - mm GDDs⁻¹) de cultivares de lúpulo nas safras de verão de 2023-2024, inverno de 2024 e outono de 2024-2025.

O modelo da Taxa de Crescimento (HGR) do lúpulo é uma função de pico que expressa a eficiência de crescimento (em cm de altura) em função dos Graus-Dia Acumulados (GDDs). A dinâmica do HGR revela claramente um estágio onde o crescimento da planta é maximizado. Ao quantificar o crescimento pela energia térmica acumulada, este modelo corrobora a afirmação de que a temperatura do ar é um dos fatores ambientais chave que influencia e modula a velocidade de desenvolvimento do lúpulo (Carruba; Marceddu; Sarno, 2022). Essa relação é reforçada pelas correlações positivas e negativas observadas entre os requisitos de GDDs e o crescimento da planta em altura. Tais correlações evidenciam uma resposta genotípica distinta à energia térmica: em algumas cultivares, um maior crescimento está associado à necessidade de um maior aporte de GDDs (Agehara; Marceddu, 2025), enquanto em outras, o crescimento é favorecido por uma menor demanda de GDDs (Marceddu; Carruba; Sarno, 2020).

As diferenças observadas nos parâmetros do modelo HGR (HGR máximo “a”, velocidade de formação do pico “b” e número de dias para atingir HGR máximo “t”) confirmam que o genótipo é um fator determinante na taxa de crescimento do lúpulo. Tais variações demonstram que cada genótipo possui um comportamento intrínseco de crescimento ao interagir com o ambiente (Agehara et al., 2024; McAdam et al., 2014). Isso corrobora os achados da avaliação isolada da altura máxima, que, embora não tenha levado em conta a influência dos GDDs, já apontava maior velocidade de crescimento nas cultivares Hallertau Magnum e Yakima Gold na safra de verão, Sorachi Ace na safra de inverno e Dr Rudi e Smooth na safra de outono.

A análise dos parâmetros “a” e “b” nas safras avaliadas indica que os picos de HGR e a velocidade de formação de pico não estão necessariamente vinculados à precocidade. Essa dissociação é evidenciada pela Sorachi Ace na safra de inverno (2024), que apresentou os maiores valores de “a” e “b” apesar de seu ciclo mediano (parâmetro “t”), e pela Smooth na safra de outono (2024-2025), que registrou picos elevados mesmo sendo classificada como tardia.

A classificação do crescimento da planta em quatro estágios, baseada nos valores de HGR, apresentou faixas de valores e durações distintas entre as cultivares nas safras de verão (2023-2024), inverno (2024) e outono (2024-2025) (Tabela 3.3). Foi possível observar que a duração em dias do estágio I foi menor para as cultivares Cascade e Hallertau Magnum na safra de verão (2023-2024), Chinook, Nugget, Saaz

e Zeus na safra de inverno (2024) e Dr Rudi, Sorachi Ace e Zeus na safra de outono (2024-2025).

Tabela 3.3 - Estágios de crescimento de acordo com os intervalos de HGRs (mm GDDs⁻¹) e duração em dias de cada estágio do crescimento de cultivares de lúpulo nas safras de verão de 2023-2024, inverno de 2024 e outono de 2024-2025.

Cultivares	Safras	Estágios de crescimento							
		I		II		III		IV	
		HGRs	t	HGRs	t	HGRs	t	HGRs	t
Alpharoma	Verão	NT	NT	NT	NT	NT	NT	NT	NT
	Inverno	0,0 – 2,2	91	4,0 – 7,9	28	6,5 – 4,5	14	2,6 – 0,0	14
	Outono	NT	NT	NT	NT	NT	NT	NT	NT
Cascade	Verão	0,0 – 1,7	21	3,2 – 6,7	28	5,7 – 4,0	14	3,9 – 0,0	7
	Inverno	NT	NT	NT	NT	NT	NT	NT	NT
	Outono	NT	NT	NT	NT	NT	NT	NT	NT
Chinook	Verão	NT	NT	NT	NT	NT	NT	NT	NT
	Inverno	0,0 – 2,4	61	4,2 – 7,3	28	5,7 – 3,7	14	2,0 – 0,0	14
	Outono	0,0 – 2,4	70	3,3 – 4,5	14	4,1 – 2,6	21	1,7 – 0,0	28
Comet	Verão	0,0 – 2,5	63	3,5 – 5,2	28	4,8 – 3,1	21	2,2 – 0,0	14
	Inverno	0,0 – 2,3	77	4,2 – 8,6	28	7,2 – 5,1	14	2,9 – 0,0	21
	Outono	NT	NT	NT	NT	NT	NT	NT	NT
Dr Rudi	Verão	NT	NT	NT	NT	NT	NT	NT	NT
	Inverno	0,0 – 1,3	91	3,3 – 9,6	28	7,4 – 4,3	14	1,8 – 0,0	14
	Outono	0,0 – 1,7	63	5,0 – 8,1	14	7,3 – 1,0	21	0,1 – 0,0	21
Hallertau Magnum	Verão	0,0 – 2,6	56	4,7 – 6,6	14	6,4 – 4,7	14	2,6 – 0,0	28
	Inverno	0,0 – 2,7	77	4,6 – 7,2	21	6,7 – 3,3	21	1,7 – 0,0	21
	Outono	NT	NT	NT	NT	NT	NT	NT	NT
Hallertau Mittelfruher	Verão	NT	NT	NT	NT	NT	NT	NT	NT
	Inverno	0,0 – 1,7	70	4,0 – 8,8	21	8,2 – 3,1	21	1,2 – 0,0	14
	Outono	NT	NT	NT	NT	NT	NT	NT	NT
Nugget	Verão	NT	NT	NT	NT	NT	NT	NT	NT
	Inverno	0,0 – 2,1	42	3,0 – 5,0	28	4,9 – 3,4	21	2,4 – 0,0	14
	Outono	0,0 – 2,7	70	3,2 – 5,7	21	4,9 – 2,0	21	1,0 – 0,0	21
Saaz	Verão	0,0 – 2,8	91	4,1 – 5,0	14	4,8 – 2,6	21	1,4 – 0,0	21
	Inverno	0,0 – 2,3	56	3,5 – 6,4	35	5,8 – 4,8	14	3,6 – 0,0	14
	Outono	NT	NT	NT	NT	NT	NT	NT	NT
Smooth	Verão	NT	NT	NT	NT	NT	NT	NT	NT
	Inverno	NT	NT	NT	NT	NT	NT	NT	NT
	Outono	0,0 – 1,1	84	3,6 – 8,2	21	5,8 – 2,6	14	0,7 – 0,0	35
Sorachi Ace	Verão	0,0 – 2,2	63	3,0 – 4,6	28	4,4 – 2,9	21	2,1 – 0,0	21
	Inverno	0,0 – 2,3	77	6,1 – 10,9	21	6,4 – 2,4	14	0,6 – 0,0	7
	Outono	0,0 – 2,6	63	5,3 – 7,4	21	6,7 – 4,2	14	1,8 – 0,0	7
Southern Cross	Verão	NT	NT	NT	NT	NT	NT	NT	NT
	Inverno	NT	NT	NT	NT	NT	NT	NT	NT
	Outono	0,0 – 1,9	98	4,0 – 5,9	14	5,5 – 1,6	21	0,5 – 0,0	42
Triple Pearl	Verão	0,0 – 2,5	84	3,3 – 4,3	21	4,2 – 2,2	28	1,4 – 0,0	28
	Inverno	0,0 – 2,7	84	5,6 – 9,6	21	8,1 – 5,1	14	2,4 – 0,0	14
	Outono	0,0 – 2,5	91	3,7 – 4,7	21	3,8 – 1,5	21	0,7 – 0,0	35
Yakima Gold	Verão	0,0 – 2,5	77	4,2 – 6,3	28	5,8 – 2,7	21	1,8 – 0,0	14
	Inverno	0,0 – 2,4	77	4,9 – 8,7	21	7,5 – 4,8	14	2,3 – 0,0	14
	Outono	NT	NT	NT	NT	NT	NT	NT	NT
Zeus	Verão	0,0 – 2,4	70	3,0 – 3,7	21	3,6 – 3,1	14	2,4 – 0,0	14
	Inverno	0,0 – 2,9	56	4,5 – 6,2	21	5,4 – 3,9	14	2,3 – 0,0	14
	Outono	0,0 – 2,3	42	3,0 – 4,1	21	4,0 – 3,0	21	2,2 – 0,0	21

NT: não testado.

O Estágio I de crescimento é classificado como uma fase crítica de crescimento lento que corresponde primariamente ao período de brotação, desenvolvimento de brotos uniformes e início da condução das plantas no fio de sustentação (Agehara et al., 2024). A duração deste estágio é dependente de fatores que assegurem a uniformidade e a qualidade dos brotos, levando em consideração o potencial produtivo desejado (Leles et al., 2025). Em muitos protocolos, como o utilizado, a condução só é iniciada após a formação de um número preestabelecido de brotos por planta (Jastrombek et al., 2022; Leles et al., 2023; Leles et al., 2025), o que pode levar a uma grande variabilidade na duração do estágio I entre as cultivares. Essa variação no tempo de estabelecimento tem um impacto direto no crescimento das plantas, evidenciado pelo crescimento precoce de todas as cultivares que apresentaram menor duração do estágio I nas três safras avaliadas, enquanto aquelas com maior duração foram classificadas como tardias. Tais resultados reforçam que o período pós-poda é crítico, evidenciando que variações ambientais nesta fase modulam o comportamento diferencial das cultivares de lúpulo (Agehara et al., 2024; Leles et al., 2025).

As cultivares foram divididas em grupos distintos quanto à massa fresca das plantas e ao número de ramos laterais por planta nas safras de verão (2023-2024), inverno (2024) e outono (2024-2025) (Tabela 3.4). Na safra de verão (2023-2024) a cultivar Hallertau Magnum compôs isoladamente o grupo de maior média para massa fresca das plantas, enquanto Zeus posicionou-se no grupo de menor média. Quanto ao número de ramos laterais por planta, as cultivares Comet e Sorachi Ace formaram o agrupamento com as maiores médias, diferindo de todas as outras. Na safra de inverno (2024), o grupo que obteve as maiores médias de massa fresca das plantas foi composto pelas cultivares Chinook, Sorachi Ace e Zeus, enquanto, as cultivares Alpharoma e Dr Rudi formaram o grupo com as menores médias. Para o número de ramos laterais por planta, as cultivares Hallertau Magnum e Zeus formaram o grupo com as maiores médias. Na safra de outono (2024-2025), a cultivar Sorachi Ace compôs isoladamente o grupo de maior média para massa fresca das plantas. Em contrapartida, Dr Rudi e Triple Pearl posicionaram-se no grupo de menores médias. Em relação ao número de ramos laterais por planta, a cultivar Zeus constituiu o grupo de maior média, enquanto, a Sorachi Ace, Smooth e Triple Pearl foram agrupadas com as menores médias para esta variável.

Tabela 3.4 - Massa fresca das plantas e número de ramos laterais por planta de cultivares de lúpulo nas safras de verão de 2023-2024, inverno de 2024 e outono de 2024-2025.

Cultivares	Massa fresca das plantas (kg)			Nº de ramos laterais por planta		
	Verão	Inverno	Outono	Verão	Inverno	Outono
Alpharoma	NT	1,56 d	NT	NT	105,19 c	NT
Cascade	2,76 b	NT	NT	125,36 c	NT	NT
Chinook	NT	5,93 a	2,89 c	NT	96,05 c	97,97 b
Comet	2,30 c	3,69 b	NT	152,05 b	100,20 c	NT
Dr Rudi	NT	1,37 d	1,95 d	NT	155,67 b	110,08 b
Hallertau Magnum	3,41 a	2,29 c	NT	126,40 c	214,30 a	NT
Hallertau Mittelfruher	NT	3,04 c	NT	NT	98,16 c	NT
Nugget	NT	2,87 c	3,52 b	NT	136,04 b	101,41 b
Saaz	1,04 d	4,12 b	NT	119,85 c	79,46 d	NT
Smooth	NT	NT	2,64 c	NT	NT	79,05 c
Sorachi Ace	2,55 b	5,32 a	4,63 a	173,23 a	68,78 d	55,38 c
Southern Cross	NT	NT	2,68 c	NT	NT	103,96 b
Triple Pearl	1,22 d	2,83 c	1,79 d	107,71 c	66,80 d	76,21 c
Yakima Gold	2,08 c	3,96 b	NT	113,40 c	91,70 c	NT
Zeus	0,57 e	5,93 a	3,37 b	127,79 c	185,57 a	192,75 a
CV %	13,57	18,51	18,92	12,91	25,59	25,57
F	127,86**	55,09**	27,20**	16,40**	24,68**	24,50**

Médias seguidas pela mesma letra em cada coluna foram agrupadas pelo Scott-Knott ($p < 0,01$). NT: não testado. **: significativo ($p < 0,01$).

A massa fresca das plantas de lúpulo, neste trabalho, corresponde a parte aérea das plantas, medida imediatamente após a colheita, incluindo as hastes principais, ramos laterais, folhas e os cones. Dessa forma, a massa fresca acumulada é uma métrica que associa e quantifica tanto o crescimento vegetativo da planta quanto o seu rendimento (Leles et al., 2023; Marceddu; Carubba; Sarno, 2020). Como reflexo direto desta associação, cultivares classificadas como de crescimento precoce (parâmetro “t”) obtiveram as maiores médias para a massa fresca total das plantas na maioria das safras avaliadas.

Na safra de inverno (2024), os resultados indicam que a massa fresca das plantas também pode ter sido influenciada pela velocidade de crescimento (parâmetro “b”) (Marceddu; Carubba; Sarno, 2020). A cultivar Sorachi Ace, classificada como de crescimento mediano com os parâmetros “b” do modelo Ht e “a” e “b” do modelo HGR elevados, apresentou médias de massa fresca equivalentes às cultivares precoces

Chinook e Zeus. Em contraste, outras cultivares precoces, como Nugget e Saaz, exibiram valores de massa fresca inferiores. Tal observação sugere que a alta eficiência e intensidade do crescimento em Sorachi Ace foi suficiente para compensar sua natureza de ciclo mediano, resultando em um acúmulo de biomassa final comparável ao das cultivares mais precoces.

Em consonância com esses resultados, é provável que essas cultivares precoces também tenham apresentado um maior rendimento de cones, dada a correlação positiva estabelecida entre a massa fresca total da planta e a produção de cones (Santos et al., 2025). Esta relação é significativa, pois os cones e os ramos laterais são componentes majoritários das proporções de massa das plantas, sendo que os cones podem representar até um terço da massa fresca total da planta de lúpulo (Brant et al., 2025).

Contudo, na safra de outono (2024-2025), a média baixa de massa fresca das plantas da Dr Rudi indica que os parâmetros “t” e “b” podem não ser os únicos fatores para acúmulo de biomassa. Essa contradição sugere um padrão de crescimento acelerado, porém com desenvolvimento de ramos mais finos, formação de ramos laterais pequenos e possivelmente pouco produtivos (Acosta-Rangel; Agehara; Rechcigl, 2024; Marceddu; Carubba; Sarno, 2020).

O número de ramos laterais é considerado um parâmetro importante na análise de crescimento vegetativo, sendo um indicador de produtividade, que complementa a avaliação de altura das plantas em estudos de adaptação de cultivares de lúpulo para climas subtropicais (Acosta-Rangel et al., 2021; Ruggeri; Loreti; Rossini, 2018). Em geral, a produção total de cones é proporcional tanto ao número de ramos laterais férteis quanto ao comprimento desses ramos (Skomra; Bocianowski; Agacka, 2013).

Ao comparar as cultivares avaliadas nas safras de verão (2023-2024), inverno (2024) e outono (2024-2025) observa-se que as médias de massa fresca foram inferiores no verão, apesar do número de ramos laterais ter sido superior ao das safras subsequentes. Considerando que tanto a massa fresca quanto a quantidade de ramos laterais são indicadores positivos de produtividade (Santos et al., 2025; Ruggeri; Loreti; Rossini, 2018), essa divergência sugere que, apesar da redução numérica, as cultivares desenvolveram ramos laterais de maior comprimento nas safras de inverno e outono. Essa mudança na arquitetura da planta possivelmente resultou em uma eficiência produtiva superior, culminando em um maior acúmulo de biomassa total (Ruggeri; Loreti; Rossini, 2018).

3.4.2 Fenologia

A duração das principais fases fenológicas variou entre cultivares durante as safras de verão (2023-2024), inverno (2024) e outono (2024-2025) (Figura 3.4). Em todas as safras avaliadas, o desenvolvimento inicial das plantas foi semelhante até o início do desenvolvimento foliar e crescimento do ramo, quando as fases começaram a diferir entre cultivares. Na safra de verão (2023-2024), as cultivares Cascade e Hallertau Magnum apresentaram a fase de desenvolvimento foliar e crescimento do ramo mais curta, enquanto Saaz e Triple Pearl mais longa. As fases reprodutivas foram mais curtas para as cultivares Cascade, Sorachi Ace e Zeus o que resultou em um ciclo total reduzido para essas cultivares. A cultivar Hallertau Magnum, apesar de apresentar fases vegetativas mais curtas, teve uma maior duração das fases reprodutivas, resultando em um ciclo total comparável ao de cultivares de crescimento mediano. Os ciclos totais mais longos foram observados para as cultivares Saaz e Triple Pearl, condizentes com seu perfil de crescimento tardio. Na safra de inverno (2024), as cultivares Chinook, Nugget, Saaz e Zeus apresentaram a fase de desenvolvimento foliar e crescimento do ramo mais curta, em contraste Alpharoma e Dr Rudi registraram a maior duração nessa fase. Nas fases reprodutivas, com exceção de Chinook, as cultivares classificadas como de crescimento precoce apresentaram maior duração das fases reprodutivas, assemelhando seus ciclos totais a cultivares de crescimento mediano. Os ciclos totais mais longos foram observados para as cultivares Alpharoma e Dr Rudi, consideradas de crescimento tardio. Na safra de outono (2024-2025), as cultivares Dr Rudi, Sorachi Ace e Zeus apresentaram a fase de desenvolvimento foliar e crescimento do ramo mais curta, enquanto Smooth, Southern Cross e Triple Pearl mais longa. A cultivar Zeus manteve a tendência de ciclo total reduzido devido a duração mais curta de suas fases reprodutivas. Em contrapartida, as demais cultivares classificadas como de crescimento precoce estenderam o período reprodutivo, equiparando seu ciclo final às de crescimento mediano. Os ciclos totais mais longos foram observados para as cultivares Smooth, Southern Cross e Triple Pearl, consideradas de crescimento tardio.

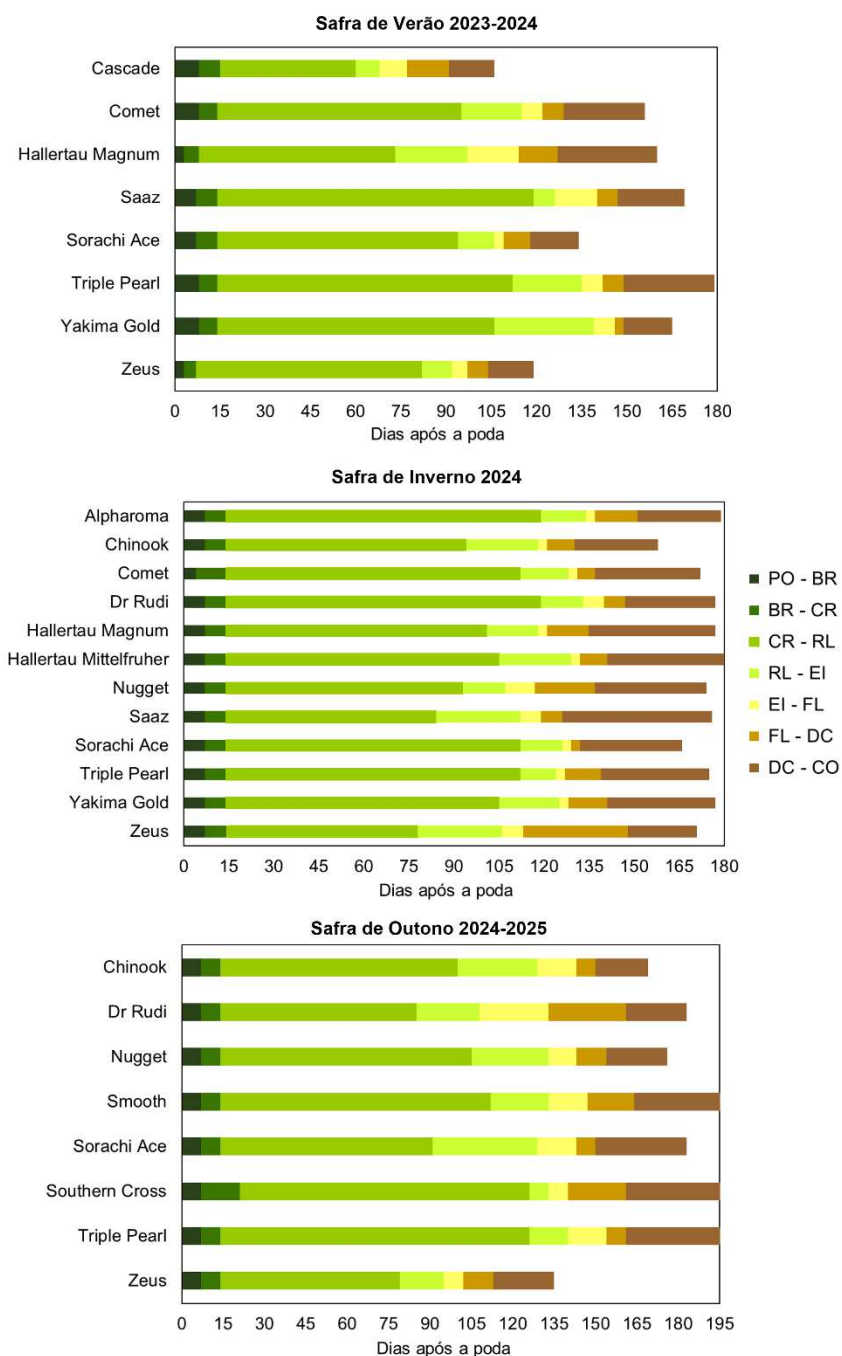


Figura 3.4 - Duração em dias dos principais estágios fenológicos das plantas de cultivares de lúpulo nas safras de verão de 2023-2024, inverno de 2024 e outono de 2024-2025. PO: Poda; BR: Brotação; CR: Desenvolvimento Foliar e Crescimento do Ramo Principal; RL: Formação de Ramos Laterais; EI: Emergência das Inflorescências; FL: Floração; DC: Desenvolvimento e Maturação dos Cones; CO: Colheita.

O desenvolvimento vegetativo completo é caracterizado pela sincronia ideal entre a emissão de folhas novas e o alongamento vertical do ramo (Agehara et al., 2024). Esta coordenação é uma característica exibida pelas plantas de lúpulo quando

os requisitos climáticos essenciais para o seu desenvolvimento pleno são satisfatoriamente atendidos, principalmente o fotoperíodo (Jastrombek et al., 2022; Agehara et al., 2024).

O uso de iluminação artificial para estender o fotoperíodo pode ter sido decisivo, pois ao anular a indução do florescimento precoce das plantas, permitiu que as cultivares apresentassem o desenvolvimento vegetativo completo nas três safras avaliadas. Este florescimento antecipado, caracterizado pela produção de flores dispersas, é comum em regiões de clima subtropical, onde o fotoperíodo natural é inferior a 14 horas de luz durante a estação de crescimento (Gutierrez et al., 2024; Acosta-Rangel et al., 2021). Para além da precocidade no florescimento, sob fotoperíodo indutivo sem o crescimento vegetativo completo, as plantas podem apresentar outras disfunções fenológicas que comprometem o rendimento. Estas disfunções incluem a ocorrência simultânea dos estágios de formação de ramos laterais, o desenvolvimento de novas flores e a senescência dos cones, ou ainda a eliminação da formação de ramos laterais (Acosta-Rangel et al., 2021; Ruggeri; Loreti; Rossini, 2018). No entanto, é importante ressaltar que nenhuma dessas disfunções foi observada neste estudo, onde as plantas apresentaram todas as fases fenológicas ordenadas. A repetição desse resultado em safras sucessivas reforça a viabilidade da técnica de manipulação do fotoperíodo como ferramenta essencial para o cultivo do lúpulo em regiões onde as condições de luz natural seriam, de outra forma, indutivas de florescimento precoce (Jastrombek et al., 2022; Agehara, 2020).

Após a redução do fotoperíodo, o tempo necessário para iniciar as fases reprodutivas ainda pode ser influenciado pelo genótipo de cada cultivar, especialmente nas etapas de emergência da inflorescência e florescimento. Isso ocorre porque cada cultivar apresenta uma necessidade intrínseca e específica para perceber e responder ao fotoperíodo indutivo (Gutierrez et al., 2024; Leles et al., 2025). Essa diferença na sensibilidade ao fotoperíodo pode justificar o comportamento observado nas cultivares Hallertau Magnum (verão 2023-2024), Nugget, Saaz e Zeus (inverno 2024) e Dr Rudi e Sorachi Ace (outono 2024-2025). Embora classificadas como cultivares de crescimento vegetativo precoce, o tempo necessário para completar a emergência da inflorescência e o florescimento pleno pode ter se estendido em função das exigências genéticas específicas.

O desenvolvimento dos cones geralmente é uma fase rápida na fenologia do lúpulo. Em condições de clima temperado, essa fase dura aproximadamente um mês

(Robbauer et al., 1995). É notável que a duração para o desenvolvimento e ponto de colheita dos cones observada nas cultivares avaliadas sob condições de clima subtropical foi muito similar ao encontrado em clima temperado.

É importante salientar que, no comparativo entre as safras avaliadas, a safra de inverno (2024) registrou a menor incidência de cultivares com ciclo fenológico incompleto. Em comparação com a primeira safra, onde as plantas ainda estavam se estabelecendo, esse resultado pode sugerir que o maior acúmulo de reservas no rizoma durante o intervalo entre safras favoreceu significativamente o desenvolvimento e a conclusão integral do ciclo de um maior número de cultivares de lúpulo na safra de inverno (Donner et al., 2020; Agehara; Marceddu, 2025; Teghtmeyer, 2018).

Além disso, na safra de inverno (2024), a duração total dos ciclos fenológicos apresentou uma variabilidade entre as cultivares menor em comparação com as safras de verão (2023-2024) e outono (2024-2025). Essa similaridade pode ser atribuída ao padrão térmico contrastante das estações. Enquanto o aumento progressivo da temperatura do ar encontrado nas safras de verão e outono amplifica as diferenças genótípicas quanto a velocidade do desenvolvimento, seja ele vegetativo ou reprodutivo, a redução térmica observada na safra de inverno desacelera o desenvolvimento das cultivares de alta demanda térmica e, assim, uniformiza a duração total do ciclo (Acosta-Rangel; Agehara; Rechcigl, 2024). Essa observação sugere que as temperaturas do ar mais amenas e decrescentes do inverno reduzem a expressão diferencial da resposta térmica dos genótipos, levando a um ciclo mais previsível.

A percepção geral dessa pesquisa é que para uma compreensão precisa do padrão de desenvolvimento das cultivares, é necessário adotar uma abordagem holística que considere todos os parâmetros que atuam como limitantes ao crescimento da planta, bem como a fenologia completa do ciclo de cada cultivar. É insuficiente analisar o crescimento unicamente pela classificação baseada no tempo necessário para atingir o crescimento máximo e a máxima taxa de crescimento. Essa análise simplificada minimiza o efeito de outros parâmetros cruciais e da caracterização fenológica do ciclo, os quais são fundamentais para sinalizar a influência da interação entre o genótipo e o ambiente. Essa resposta dada à interação genótipo e ambiente é de grande relevância, especialmente quando o foco da pesquisa é a aplicação prática de safras sucessivas em ambientes não tradicionais.

A análise do crescimento vegetativo e da fenologia de cultivares de lúpulo confirma a viabilidade da obtenção de safras sucessivas em clima subtropical sob o regime de iluminação suplementar. Contudo, é relevante notar que apenas as cultivares Sorachi Ace, Triple Pearl e Zeus apresentaram um ciclo fenológico completo nas três safras avaliadas, enquanto as demais exibiram ciclos incompletos em, no mínimo, uma safra. Salienta-se que os resultados deste trabalho foram observados em cultivares de lúpulo em seus primeiros anos produtivos. É comum que, nessa fase inicial, ocorram flutuações no desenvolvimento em decorrência do processo de estabilização da planta ao longo dos anos. Portanto, é fundamental dar continuidade ao acompanhamento dessas características nas próximas safras produtivas para verificar a estabilidade fenológica das cultivares (Leles et al., 2023).

3.5 CONCLUSÃO

O cultivo do lúpulo em safras sucessivas em condições subtropicais demonstrou ser tecnicamente viável mediante o emprego de iluminação suplementar. Nas condições avaliadas, o manejo do fotoperíodo coincidiu com a ausência de florescimento precoce e com o pleno desenvolvimento vegetativo das cultivares. O crescimento vegetativo e a fenologia das cultivares foram influenciados pelas condições climáticas de cada safra, sendo a temperatura do ar considerada um importante fator de modulação do desempenho das cultivares. Observou-se que o Estágio I do crescimento vegetativo foi crucial, atuando como fator determinante para a classificação da precocidade das cultivares. As respostas das cultivares às oscilações térmicas foram distintas: na safra de verão (2023-2024) as cultivares Cascade e Hallertau Magnum apresentaram-se como precoces, na safra de inverno (2024) foram as cultivares Chinook, Nugget, Saaz e Zeus, enquanto na safra de outono (2024-2025) foram Dr Rudi, Sorachi Ace e Zeus. A variabilidade da duração do ciclo fenológico total foi notavelmente amplificada nas safras com temperaturas do ar mais elevadas e permaneceu discreta na safra de temperaturas do ar mais baixas. Dentre todas as avaliações comparativas, a cultivar Sorachi Ace se destacou de forma promissora para o sistema de safras sucessivas, evidenciando um padrão de crescimento uniforme e estável, que se manteve consistente e independente das variações de sazonalidade e temperatura do ar observadas em cada safra.

3.6 REFERÊNCIAS

- ACOSTA-RANGEL, A.; AGEHARA, S.; RECHCIGL, J. Double-season production of hops (*Humulus lupulus* L.) with photoperiod manipulation in a subtropical climate. **Scientia Horticulturae**, v. 332, n. 113177, 2024. DOI: 10.1016/j.scienta.2024.113177
- 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. DOI: 10.21475/ajcs.21.15.05.p3192.
- AGEHARA, S. Using Supplemental Lighting to Control Flowering of Hops in Florida. **UF/IFAS Extension**, 2020. Disponível em: <<https://edis.ifas.ufl.edu/publication/HS1365>>. Acesso em: 26 fev. 2025.
- AGEHARA, S.; CARRUBBA, A.; SARNO, M.; MARCEDDU, R. Phenological Assessment of Hops (*Humulus lupulus* L.) Grown in Semi-Arid and Subtropical Climates Through BBCH Scale and a Thermal-Based Growth Model. **Agronomy**, v. 14, n. 3045, 2024. DOI: 10.3390/agronomy14123045
- AGEHARA, S.; MARCEDDU, R. Growing hops (*Humulus lupulus* L.) in subtropical climates: Effects of climatic patterns on phenology and seasonal crop performance. **Agronomy Journal**, v. 117, n. 5, 2025. DOI: 10.1002/agj2.70143
- BAUERLE, W. L. Disentangling photoperiod from hop vernalization and dormancy for global production and speed breeding. **Scientific Reports**, v. 9, 2019. DOI:10.1038/s41598-019-52548-0.
- BRANT, V.; KROFTA, K.; ZÁBRANSKÝ, P.; HAMOUZ, P.; PROCHÁZKA, P.; DREKSLER, J.; KROULÍK, M.; FRITSCHOVÁ, G. Relationship Between Dynamics of Plant Biometric Parameters and Leaf Area Index of Hop (*Humulus lupulus* L.) Plants. **Agronomy**, v. 15, n. 4, 2025. DOI: 10.3390/agronomy15040823
- CAMPOS, O. P.; FORTUNA, G. C.; GOMES, J. A. O.; NEVES, C. S.; BONFIM, F. P. G. Morphological characteristics, trichomes, and phytochemistry of inflorescences of 'Humulus lupulus' L: Comparison of cropping systems and varieties. **Australian Journal of Crop Science**, v. 17, n. 3, p. 263-274, 2023. DOI: 10.3316/informit.197703104266944.
- CARRUBBA, A.; MARCEDDU, R.; SARNO, M. Hop (*Humulus lupulus* L.): Suitability of traditional cultivars to a low-trellis farming system in a semiarid environment. **HortScience**, v. 57, p. 1409-1415, 2022. DOI: 10.21273/HORTSCI16754-22.
- DONNER, P.; POKORNÝ, J.; JEŽEK, J.; KROFTA, K.; PATZAK, J.; PULKRÁBEK, J. Influence of weather conditions, irrigation and plant age on yield and alpha-acids content of Czech hop (*Humulus lupulus* L.) cultivars. **Plant Soil Environ.** v. 66, p. 41–46, 2020. DOI: 10.17221/627/2019-PSE.
- 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. DOI: 10.21273/HORTSCI14580-19

GALLARDO, M.; AGEHARA, S.; RECHCIGL, J. Optimization of trellis design and height for double-season hop (*Humulus lupulus* L.) production in a subtropical climate: Growth, morphology, yield, and cone quality during establishment years. **European Journal of Agronomy**, v. 162, 2025. DOI: 10.1016/j.eja.2024.127415.

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**, Salvador, v. 14, n. 3, p. 858-872, set. 2021. DOI: 10.9771/cp.v14i3.33059.

GUTIÉRREZ, R. M.; OLIVEIRA, R. R.; RIBEIRO, T. H. C.; OLIVEIRA, K. K. P.; SILVA, J. V. N.; ALVES, T. C.; AMARAL, L. R.; GOMES, M. S.; GOMES, M. S.; CHALFUN-JÚNIOR, A. Unveiling the phenology and associated floral regulatory pathways of *Humulus lupulus* L. in subtropical conditions. **Planta**, v. 259, n. 150, 2024. DOI 10.1101/2023.09.15.557988.

IHGC - International Hop Growers' Convention. **Economic Commission - Summary Reports**. IHGC: Nuremberg – Germany, 2023.

JASTROMBEK, J. M.; FAGUERAZZI, M. M.; DE CÁSSIO PIEREZAN, H.; RUFATO, L.; SATO, A. J.; DA SILVA RICCE, W.; MARQUES, V. V.; LELES, N. R.; ROBERTO, S. R. Hop: An Emerging Crop in Subtropical Areas in Brazil. **Horticulturae**, v. 8, n. 393, 2022. DOI: 10.3390/horticulturae805039.

KLUGE, R. A.; TEZOTTO-ULIANA, J. V.; SILVA, P. P. M. Aspectos fisiológicos e ambientais da fotossíntese. **Rev. Virtual Quím.** v. 7, p. 56–73, 2015. DOI: 10.5935/1984-6835.20150004.

LELES, N. R.; SATO, A. J.; MISSIO, R. F.; ARALDI, L. B.; AGUIAR, A. C.; ROBERTO, S. R. Analysis of the Vegetative Growth Development and Phenology of Hop Cultivars Grown in the Subtropics Under a Two-Crop-a-Year System. **Horticulturae**, v. 11, n. 5, 2025. DOI: 10.3390/horticulturae11050498.

LELES, N. R.; SATO, A. J.; MORENO, G.; ARALDI, L. B.; ALMEIDA, A. L. D.; CARLI, V. W.; ROBERTO, S. R. Performance of hop cultivars (*Humulus lupulus* L.) under the annual double harvest system under artificial light supplementation in a subtropical climate. **Semina Ciências Agrárias**, v. 45, n. 6, p. 1833-1850, 2024. DOI: 10.5433/1679-0359.2024v45n6p1833.

LELES, N. R.; SATO, A. J.; RUFATO, L.; JASTROMBEK, J. M.; MARQUES, V. V.; MISSIO, R. F.; FERNANDES, N. L. M.; ROBERTO, S. R. Performance of Hop Cultivars Grown with Artificial Lighting under Subtropical Conditions. **Plants**, v. 12, n. 10, 2023. DOI: 10.3390/plants12101971.

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

MCADAM, E. L.; VAILLANCOURT, R. E.; KOUTOULIS, A.; WHITTOCK, S. P. Quantitative genetic parameters for yield, plant growth and cone chemical traits in hop (*Humulus lupulus* L.). **BMC Genetics**, v. 15, n. 22, 2014. DOI: 10.1186/1471-2156-15-22.

NEVES, C. S.; BONFIM, F. P. G.; CAMPOS, O. P.; VIRIATO, V.; FERNANDES, G. C.; CABRAL, M. N. F.; FORTUNA, G. C.; GONÇALVES DE OLIVEIRA, S.; RABINOWITZ,

A. N.; SARNIGHAUSEN, V. C. R.; ONO, E. O.; SILVA, J. C. R. L.; MARQUES, M. O. M. Desempenho de rendimento e estabilidade fitoquímica do lúpulo 'Comet' sob regimes contrastantes de suplementação de luz em condições subtropicais. **Plants**, v. 14, n. 3516, 2025. DOI: 10.3390/plants14223516

ROBBAUER, V. G.; BUHR, L. HACK, H.; HAUPTMANN, S.; KLOSE, R.; MEIER, U.; STAUB, R.; WEBER, E. Phanologische Entwicklungsstadien von Kultur-Hopfen (*Humulus lupulus* L.). **Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd.**, v. 47, n. 10, p. 249-253, 1995, ISSN 0027-7479.

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. 3, 2016. DOI: 10.4081/ija.2016.746.

RUGGERI, R.; LORETI, P.; ROSSINI, F. Exploring the potential of hop as a dual purpose crop in the Mediterranean environment: shoot and cone yield from nine commercial cultivars. **European Journal of Agronomy**, v. 93, p. 11-17, 2018. DOI: 10.1016/j.eja.2017.10.011.

RUGGERI, R.; ROSSINI, F.; ROBERTO, S. R.; SATO, A. J.; LOUSSERT, P.; RUTTO, L. K.; AGEHARA, S. Development of hop cultivation in new growing areas: The state of the art and the way forward. **European Journal of Agronomy**, v. 161, 2024. DOI: 10.1016/j.eja.2024.127335.

SANTOS, M.; DAL VESCO, L. L.; JOAQUIM JÚNIOR, C. Z.; COIMBRA, J. L. M.; PIERRE, P. M. O.; GUIDOLIN, A. F. Performance and variability for agronomic characteristics and brewing interest of hop genotypes in the Planalto Catarinense. **Ciência Rural**, v. 55, n. 2, 2025. DOI: 10.1590/0103-8478cr20230584.

SKOMRA, U.; BOCIANOWSKI, J.; AGACKA, M. Agro-morphological differentiation between European hop (*Humulus lupulus* L.) cultivars in relation to their origin. **Journal of Food, Agriculture & Environment**, v. 11, p. 1123 – 1128, 2013.

TEGHTMEYER, S. Hops. **Journal of Agricultural & Food Information**, v. 19, n. 1, p. 9-20, 2018. DOI: 10.1080/10496505.2018.1403248.

THOMAS, G. G., SCHWABE, W. W. Factors Controlling Flowering in the Hop (*Humulus lupulus* L.). **Ann. Bot.** v. 33, p. 781–793, 1969.

VAREJÃO-SILVA, M. A. Meteorologia e climatologia, versão digital 2; INMET: Recife, Brasil, 2006.

4 ARTIGO B – RENDIMENTO PRODUTIVO E QUALIDADE TECNOLÓGICA DE CONES DE CULTIVARES DE LÚPULO EM SAFRAS SUCESSIVAS COM SUPLEMENTAÇÃO ARTIFICIAL DE LUZ EM CLIMA SUBTROPICAL

4.1 RESUMO

O presente estudo objetivou determinar o rendimento produtivo e a qualidade tecnológica de cones de cultivares de lúpulo cultivadas em safras sucessivas com suplementação artificial de luz em região subtropical. O experimento foi realizado em Palotina, Paraná, Brasil (24° S) durante as safras de verão (2023-2024), inverno (2024) e outono (2024-2025). Utilizou-se suplementação luminosa por LED para estender o fotoperíodo diário para 17 horas na fase vegetativa. As seguintes cultivares de lúpulo foram avaliadas: a) Alpharoma; b) Cascade; c) Chinook; d) Comet; e) Dr Rudi; f) Hallertau Magnum; g) Hallertau Mittelfruher; h) Nugget; i) Saaz; j) Smooth; k) Sorachi Ace; l) Southern Cross; m) Triple Pearl; n) Yakima Gold; o) Zeus. Foram avaliados os componentes de rendimento produtivo e os teores de alfa-ácido, beta-ácido e de óleos essenciais. Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias agrupadas pelo teste Scott-knott ($p < 0,01$). Adicionalmente, as médias foram submetidas à análise multivariada pelo teste dos componentes principais (PCA) e à análise de correlação e agrupamento hierárquico. Os resultados indicaram variação sazonal no desempenho produtivo e qualitativo, com Cascade, Hallertau Magnum e Sorachi Ace destacando-se na safra de verão (2023-2024), Chinook, Comet, Sorachi Ace e Zeus na safra de inverno (2024) e Chinook, Sorachi Ace e Zeus na safra de outono (2024-2025). A análise integrada das três safras sucessivas demonstrou que as cultivares Chinook, Sorachi Ace e Zeus evidenciaram um potencial produtivo crescente e com teores relativamente estáveis de alfa-ácido, beta-ácido e concentração de óleos essenciais. Portanto, apesar da grande variabilidade ao longo das safras, a produção de lúpulo em safras sucessivas demonstrou viabilidade em condições subtropicais sob regime de iluminação suplementar.

Palavras-chave: *Humulus lupulus* L. Lupulina. Alfa-ácidos. Óleos essenciais

PRODUCTIVE YIELD AND TECHNOLOGICAL QUALITY OF HOP CONES FROM CULTIVARS IN SUCCESSIVE CROPS WITH ARTIFICIAL LIGHT SUPPLEMENTATION IN A SUBTROPICAL CLIMATE

Abstract: The present study aimed to determine the yield performance and technological quality of hop cones from cultivars grown in successive harvests with artificial light supplementation in a subtropical region. The experiment was conducted in Palotina, Paraná, Brazil (24° S) during the summer (2023-2024), winter (2024), and fall (2024-2025) seasons. LED light supplementation was utilized to extend the daily photoperiod to 17 hours during the vegetative stage. The following hop (*Humulus lupulus* L.) cultivars were evaluated: a) Alpharoma; b) Cascade; c) Chinook; d) Comet; e) Dr. Rudi; f) Hallertau Magnum; g) Hallertau Mittelfruher; h) Nugget; i) Saaz; j) Smooth; k) Sorachi Ace; l) Southern Cross; m) Triple Pearl; n) Yakima Gold; and o) Zeus. Yield components and the concentrations of alpha-acids, beta-acids, and essential oils were assessed. Data were subjected to analysis of variance (ANOVA), and means were grouped using the Scott-Knott test ($p < 0.01$). Additionally, means underwent multivariate analysis via Principal Component Analysis (PCA), correlation analysis, and hierarchical clustering. Results indicated seasonal variation in both yield and qualitative performance, with Cascade, Hallertau Magnum, and Sorachi Ace excelling in the summer season (2023-2024); Chinook, Comet, Sorachi Ace, and Zeus in the winter season (2024); and Chinook, Sorachi Ace, and Zeus in the fall season (2024-2025). The integrated analysis of the three successive harvests demonstrated that the cultivars Chinook, Sorachi Ace, and Zeus exhibited increasing yield potential alongside relatively stable levels of alpha-acids, beta-acids, and essential oil concentrations. Therefore, despite the high variability across seasons, hop production in successive harvests proved feasible under subtropical conditions using a supplemental lighting regime.

Keywords: *Humulus lupulus* L.; Lupulin; Alpha-acids; Essential oils.

4.2 INTRODUÇÃO

A planta de lúpulo (*Humulus lupulus* L.) produz inflorescências femininas, conhecidas como cones, que contêm tricomas glandulares que armazenam e secretam pequenas substâncias amarelas chamadas de lupulina. Os compostos alfa- e beta-ácidos, e os óleos essenciais contidos nas glândulas de lupulina tornam o lúpulo ingrediente básico para a indústria cervejeira por conferir principalmente amargor, sabor e aroma à bebida (Rossini et al., 2021; Campos et al., 2023). A produção comercial de lúpulo está distribuída em 23 países, estando as maiores áreas produtivas concentradas em países de clima temperado entre as latitudes 35° e 55° N ou S do Equador (Ihgc, 2023), por exemplo, as regiões de Hallertau na Alemanha e Yakima nos Estados Unidos, localizadas a 48,6°N e 46,6°N, respectivamente, que são os dois maiores polos produtivos de lúpulo no mundo (Gallardo; Agehara; Rechci, 2025). Essa distribuição geográfica das áreas de cultivo de lúpulo tradicionais está associada às exigências climáticas da planta, principalmente no que diz respeito ao fotoperíodo e à temperatura do ar (Jastrombek et al., 2022).

O lúpulo é uma planta de dia curto com fotoperíodo crítico de 16,5 h, portanto, no início da estação condições de fotoperíodo superiores ao crítico levam ao crescimento vertical das plantas, enquanto o fotoperíodo inferior induz o florescimento precoce e não permite a formação de um número de nós suficiente para maximização da produção de cones (Jastrombek et al., 2022; Gutiérrez et al., 2024). A faixa de latitude entre 35° e 55° N ou S do Equador permite que as plantas produzidas nessas regiões encontrem no início da estação dias longos que maximizam o crescimento vegetativo e a indução da floração só ocorre quando a duração do dia começa a encurtar naturalmente (Robbauer et al., 1995). Somado ao fotoperíodo, o clima temperado característico dessas regiões foi por muito tempo considerado limitante para o cultivo, com o desenvolvimento das plantas ocorrendo durante a primavera fresca e o verão quente, enquanto durante o inverno frio passavam por um período de dormência (Acosta-Rangel et al., 2021; Acosta-Rangel; Agehara; Rechci, 2024).

Nos últimos anos, a expansão do setor de cervejarias artesanais em todo o mundo tem impulsionado o cultivo de lúpulo fora das regiões tradicionais de produção (Gallardo; Agehara; Rechci, 2025). Uma estratégia para impulsionar o cultivo de lúpulo nesses países emergentes é aproveitar o efeito "*terroir*" dos cones de lúpulo produzidos localmente para diferenciar suas cervejas (Ruggeri et al., 2024). Essa

tendência de produção tem impulsionado pesquisas até em regiões de baixa latitude, entre as quais a Flórida, EUA (Agehara 2020; Acosta-Rangel et al., 2021; Acosta-Rangel; Agehara; Rechcigl, 2024) e o Paraná, Brasil (Leles et al., 2023; Leles et al., 2024). As pesquisas realizadas nestas regiões subtropicais geralmente estão associadas ao uso de suplementação artificial de luz para complementar o fotoperíodo diário durante o crescimento das plantas a fim de controlar o florescimento precoce das plantas de lúpulo. Os resultados encontrados até então indicam que ao complementar o fotoperíodo diário, as plantas apresentam crescimento vegetativo completo atingindo a altura máxima da treliça de sustentação, e a floração só é estimulada ao desligar a iluminação, permitindo que as plantas apresentem alta capacidade de rendimento produtivo (Agehara, 2020; Acosta-Rangel; Agehara; Rechcigl, 2024; Leles et al., 2023). Além disso, a suplementação luminosa possibilita o cultivo de lúpulo em mais de uma safra ao ano, devido a ocorrência de invernos pouco rigorosos que possibilitam o crescimento completo das plantas durante o outono e inverno (Acosta-Rangel; Agehara; Rechcigl, 2024; Leles et al., 2024).

A identificação de genótipos que se adaptem às novas áreas de cultivo com produção de cones em quantidade e qualidade, levando em consideração as condições climáticas locais e o sistema de produção em mais de uma safra anual, é essencial para a estruturação da cadeia produtiva de lúpulo (Acosta-Rangel et al., 2021; Ruggeri et al., 2024). Portanto, objetivou-se com este estudo caracterizar o rendimento produtivo e a qualidade tecnológica de cones de cultivares de lúpulo cultivadas em safras sucessivas e com suplementação artificial de luz em região de clima subtropical.

4.3 MATERIAL E MÉTODOS

4.3.1 Descrição da Área Experimental e Manejo da Cultura de Lúpulo

Foram avaliados o rendimento produtivo e a qualidade tecnológica de cones de cultivares de lúpulo (*Humulus lupulus* L.) conduzidas sob suplementação luminosa artificial durante as safras de verão de 2023-2024, inverno de 2024 e outono de 2024-2025.

O experimento foi realizado em uma área experimental da Universidade Federal do Paraná – UFPR, Setor Palotina (24°17'40.05" S e 55°50'23.16" W), no

município de Palotina, Paraná, Brasil. A área está situada em altitude de 332 m, onde o solo predominante é o Latossolo vermelho eutroférrico, de origem basáltica e textura argilosa e o clima é do tipo Cfa subtropical úmido, conforme a classificação de Köppen, com temperatura do ar média anual de 20,8 °C, pluviosidade média anual de 1.508 mm, fotoperíodo máximo do verão de 13,5 h, e mínimo no inverno de 10,5 h (Leles et al., 2023). As médias mensais de temperatura do ar (°C) e precipitação pluviométrica (mm) foram determinadas a partir de medições diárias pela estação meteorológica S824, localizada na entidade do SIMEPAR no município de Palotina PR (24°31' S, 53°90' W), em 2023, 2024 e 2025 (Figura 4.1).

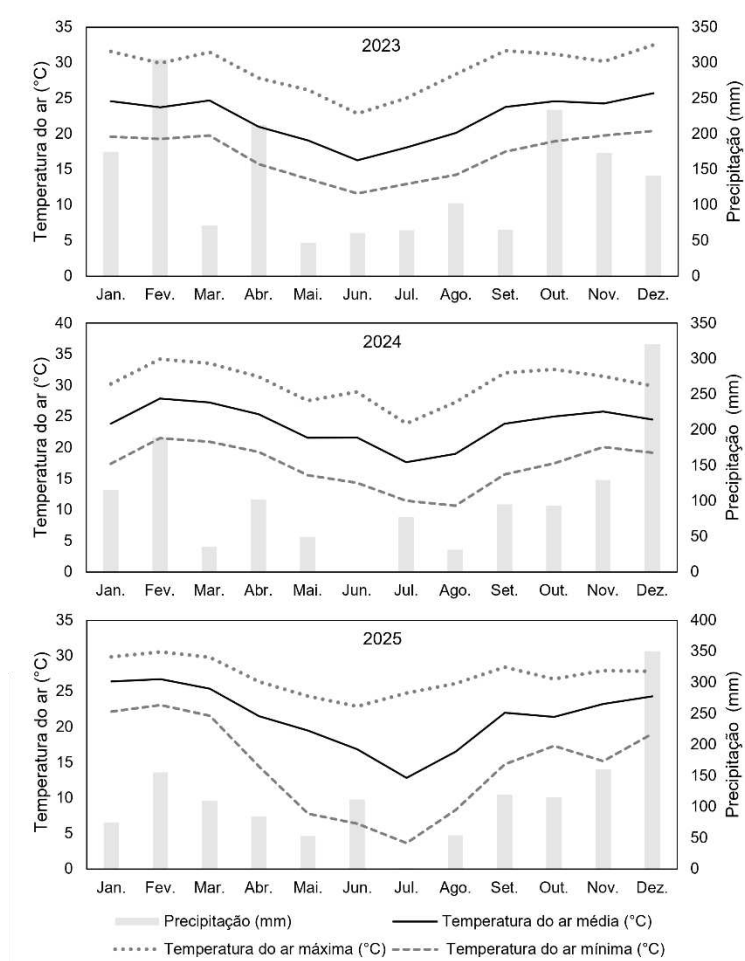


Figura 4.1 - Temperaturas máximas, médias e mínimas do ar e precipitação mensal para Palotina, PR, em 2023, 2024 e 2025.

A área experimental conta com sistema de irrigação por gotejamento de fita dupla e sistema de suplementação luminosa com lâmpadas LED. A suplementação artificial de luz foi utilizada durante a fase de crescimento vegetativo das cultivares visando controlar a floração precoce das plantas. Após as plantas atingirem a altura

total da treliça de 5,5 m, a suplementação luminosa foi desligada permanentemente para que o fotoperíodo curto estimulasse a floração das plantas.

O sistema de suplementação artificial de luz foi composto por lâmpadas bulbos LED Philips GreenPower DR/W 10W, com espectro de luz predominante de 450 nm (azul) e pico de 650 nm (vermelho), desenvolvidas para inibir a floração de plantas de dias curtos, contendo fluxo de fótons de $25 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. As lâmpadas foram instaladas no topo das treliças e espaçadas a cada 10 m na linha de plantio. O sistema de acionamento das lâmpadas automático é controlado por um temporizador, que consiste em acionar os LEDs 30 min antes do pôr-do-sol, mantendo-os ligados por um período que totalize 17 h de fotoperíodo diário. A determinação dos horários diários de acionamento e desligamento da suplementação luminosa foi obtida a partir dos horários do pôr-do-sol e fotoperíodo diários para a latitude de Palotina, PR (Leles et al., 2023). Para tanto, os cálculos foram feitos a partir da equação: $N = 2/15 \arcsin(-\tan \varphi \times \tan \delta)$, em que: N = duração do dia em horas; φ = latitude geográfica (valores negativos para o hemisfério Sul); e δ = declinação solar, o qual foi obtido a partir da equação: $\delta = 23.45 \sin[360(284+n)/365]$, em que: n = dias Julianos do ano. Os valores foram transformados em radianos para seno e tangente (Varejão-Silva, 2006).

As mudas constituídas de plantas femininas foram propagadas por micropropagação *in vitro* no viveiro Lúpulos Ninkasi, Teresópolis, RJ e plantadas em outubro de 2022, conduzidas em sistema vertical de treliça alta com tutoramento em “V” na linha, com seis ramos por planta (três em cada fio de sustentação), altura de 5,5 m e espaçamento de 1,0 m entre plantas e 3,0 m entre linhas.

Em todas as safras avaliadas, foi realizada a poda das plantas rente ao solo para estimular o desenvolvimento das gemas. Na safra de verão, a poda foi realizada no fim de outubro de 2023, na safra de inverno, no início de abril de 2024, e na safra de outono, no início de novembro de 2024.

4.3.2 Avaliação das Cultivares de Lúpulo

As cultivares de lúpulo avaliadas foram: a) Alpharoma; b) Cascade; c) Chinook; d) Comet; e) Dr Rudi; f) Hallertau Magnum; g) Hallertau Mittelfruher; h) Nugget; i) Saaz; j) Smooth; k) Sorachi Ace; l) Southern Cross; m) Triple Pearl; n) Yakima Gold; o) Zeus. Foi empregado o delineamento inteiramente casualizado com 15 cultivares em 10

parcelas experimentais (plantas).

4.3.2.1 Rendimento Produtivo

O ponto de colheita dos cones foi definido a partir de observações sensoriais diárias quando os cones apresentaram aspecto fechado e papeliformes ao toque, com mudança sutil de cor verde para amarelada e intensificação da coloração dourada da lupulina, além do potencial de aroma totalmente desenvolvido (Leles, 2023).

Os componentes de rendimento produtivo avaliados na colheita para cada cultivar foram: número de cones por ramo lateral, número de cones por planta, massa fresca do cone, comprimento e largura do cone, produção de cones fresco por planta e produtividade por hectare.

O número de cones por ramo lateral foi determinado utilizando a fórmula (x/y) em que: x corresponde ao número de cones por planta e y ao número de ramos por planta. O número de cones por planta foi determinado utilizando a fórmula $(x \times 100/y)$ em que x corresponde a massa de cones frescos por planta e y à massa de 100 cones. A massa fresca do cone (g) foi determinada utilizando uma balança digital de precisão. O comprimento e a largura dos cones frescos foram avaliados com auxílio de um paquímetro digital (mm). A produção de cones fresco por planta (kg planta) de cada cultivar foi determinada pela pesagem de todos os cones de cada planta em balança digital de precisão. A produtividade estimada (kg ha^{-1}) foi determinada utilizando a fórmula $x \times (10000/y)$ em que x corresponde a produção de cones fresco por planta e y à área que cada planta ocupa (3 m^2).

4.3.2.2 Qualidade Tecnológica dos Cones

Após cada colheita, obteve-se uma amostra composta dos cones de todas as plantas de cada cultivar. Esse material foi submetido a um processo de secagem sob ar forçado a frio (20°C) até atingir 10% de umidade. Em seguida, foram retiradas subamostras de 50 g (em triplicata) de cada amostra composta, as quais foram embaladas a vácuo para preservação até as análises químicas. Determinaram-se, também em triplicata, os teores de alfa e beta-ácidos e a concentração de óleos essenciais.

A determinação dos teores de alfa- e beta-ácidos foi realizada a partir da

extração dos ácidos da amostra de lúpulo seguida de análise espectrofotométrica em três comprimentos de onda (Egts et al., 2012). A extração dos ácidos foi realizada utilizando uma amostra de 2,5 g de lúpulo (moído em pó fino) adicionada a 50,0 mL de metanol. A mistura foi agitada por 30 min em temperatura ambiente seguida de um repouso de 10 min. Após o repouso, foi realizada uma filtração em membrana millipore (0,45 μm) para remoção do material particulado. Uma alíquota de 50 μL do filtrado foi colocada em um balão volumétrico de 25 mL e o volume foi completado com a solução extratora NaOH metanólico (0,5 mL de 6M NaOH em 250 mL de metanol). O resultante desta solução foi colocado em uma cubeta de quartzo de percurso óptico de 1 cm para a avaliação no espectro UV visível, usando como branco 50 μL de metanol em 25 mL de NaOH metanólico. Os valores de absorbância foram obtidos para os comprimentos de onda de 275, 325 e 355 nm. A partir destas leituras foram determinados o teor de alfa-ácido (%) utilizando a fórmula $(-51,26 \times A_{355\text{nm}}) + (73,79 \times A_{325\text{nm}}) - (19,07 \times A_{275\text{nm}})$, e teor de beta-ácido (%) utilizando a fórmula $(55,27 \times A_{355\text{nm}}) - (47,59 \times A_{325\text{nm}}) + (5,1 \times A_{275\text{nm}})$ em que A corresponde a leitura da absorbância em cada comprimento de onda.

A determinação da concentração de óleos essenciais foi realizada a partir da hidrodestilação dos óleos essenciais utilizando o aparelho Clevenger com período de extração de 4 h após a fervura (Asbc, 2010). Foram inseridas 20 g de amostra seca em um balão volumétrico com 500 mL de água destilada. Em seguida, o balão foi adaptado ao extrator e levado à manta aquecedora. O rendimento do óleo essencial extraído da biomassa vegetal foi calculado utilizando a fórmula: concentração de óleo essencial ($\text{mL } 100\text{g}^{-1}$) $(V_o \times 5)$ em que V_o corresponde ao volume de óleo extraído (mL).

4.3.3 Análises Estatísticas

Os dados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) pelo teste de F, e quando significativo, as médias foram agrupadas pelo teste de Scott-knott ($p < 0,01$). Foi realizada a transformação Box-Cox nas médias de alfa-ácidos da safra de verão de 2023-2024; número de cones por ramo lateral, número de cones por planta, produção de cones fresco por planta e produtividade estimada da safra de inverno de 2024; número de cones por ramo lateral e número de cones por planta da safra de outono de 2024-2025. Adicionalmente, as médias das variáveis foram submetidas à

análise multivariada pelo teste dos componentes principais (PCA), à análise de correlação e agrupamento hierárquico. O software R 4.4.3 foi empregado para todas as análises.

4.4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Algumas cultivares não produziram cones devido ao atraso no desenvolvimento vegetativo e reprodutivo, impossibilitando a coleta de seus dados nessas safras específicas. Na safra de verão (2023-2024), esse comportamento ocorreu nas cultivares Alpharoma, Chinook, Dr. Rudi, Hallertau Mittelfruher, Nugget, Smooth e Southern Cross. Já na safra de inverno (2024), a ausência de produção restringiu-se às cultivares Cascade, Smooth e Southern Cross. Por fim, na safra de outono (2024-2025), não produziram as cultivares Alpharoma, Cascade, Comet, Hallertau Magnum, Hallertau Mittelfruher, Saaz e Yakima Gold.

4.4.1 Rendimento Produtivo

As cultivares que produziram cones se agruparam de maneira distinta para o número de cones por ramo lateral e o número de cones por planta ao longo das safras de verão (2023-2024), inverno (2024) e outono (2024-2025) (Tabela 4.1). Na safra de verão (2023-2024), a cultivar Cascade compôs isoladamente o grupo de maior média para ambos os componentes de rendimento (número de cones por ramo lateral e por planta). Os grupos de menores médias para esses componentes foram formado por Zeus para número de cones por ramo lateral, e por Zeus e Triple Pearl para o número de cones por planta. Na safra de inverno (2024), a análise de agrupamento posicionou a cultivar Sorachi Ace no grupo de maior média para cones por ramo lateral, em oposição à Alpharoma, que compôs isoladamente o grupo de menor média. Para o número de cones por planta, o grupo de maiores médias foi constituído por Chinook, Sorachi Ace e Zeus, permanecendo a Alpharoma como a única integrante do agrupamento de menor média. Na safra de outono (2024-2025), a cultivar Sorachi Ace novamente esteve no agrupamento de maior média para o número de cones por ramo lateral, ao passo que Southern Cross e Triple Pearl compuseram o grupo de menores médias. Quanto ao número de cones por planta, o grupo de maiores médias foi formado pelas cultivares Dr. Rudi e Sorachi Ace, enquanto a Triple Pearl compôs

isoladamente no grupo de menor média dessa safra.

Tabela 4.1 - Número de cones por ramo lateral e número de cones por planta de cultivares de lúpulo nas safras de verão de 2023-2024, inverno de 2024 e outono de 2024-2025.

Cultivares	Nº de cones por ramo lateral			Nº de cones por planta		
	Verão	Inverno	Outono	Verão	Inverno	Outono
Alpharoma	NT	1,36 g	NT	NT	145,79 f	NT
Cascade	21,79 a	NT	NT	2.587,08 a	NT	NT
Chinook	NT	30,02 b	17,42 b	NT	2.554,68 a	1.516,94 b
Comet	9,51 c	13,85 c	NT	1.505,56 c	1.358,08 c	NT
Dr Rudi	NT	3,37 f	19,32 b	NT	502,26 e	2.099,95 a
Hallertau Magnum	17,39 b	3,45 f	NT	1.777,41 b	672,45 d	NT
Hallertau Mittelfruher	NT	6,15 e	NT	NT	554,91 d	NT
Nugget	NT	8,80 d	7,33 c	NT	1.159,15 c	689,98 c
Saaz	4,93 d	14,94 c	NT	551,94 d	1.134,04 c	NT
Smooth	NT	NT	8,48 c	NT	NT	568,73 c
Sorachi Ace	10,64 c	47,09 a	41,42 a	1.888,85 b	2.727,39 a	2.167,99 a
Southern Cross	NT	NT	5,03 d	NT	NT	507,84 c
Triple Pearl	3,81 d	6,33 e	4,36 d	344,11 e	412,25 e	314,47 d
Yakima Gold	18,72 b	22,59 b	NT	1.729,99 b	2.013,99 b	NT
Zeus	1,55 e	13,58 c	7,70 c	189,38 e	2.376,86 a	1.405,05 b
CV %	13,52	5,05	0,11	13,32	5,07	0,53
F	254,55**	86,78**	40,46**	238,03**	127,98**	69,88**

Médias seguidas pela mesma letra em cada coluna foram agrupadas pelo Scott-Knott ($p < 0,01$). NT: não testado. **: significativo ($p < 0,01$).

Em ciclos fenológicos completos com fases ordenadas, os cones de lúpulo se desenvolvem em estruturas chamadas ramos laterais. Esses ramos se originam nas axilas das folhas do caule principal da planta, próximo ao final do período de crescimento vertical (Gallardo; Agehara; Rechcigl, 2025; Gutiérrez et al., 2024). Portanto, o número de nós visíveis no ramo principal, o número e o comprimento dos ramos laterais são componentes críticos para a formação de cones em número (Ruggeri; Loreti; Rossini, 2018; Skomra et al., 2013).

Em regiões de clima subtropical sob regime de iluminação suplementar, cultivares que manifestam um crescimento do caule principal mais rápido e uma formação mais precoce dos ramos laterais tendem a produzir um maior número de cones (Leles et al., 2023; Leles et al., 2024). Sob essa perspectiva, infere-se que o

maior número de cones observado para as cultivares Cascade (verão 2023-2024), Chinook, Sorachi Ace e Zeus (inverno 2024) e Dr. Rudi e Sorachi Ace (outono 2024-2025), esteja associado a um vigoroso desenvolvimento vegetativo durante suas respectivas safras.

Na safra de inverno (2024), as cultivares apresentaram um aumento significativo no número de cones, seja por ramo lateral e ou por planta, em comparação com a primeira safra (verão 2023-2024), com exceção da Hallertau Magnum. Esse comportamento corrobora a premissa de que o rendimento produtivo do lúpulo evolui progressivamente durante os primeiros anos de cultivo, período em que a cultura atinge a maturidade fisiológica necessária para a plena expressão de seu potencial genético (Acosta-Rangel; Agehara; Rechcigl, 2024). Embora a tendência esperada seja o aumento produtivo com o avanço das safras, verificou-se que na safra de outono (2024-2025) a maioria das cultivares apresentou médias inferiores às registradas no inverno (2024), sendo a Dr. Rudi a única exceção a esse declínio. Essa redução generalizada no número de cones sugere um desenvolvimento vegetativo menos vigoroso e taxas de crescimento mais lentas durante o terceiro ciclo sucessivo de produção, possivelmente devido ao desgaste fisiológico ou às condições ambientais do período (Leles et al., 2023; Ruggeri; Loreti; Rossini, 2018).

Embora em menor escala, as cultivares mantiveram a similaridade no padrão relativo de produção de cones (em número) da safra de inverno (2024) na safra de outono (2024-2025). As cultivares Chinook, Sorachi Ace e Zeus permaneceram em destaque, com valores de número de cones de medianos a altos. Essa estabilidade no desempenho relativo, a despeito das oscilações climáticas sazonais e do desgaste fisiológico das plantas, evidencia a consistência produtiva desses genótipos. Tal adaptabilidade os qualifica como promissores para o cultivo em safras sucessivas sob condições subtropicais (Acosta-Rangel; Agehara; Rechcigl, 2024).

Quanto à massa fresca do cone, observou-se a formação de agrupamentos distintos entre as cultivares ao longo das safras de verão (2023-2024), inverno (2024) e outono (2024-2025) (Tabela 4.2). Na safra de verão (2023-2024), as cultivares Comet, Hallertau Magnum e Sorachi Ace compuseram o grupo de maiores médias, enquanto Saaz, Triple Pearl e Yakima Gold o de menores médias. Na safra de inverno (2024), o grupo de maiores médias foi integrado pelas cultivares Comet Hallertau Magnum e Zeus, em contrapartida, Dr. Rudi, Hallertau Mittelfruher e Saaz constituíram o grupo de menores médias. Na safra de outono (2024-2025), a cultivar Zeus compôs

isoladamente o grupo de maior média, enquanto as cultivares Dr Rudi e Southern Cross formaram o grupo de menores médias.

Tabela 4.2 – Massa fresca do cone de cultivares de lúpulo nas safras de verão de 2023-2024, inverno de 2024 e outono de 2024-2025.

Cultivares	Massa fresca do cone		
	Verão	Inverno	Outono
Alpharoma	NT	0,54 d	NT
Cascade	0,35 c	NT	NT
Chinook	NT	0,74 b	0,70 b
Comet	0,52 a	0,89 a	NT
Dr Rudi	NT	0,35 e	0,21 d
Hallertau Magnum	0,49 a	0,82 a	NT
Hallertau Mittelfruher	NT	0,45 e	NT
Nugget	NT	0,65 d	0,69 b
Saaz	0,29 d	0,38 e	NT
Smooth	NT	NT	0,40 c
Sorachi Ace	0,55 a	0,49 d	0,49 c
Southern Cross	NT	NT	0,29 d
Triple Pearl	0,28 d	0,61 c	0,42 c
Yakima Gold	0,31 d	0,49 d	NT
Zeus	0,43 b	0,88 a	1,00 a
CV %	10,43	12,51	14,16
F	69,83	61,49**	118,59**

Médias seguidas pela mesma letra em cada coluna foram agrupadas pelo Scott-Knott ($p < 0,01$). NT: não testado. **: significativo ($p < 0,01$).

A massa fresca do cone é uma métrica intimamente relacionada ao tamanho do cone, o qual é quantificado por suas dimensões lineares, ou seja, o comprimento e a largura (em centímetros) (Leles et al., 2023). Em plantas de lúpulo que desenvolvem um número de cones excessivamente elevado, a massa individual desses cones pode ser minimizada. Isso ocorre porque os cones atuam como drenos primários na planta e, quando em grande quantidade, entram em forte competição entre si pelos fotoassimilados disponíveis. Essa intensa competição por recursos limita a quantidade de biomassa que cada cone consegue acumular para o seu crescimento individual (Fagherazzi, 2020; Taiz; Zeiger, 2017). Consequentemente, plantas com uma carga de cones muito alta tendem a produzir cones de massa e tamanho reduzidos em comparação com plantas que possuem um número menor de cones, mas com suprimento adequado de fotoassimilados (Leles et al., 2024). A

cultivar Cascade na safra de verão (2023-2024) ilustra bem essa dinâmica, apesar de ter as maiores médias de número de cones (por ramo lateral e por planta), sua massa fresca do cone foi visivelmente baixa.

Em contrapartida, as cultivares Chinook, Nugget, Sorachi Ace e Zeus mantiveram sua massa fresca estável entre as safras de inverno (2024) e outono (2024-2025), independentemente da variação na quantidade de cones produzidos. Esse comportamento indica que, nestes genótipos, o peso e as dimensões dos cones são características de elevada estabilidade fenotípica, não sendo significativamente afetados pela densidade de produção ou pelas oscilações no desenvolvimento vegetativo (Gonsaga, 2021).

Para o comprimento e a largura do cone observou-se a formação de agrupamentos distintos entre as cultivares ao longo das safras de verão (2023-2024), inverno (2024) e outono (2024-2025) (Tabela 4.3). Na safra de verão (2023-2024), as cultivares Comet e Sorachi Ace formaram o grupo de maiores médias para o comprimento do cone, enquanto Cascade e Triple Pearl formaram o grupo de menores médias. Para largura do cone, a cultivar Comet compôs sozinha o grupo de maior média, e Cascade o grupo de menor média. Na safra de inverno (2024) o grupo de maior média para comprimento do cone foi formado unicamente por Hallertau Magnum, enquanto o de menores médias por Alpharoma, Dr Rudi, Saaz e Sorachi Ace. Para largura do cone o grupo de maiores médias foi formado pelas cultivares Chinook, Comet, Hallertau Magnum, Nugget, Triple Pearl e Zeus, o restante das cultivares formou o grupo de menores médias. Na safra de outono (2024-2025) as cultivares Chinook, Nugget, Triple Pearl e Zeus compuseram o grupo de maiores médias para comprimento do cone, enquanto a cultivar Dr Rudi formou sozinha o grupo de menor média. Para largura do cone, o grupo de maiores médias foi composto pelas cultivares Nugget e Zeus, e o de menores médias por Dr Rudi e Southern Cross.

Tabela 4.3 - Comprimento e largura do cone de cultivares de lúpulo nas safras de verão de 2023-2024, inverno de 2024 e outono de 2024-2025.

Cultivares	Comprimento do cone (cm)			Largura do cone (cm)		
	Verão	Inverno	Outono	Verão	Inverno	Outono
Alpharoma	NT	2,35 d	NT	NT	1,45 b	NT
Cascade	1,62 d	NT	NT	0,98 d	NT	NT
Chinook	NT	3,02 b	2,69 a	NT	1,78 a	1,55 b
Comet	2,47 a	2,88 b	NT	1,74 a	1,88 a	NT
Dr Rudi	NT	2,47 d	1,67 d	NT	1,52 b	1,22 d
Hallertau Magnum	2,14 b	3,67 a	NT	1,52 b	1,87 a	NT
Hallertau Mittelfruher	NT	2,70 c	NT	NT	1,48 b	NT
Nugget	NT	2,61 c	2,73 a	NT	1,71 a	1,77 a
Saaz	1,91 c	2,13 d	NT	1,35 c	1,42 b	NT
Smooth	NT	NT	2,32 b	NT	NT	1,48 c
Sorachi Ace	2,27 a	2,40 d	2,33 b	1,57 b	1,56 b	1,45 c
Southern Cross	NT	NT	1,88 c	NT	NT	1,27 d
Triple Pearl	1,63 d	2,80 c	2,58 a	1,30 c	1,80 a	1,40 c
Yakima Gold	2,02 b	3,08 b	NT	1,33 c	1,54 b	NT
Zeus	2,01 b	3,25 b	2,62 a	1,44 b	1,89 a	1,71 a
CV %	9,91	10,47	7,66	9,50	8,05	6,94
F	21,59	22,12**	46,77**	28,24	18,59**	35,38**

Médias seguidas pela mesma letra em cada coluna foram agrupadas pelo Scott-Knott ($p < 0,01$). NT: não testado. **: significativo ($p < 0,01$).

Além da relação entre massa fresca/tamanho do cone com o número de cones produzidos já descrita, o tamanho do cone é intrinsecamente determinado pelo genótipo de cada cultivar (Gonsaga, 2021). Independentemente da safra ou da densidade de cones por planta, foi observado que as cultivares Chinook, Comet, Hallertau Magnum, Nugget, Sorachi Ace e Yakima Gold e Zeus mantiveram valores medianos a altos para comprimento e largura do cone. Tais resultados indicam que o potencial genético dessas cultivares favorece a formação de cones naturalmente maiores.

Essa característica de tamanho pode influenciar na qualidade tecnológica dos cones. Os compostos alfa e beta-ácidos e os óleos essenciais são sintetizados nos cones de lúpulo, conseqüentemente, um melhor desenvolvimento dos cones sugere uma maior capacidade de produção e acúmulo desses compostos (Fortuna et al., 2023; Giacomini et al., 2023). Contudo, o tamanho ideal encontra um limite no processamento, um aumento excessivo no tamanho dos cones pode dificultar a

secagem pós-colheita, resultando em perda de qualidade (Raut et al., 2021).

Quanto a produção de cones frescos por planta e a produtividade estimada as cultivares de lúpulo formaram grupos distintos ao longo das safras de verão (2023-2024), inverno (2024) e outono (2024-2025) (Tabela 4.4). Na safra de verão (2023-2024), as cultivares Cascade, Hallertau Magnum e Sorachi Ace formaram o grupo de maiores médias para ambas as variáveis, enquanto Saaz, Triple Pearl e Zeus formaram o grupo de menores médias. Na safra de inverno (2024), o grupo de maiores médias foi formado pelas cultivares Chinook e Zeus nas duas variáveis, e a cultivar Alphasoma formou sozinha o grupo de menor média. Na safra de outono (2024-2025), a cultivar Zeus compôs isoladamente o grupo de maior média nas duas variáveis, enquanto as cultivares Smooth, Southern Cross e Triple Pearl formaram o grupo de menores médias.

Tabela 4.4 - Produção de cones fresco por planta e produtividade estimada de cultivares de lúpulo nas safras de verão de 2023-2024, inverno de 2024 e outono de 2024-2025.

Cultivares	Produção de cones frescos por planta (kg)			Produtividade estimada (kg ha ⁻¹)		
	Verão	Inverno	Outono	Verão	Inverno	Outono
Alphasoma	NT	0,08 h	NT	NT	271,58 h	NT
Cascade	0,88 a	NT	NT	2.950,50 a	NT	NT
Chinook	NT	1,88 a	1,00 b	NT	6.263,33 a	3.324,50 b
Comet	0,70 b	1,19 b	NT	2.521,67 b	3.956,67 b	NT
Dr Rudi	NT	0,17 g	0,45 c	NT	560,78 g	1.511,11 c
Hallertau Magnum	0,87 a	0,54 e	NT	2.906,00 a	1.786,00 e	NT
Hallertau Mittelfruher	NT	0,24 f	NT	NT	809,58 f	NT
Nugget	NT	0,75 d	0,47 c	NT	2.497,27 d	1.556,67 c
Saaz	0,15 d	0,43 e	NT	510,33 d	1.435,00 e	NT
Smooth	NT	NT	0,23 d	NT	NT	759,67 d
Sorachi Ace	0,86 a	1,32 b	1,04 b	3.043,00 a	4.407,00 b	3.476,67 b
Southern Cross	NT	NT	0,15 d	NT	NT	491,67 d
Triple Pearl	0,15 d	0,24 f	0,13 d	360,37 d	795,00 f	436,67 d
Yakima Gold	0,58 c	0,98 c	NT	1.903,33 c	3.263,33 c	NT
Zeus	0,07 d	2,07 a	1,43 a	250,67 d	6.915,17 a	4.760,18 a
CV %	18,31	4,17	26,61	17,19	4,17	26,61
F	132,56**	203,59**	88,43**	159,56**	203,59**	88,43**

Médias seguidas pela mesma letra em cada coluna foram agrupadas pelo Scott-Knott ($p < 0,01$). NT: não testado. **: significativo ($p < 0,01$).

O uso de iluminação artificial para suplementar fotoperíodo influencia diretamente na produtividade das plantas de lúpulo. Isso ocorre porque o fotoperíodo estendido prolonga a fase de crescimento dos ramos, promovendo assim uma uniformidade fenológica e a maximização do potencial produtivo (Neves et al., 2025). Com o uso de iluminação artificial, o momento da floração é atrasado, o que influencia na produtividade, visto que as plantas de lúpulo são mais produtivas quando o crescimento vegetativo adequado é alcançado antes do início da floração (Acosta-Rangel et al., 2021). No contexto deste estudo, a observação de que a floração das cultivares avaliadas em cada safra ocorreu somente após as plantas alcançarem a altura total da treliça (dados não mostrados) reforça a importância da iluminação suplementar no cultivo.

Considerando que todas as cultivares alcançaram o completo desenvolvimento vegetativo, as variações de rendimento observadas decorrem, possivelmente, do padrão de crescimento intrínseco de cada cultivar em suas respectivas safras. Estudos anteriores já estabeleceram uma correlação positiva entre a produtividade e a precocidade do crescimento vegetativo das cultivares de lúpulo (Ruggeri; Loreti; Rossini, 2018; Leles et al., 2023), processo este modulado pela variabilidade genotípica em resposta ao ambiente de cultivo (Neves et al., 2025; Rossini et al., 2016). Portanto, o desempenho produtivo observado é reflexo da interação genótipo e ambiente, evidenciando a capacidade adaptativa de cada cultivar em expressar precocidade vegetativa sob clima subtropical.

A safra de verão (2023-2024) foi a primeira safra após o plantio das mudas em 2023. As plantas de lúpulo por serem perenes requerem de três a quatro anos para atingir e maximizar seu potencial de rendimento (Acosta-Rangel; Agehara; Rechcigl, 2024). Uma estimativa desenvolvida para regiões tradicionais de cultivo indica que o rendimento é insignificante no primeiro ano, alcançando cerca de 50% do potencial máximo no segundo ano, 75% no terceiro e atingindo 100% de seu rendimento total no quarto ano (Acosta-Rangel et al., 2021; Sirrine et al., 2015). Portanto, o entendimento do potencial produtivo de cada cultivar de lúpulo é essencial para contextualizar o desempenho das safras avaliadas.

O potencial produtivo das cultivares avaliadas é o seguinte: Alpharoma (2000-3810 kg.ha⁻¹); Cascade (2017 - 2465 kg.ha⁻¹); Chinook (1700-2230 kg.ha⁻¹); Comet (1900 - 2240 kg.ha⁻¹); Dr Rudi (1940 kg.ha⁻¹); Hallertau Magnum (1340 - 1700 kg.ha⁻¹); Hallertau Mittelfruher (800-1100 kg.ha⁻¹); Nugget (1700-2200 kg.ha⁻¹); Saaz (800 -

1200 kg.ha⁻¹); Smooth (650-1520 kg.ha⁻¹); Sorachi Ace (1725 kg.ha⁻¹); Southern Cross (850 kg.ha⁻¹); Triple Pearl (1600 - 1650 kg.ha⁻¹); Yakima Gold (1800 - 2000 kg.ha⁻¹); e Zeus (2690 - 3365 kg.ha⁻¹) (Healey, 2016; Woodske, 2012). Tais potenciais foram medidos em cones secos por hectare (kg/ha), portanto, para comparação dos resultados obtidos em cones frescos, foi necessário considerar que as produtividades em cones secos equivaleriam a uma estimativa de 30% dos valores apresentados em cones frescos.

A análise dos dados revelou que, já na safra de verão (2023-2024), as cultivares Hallertau Magnum e Sorachi Ace superaram 50% de seu potencial produtivo máximo, um rendimento que, conservadoramente, seria esperado apenas a partir do segundo ano de cultivo. No mesmo período, Cascade, Comet e Yakima Gold exibiram resultados expressivos, atingindo entre 30% e 50% do teto produtivo. Na safra de inverno (2024), o desempenho produtivo foi ainda mais notável. A cultivar Chinook destacou-se ao ultrapassar 100% do limite inferior de seu potencial produtivo. Em seguida, Sorachi Ace e Zeus superaram a marca de 75%, enquanto Comet, Yakima Gold e Saaz excederam os 50%. Já as cultivares Hallertau Magnum, Hallertau Mittelfruher e Nugget mantiveram-se em um patamar intermediário, com produtividade situada entre 30% e 50% do limite inferior de seus potenciais estimados. Na safra de outono (2024-2025), contrariando a expectativa de aumento de produtividade devido à maior maturidade fisiológica da planta, apenas as cultivares Chinook, Sorachi Ace e Zeus ultrapassaram os 50% do limite inferior de seus potenciais estimados, evidenciando que outros fatores, além da idade das plantas, podem ter limitado a expressão produtiva neste período. Considerando que a estimativa padrão é idealizada para uma safra ao ano e que estas foram safras sucessivas dentro de um ano e meio de cultivo, os resultados obtidos indicam que o estabelecimento das plantas e o potencial produtivo deve ser maximizado nas safras subsequentes (Acosta-Rangel et al., 2021; Sirrine et al., 2015).

No comparativo entre as safras, é possível observar que as cultivares tiveram um incremento de produção considerável da safra de verão (2023-2024) para a safra de inverno (2024), enquanto da safra de inverno (2024) para a safra de outono (2024-2025) ocorreu um declínio produtivo. O maior desempenho produtivo na safra de inverno (2024) sugere um estágio de estabelecimento das plantas mais robusto, que passam a se beneficiar do aporte de reservas acumuladas no rizoma para sustentar seu desenvolvimento vegetativo. Consequentemente, as plantas exibem uma

capacidade aprimorada para a produção de cones, tanto em quantidade quanto em qualidade (Donner et al., 2020; Agehara; Marceddu, 2025; Teghtmeyer, 2018). Tais resultados corroboram a viabilidade do cultivo sucessivo de lúpulo em clima subtropical sob iluminação suplementar (Leles et al., 2024). Notavelmente, mesmo sob a redução gradual das temperaturas do ar no inverno, as plantas exibiram plasticidade fenológica suficiente para completar o ciclo vegetativo e superar o rendimento obtido na safra de verão anterior.

Em contrapartida, a redução observada no rendimento das plantas de lúpulo em uma terceira safra sucessiva, sugere que essa seja uma resposta direta ao esgotamento de reservas nutricionais, resultando em atraso no desenvolvimento vegetativo das plantas. Esse estresse fisiológico em culturas perenes como o lúpulo pode, por sua vez, induzir um fenômeno de alternância de produção (Spósito et al., 2019; Neves et al., 2025; Ruggeri; Loreti; Rossini, 2018).

Em regiões tradicionais de cultivo, o lúpulo tipicamente completa uma única safra entre a primavera e o verão, entrando em dormência durante os meses de inverno (Acosta-Rangel; Agehara; Rechcigl, 2024). Contudo, o avanço do cultivo para novas regiões demonstrou que essa dormência é primariamente um comportamento imposto pelas condições ambientais (invernos rigorosos e baixo fotoperíodo), e não uma exigência intrínseca da planta (Bauerle, 2019). Essa plasticidade fisiológica viabiliza a produção em safras sucessivas, especialmente sob suplementação luminosa (Leles et al., 2024). Apesar da viabilidade técnica da produção sucessiva, torna-se crucial que pesquisas futuras avaliem a introdução de um período de repouso programado entre as safras. Essa medida visa mitigar o esgotamento das reservas, otimizar a recuperação da planta e identificar o manejo mais adequado para o desenvolvimento sustentável e a produtividade estável da cultura.

4.4.2 Qualidade Tecnológica dos Cones

Para os teores de alfa e beta-ácidos as cultivares de lúpulo formaram grupos distintos ao longo das safras de verão (2023-2024), inverno (2024) e outono (2024-2025) (Tabela 4.5). Na safra de verão (2023-2024), a cultivar Hallertau Magnum compôs isoladamente o grupo de maior média para o teor de alfa-ácido, enquanto a cultivar Triple Pearl integrou o grupo de menor média. Para o teor de beta-ácido, a cultivar Cascade formou o grupo de maior média, em contrapartida o grupo de

menores médias foi composto pelas cultivares Comet, Hallertau Magnum, Triple Pearl, Yakima Gold e Zeus. Na safra de inverno (2024), as cultivares Comet e Zeus compuseram o grupo de maior teor de alfa-ácido, enquanto a cultivar Dr Rudi formou o grupo de menor média. Para o teor de beta-ácido, a cultivar Sorachi Ace formou sozinha o grupo de maior média, enquanto, o grupo de menores médias foi composto por Alpharoma e Dr Rudi. Na safra de outono (2024-2025), o grupo de maiores médias para o teor de alfa-ácido foi formado por Chinook e Smooth, enquanto a cultivar Dr Rudi formou o grupo de menor média. Para o teor de beta-ácido, o grupo de maiores médias foi composto pelas cultivares Smooth e Sorachi Ace, e a cultivar Dr Rudi novamente formou o grupo de menor média.

Tabela 4.5 - Teores de alfa- e beta-ácidos de cultivares de lúpulo nas safras de verão de 2023-2024, inverno de 2024 e outono de 2024-2025.

Cultivares	Alfa-ácido (%)			Beta-ácido (%)		
	Verão	Inverno	Outono	Verão	Inverno	Outono
Alpharoma	NT	4,34 c	NT	NT	0,63 f	NT
Cascade	10,69 e	NT	NT	4,49 a	NT	NT
Chinook	NT	10,05 b	26,23 a	NT	2,37 d	7,14 b
Comet	13,46 b	11,51 a	NT	0,05 c	3,58 c	NT
Dr Rudi	NT	1,57 d	2,22 d	NT	0,23 f	2,45 d
Hallertau Magnum	14,71 a	7,80 b	NT	0,41 c	3,02 c	NT
Hallertau Mittelfruher	NT	3,78 c	NT	NT	1,95 e	NT
Nugget	NT	8,66 b	19,52 b	NT	1,61 e	7,41 b
Saaz	8,15 f	5,27 c	NT	1,76 b	2,57 d	NT
Smooth	NT	NT	26,14 a	NT	NT	11,74 a
Sorachi Ace	8,91 f	8,59 b	21,45 b	1,99 b	5,91 a	12,07 a
Southern Cross	NT	NT	19,78 b	NT	NT	7,70 b
Triple Pearl	1,51 g	7,74 b	12,32 c	0,81 c	1,34 e	5,29 c
Yakima Gold	11,72 d	8,22 b	NT	0,99 c	4,54 b	NT
Zeus	12,58 c	13,00 a	18,41 b	0,6 c	3,15 c	7,04 b
CV %	3,50	10,56	8,10	21,42	12,33	8,84
F	404,51	51,60**	84,71**	66,86	77,62**	66,00**

Médias seguidas pela mesma letra em cada coluna foram agrupadas pelo Scott-Knott ($p < 0,01$). NT: não testado. **: significativo ($p < 0,01$).

Para concentração de óleos essenciais as cultivares de lúpulo também formaram grupos distintos ao longo das safras de verão (2023-2024), inverno (2024) e outono (2024-2025) (Tabela 4.6). Na safra de verão (2023-2024), o grupo de maiores médias foi composto pelas cultivares Comet, Hallertau Magnum e Sorachi Ace, em

contrapartida, a cultivar Triple Pearl formou sozinha o grupo de menor média. Na safra de inverno (2024), as cultivares Comet e Triple Pearl formaram o grupo de maiores médias, enquanto as cultivares Alpharoma, Dr Rudi, Hallertau Mittelfruher e Nugget integraram o grupo de menores médias. Na safra de outono (2024-2025), a cultivar Zeus compôs isoladamente o grupo de maior média, em oposição a cultivar Dr Rudi formou o grupo com a menor média.

Tabela 4.6 – Concentração de óleos essenciais em cultivares de lúpulo nas safras de verão de 2023-2024, inverno de 2024 e outono de 2024-2025.

Cultivares	Óleos essenciais (mL.100g ⁻¹)		
	Verão	Inverno	Outono
Alpharoma	NT	0,50 c	NT
Cascade	1,37 b	NT	NT
Chinook	NT	1,83 b	1,62 c
Comet	1,75 a	3,17 a	NT
Dr Rudi	NT	0,38 c	1,12 d
Hallertau Magnum	1,75 a	1,92 b	NT
Hallertau Mittelfruher	NT	0,67 c	NT
Nugget	NT	0,92 c	2,12 b
Saaz	1,25 b	2,13 b	NT
Smooth	NT	NT	2,12 b
Sorachi Ace	1,87 a	1,75 b	1,75 c
Southern Cross	NT	NT	2,25 b
Triple Pearl	0,37 c	2,75 a	1,62 c
Yakima Gold	1,12 b	1,75 b	NT
Zeus	1,25 b	1,75 b	3,00 a
CV %	14,71	12,09	9,33
F	17,74**	58,71**	28,21**

Médias seguidas pela mesma letra em cada coluna foram agrupadas pelo Scott-Knott ($p < 0,01$). NT: não testado. **: significativo ($p < 0,01$).

A capacidade de síntese de metabólitos secundários no lúpulo, como os alfa-ácidos, beta-ácidos e óleos essenciais, é uma resposta diretamente ligada ao potencial genético de cada cultivar e à sua interação com o ambiente (Bonfim et al., 2025). Essa distinção genética é o fator primordial para explicar a significativa variação observada na composição química e, consequentemente, nos perfis de amargor e aroma entre as diferentes cultivares. Isso se manifesta mesmo quando as plantas são cultivadas no mesmo ambiente e sob condições idênticas de manejo (Arruda et al.,

2021; McAdam et al., 2014). Sob essa perspectiva, a genética da planta estabelece o limite máximo para a produção desses compostos, sendo o ambiente um modulador desse potencial.

O potencial de acúmulo de metabólitos secundários também é atingido quando as plantas de lúpulo atingem sua maturidade fisiológica (McAdam et al., 2014). À medida que a planta amadurece e se torna mais estabelecida no campo, tende a haver um maior investimento energético na formação dos cones e, conseqüentemente, na biossíntese dos compostos de interesse para a indústria cervejeira. Com base neste princípio, as plantas de lúpulo usualmente atingem sua capacidade máxima de sintetizar esses compostos por volta do terceiro ano de cultivo (Bonfim et al., 2025).

O potencial de acúmulo de alfa-ácido, beta-ácido e óleos essenciais para as cultivares avaliadas é o seguinte: Alpharoma (alfa-ácido 5,8%-10,9%; beta-ácido 2,6%-4,8%; óleos essenciais 0,9-1,2 mL.100 g⁻¹); Cascade (alfa-ácido 5,0-7,0%; beta-ácido 5,0-7,0%; óleos essenciais 0,8-2,5 mL.100 g⁻¹); Chinook (alfa-ácido 12,0%-14,0%; beta-ácido 3,0%-4,0%; óleos essenciais 1,5-2,7 mL.100 g⁻¹); Comet (alfa-ácido 9,4-12,4%; beta-ácido 3,0-6,1%; óleos essenciais 1,2-2,0 mL.100 g⁻¹); Dr Rudi (alfa-ácido 10,0%-12,0%; beta-ácido 7,0%-8,5%; óleos essenciais 1,3-1,6 mL.100 g⁻¹); Hallertau Magnum (alfa-ácido 12,0-14,0%; beta-ácido 4,5-5,5%; óleos essenciais 1,9-2,3 mL.100 g⁻¹); Hallertau Mittelfruher (alfa-ácido 3,5%-3,5%; beta-ácido 3,5%-4,5%; óleos essenciais 0,6-1,2 mL.100 g⁻¹); Nugget (alfa-ácido 9,5%-14,0%; beta-ácido 4,2%-5,8%; óleos essenciais 1,5-3,0 mL.100 g⁻¹); Saaz (alfa-ácido 2,5-4,5%; beta-ácido 4,0-6,0%; óleos essenciais 0,4-0,8 mL.100 g⁻¹); Smooth (alfa-ácido 7,0%-9,5%; beta-ácido 3,4%-5,2%; óleos essenciais 0,38-1,14 mL.100 g⁻¹); Sorachi Ace (alfa-ácido 11,0-16,0%; beta-ácido 6,0-7,5%; óleos essenciais de 2,0-3,0 mL.100 g⁻¹); Southern Cross (alfa-ácido 13,0%-14,0%; beta-ácido 6,0%-7,0%; óleos essenciais 1,59 mL.100 g⁻¹); Triple Pearl (alfa-ácido 10,0-11,2%; beta-ácido 3,0-4,5%; óleos essenciais 1,1-1,8 mL.100 g⁻¹); Yakima Gold (alfa-ácidos 8,8 a 10,5%; beta-ácidos 4,3 a 5,0%; óleos essenciais 1,9-2,3 mL.100 g⁻¹); Zeus (alfa-ácido 16,0%-18,0%; beta-ácido 3,3%-4,3%; óleos essenciais 1,5-3,0 mL.100 g⁻¹) (Healey, 2016; Van de Bergen, 2025).

Apesar de se tratar das primeiras safras dessas plantas de lúpulo, diversas cultivares apresentaram concentrações de metabólitos secundários equivalentes ou superiores ao limiar esperado para plantas adultas. Na safra de verão (2023-2024), o desempenho igual ou superior ao potencial de acúmulo genético foi observado nas

cultivares Cascade, Comet, Hallertau Magnum, Saaz e Yakima Gold quanto ao teor de alfa-ácido, na Cascade quanto ao teor de beta-ácido, e na Cascade, Comet, Saaz e Yakima Gold quanto à concentração de óleos essenciais. Na safra de inverno (2024) as cultivares que obtiveram valores maiores que o potencial de acúmulo foram Comet e Saaz para o teor de alfa-ácido, Comet e Yakima Gold para o teor de beta-ácido e Chinook, Comet, Hallertau Magnum, Hallertau Mittelfruher, Saaz, Triple Pearl e Zeus para a concentração de óleos essenciais (Healey, 2016; Van de Bergen, 2025). Na safra de outono (2024-2025), com exceção da cultivar Dr Rudi, todas as cultivares avaliadas apresentaram teores consistentemente superiores ao potencial de acúmulo para cada genótipo, especialmente nos teores de alfa e beta-ácidos. Os comportamentos descritos indicam uma precoce e intensa expressão da síntese de metabólitos dessas cultivares em plantas ainda jovens, sugerindo o potencial para o desenvolvimento de lúpulo de qualidade em clima subtropical (Leles et al., 2023).

O aumento significativo nos teores de metabólitos secundários (principalmente resinas) na safra de outono (2024-2025), pode ser interpretado como uma resposta ao estresse das plantas, que pode ter sido maximizada por diversos fatores na terceira safra sucessiva (Fortuna, 2021).

Assim como a produtividade, o acúmulo de compostos de qualidade nos cones de lúpulo exibiu uma considerável variabilidade ao longo das safras de cultivo. Essa variação é geralmente associada à influência de fatores abióticos, como a temperatura do ar, e de fatores bióticos, como o vigor e o crescimento das plantas entre cada safra (Acosta-Rangel; Agehara; Rechcigl, 2024). Do ponto de vista da aplicação industrial, essas variações entre as safras podem ser contornadas por meio de ajustes na formulação. Tais ajustes incluem o aumento da dosagem do lúpulo ou a mistura com outras cultivares que apresentem maior potencial das características de interesse. Com ajustes tecnológicos adequados e um conhecimento profundo das características específicas do lúpulo subtropical, sua aplicação industrial pode ser alcançada de forma eficaz, mantendo a qualidade sensorial e o desempenho geral do produto final (Bonfim et al., 2025).

4.4.3 Análises Multivariadas

A análise dos componentes principais (PCA) indica que as cultivares responderam de forma heterogênea às variáveis de rendimento e qualidade

tecnológica ao longo das safras de verão (2023-2024), inverno (2024) e outono (2024-2025) (Figura 4.2). Na safra de verão (2023-2024), a PCA explicou 86,9% da variação total nos dois primeiros componentes (PC1 = 53,3%; PC2 = 33,6%). O PC1 indicou que as cultivares Comet, Hallertau Magnum e Sorachi Ace apresentaram uma correlação positiva com a maioria das variáveis de rendimento e qualidade tecnológica de cones. Em contraste, as cultivares Saaz, Triple Pearl e Zeus manifestaram correlação negativa com este mesmo componente. O PC2 mostrou que as cultivares Cascade e Yakima Gold apresentaram uma correlação positiva com NCR, NCP, ProdP, Prod e BA, e negativa com as demais variáveis. Na safra de inverno (2024), os dois primeiros componentes explicaram 82,5% da variação total (PC1 = 59,0%; PC2 = 23,5%). O PC1 indicou que as cultivares Alpharoma, Dr Rudi, Hallertau Mittelfruher e Saaz apresentaram correlação negativa com a maioria das variáveis de rendimento e qualidade tecnológica de cones. No quadrante direito as cultivares Chinook e Sorachi Ace apresentaram correlação positiva com NCR, NCP, ProdP e Prod, enquanto as cultivares Chinook, Comet e Zeus com MC, LC e AA. O PC2 mostrou que Hallertau Magnum, Triple Pearl e Nugget apresentaram correlações negativas com NCR, NCP, ProdP, Prod e BA, enquanto Hallertau Magnum apresentou correlação positiva as características físicas do cone (MC, CC e LC). Na safra de outono (2024-2025) os dois primeiros componentes representaram 73,9% da variação total (PC1 = 45,9%; PC2 = 28,0%). O PC1 indicou que as cultivares Dr Rudi, Smooth, Southern Cross e Triple Pearl apresentaram uma correlação negativa com a maioria das variáveis de rendimento e qualidade tecnológica de cones. No quadrante direito, as cultivares Chinook, Sorachi Ace e Zeus apresentaram correlação positiva com NCR, NCP, Prod, ProdP, e Chinook, Nugget e Zeus com MC, CC e LC. O PC2 indicou que a cultivar Dr Rudi, por estar localizada no quadrante superior, possui correlação positiva com NCR e NCP.

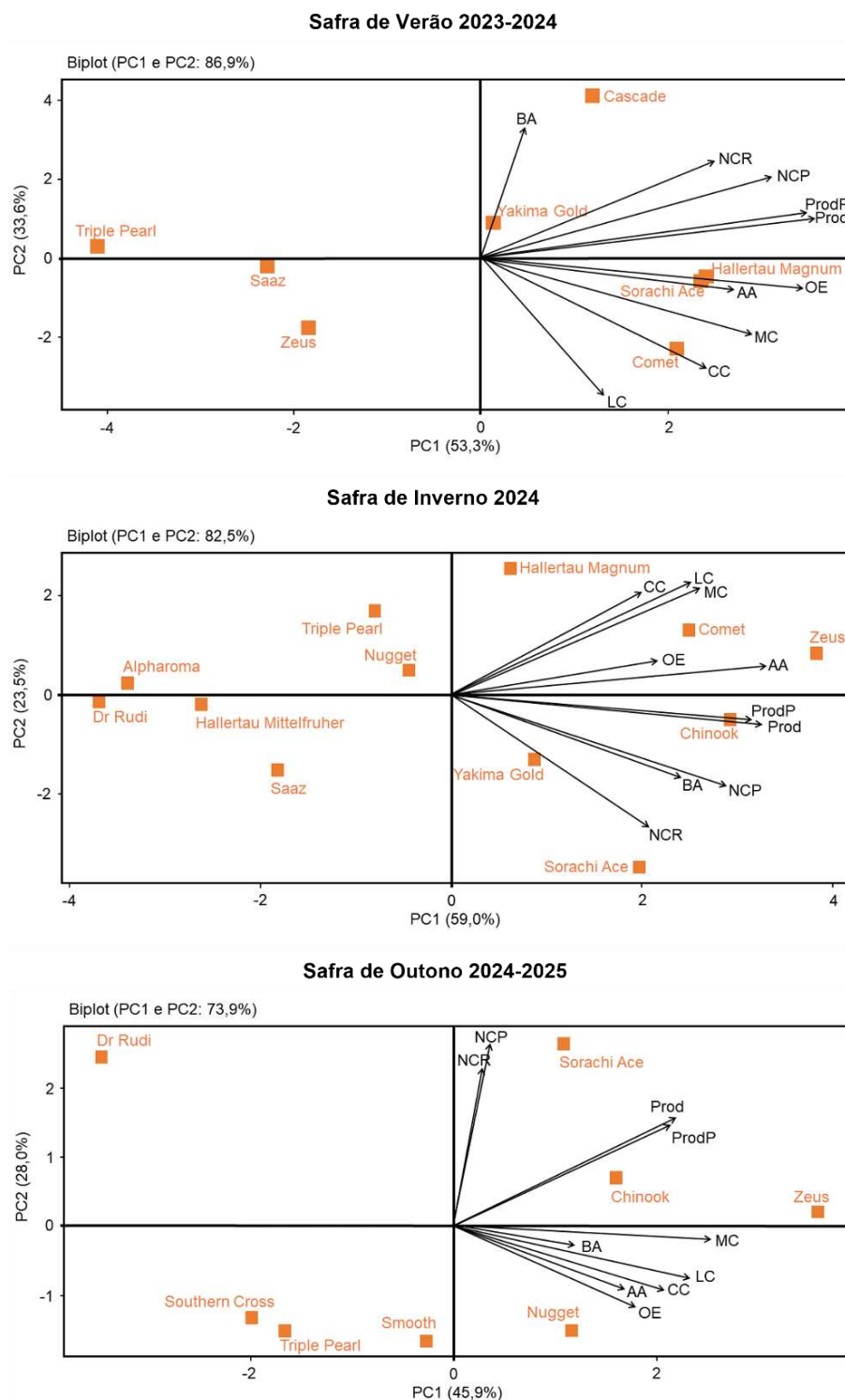


Figura 4.2 - Análise de componentes principais (PCA) para número de cones por ramo lateral (NCR), número de cones por planta (NCP), massa fresca do cone (MC), comprimento do cone (CC), largura do cone (LC), produção de cones fresco por planta (ProdP), produtividade estimada (Prod), teor de alfa-ácido (AA), teor de beta-ácido (BA) e concentração de óleos essenciais (OE) para as cultivares de lúpulo nas safras de verão de 2023-2024, inverno de 2024 e outono de 2024-2025.

Além disso, a PCA demonstra que as variáveis se relacionaram formando agrupamentos distintos nas safras avaliadas. Na safra de verão (2023-2024), o PC1 evidenciou uma correlação positiva forte entre as variáveis NCR, NCP, ProdP e Prod, constatada pela proximidade dos vetores e orientação similar em direção ao quadrante superior direito. Adicionalmente, foram observadas correlações positivas moderadas entre as variáveis AA, OE e MC, bem como entre LC e MC. Estes agrupamentos, evidenciados pela proximidade dos vetores apontando em direção ao quadrante inferior direito, indicam uma correlação positiva entre as variáveis de qualidade e rendimento. Isso sugere que tais características variam de forma diretamente proporcional nas cultivares posicionadas nos quadrantes à direita do biplot. No PC2, a posição do vetor BA, que é quase perpendicular aos vetores NCR, NCP, ProdP, Prod que definem o PC1, sugere que esta variável é relativamente independente as características de rendimento produtivo.

Na safra de inverno (2024), o PC1 apontou que uma correlação positiva forte foi observada entre ProdP e Prod, com ambas também demonstrando alta correlação positiva com NCP. Isso é evidenciado pela proximidade e pela orientação similar desses vetores no quadrante inferior direito. Além disso, uma correlação positiva forte foi observada entre CC e LC com MC evidenciada pela sua proximidade e orientação similar para o quadrante superior direito. Em contraste, a análise da PC2 evidenciou uma correlação negativa entre as variáveis de rendimento (Prod, ProdP, NCP) e as características de tamanho do cone (CC, LC, MC). Tal antagonismo é demonstrado pela oposição vetorial entre esses grupos de variáveis nos quadrantes laterais.

Na safra de outono (2024-2025), o PC1 apontou uma correlação positiva forte entre ProdP e Prod, evidenciada pela proximidade e orientação similar desses vetores no quadrante superior direito. Além disso, as variáveis CC, LC, MC, AA, BA, OE formaram um grupo coeso, apontando principalmente para o quadrante inferior direito, indicando que essas características tendem a ter correlações positivas nas mesmas cultivares. O PC2 evidenciou uma correlação negativa entre as variáveis NCP, NCR (quadrante superior direito), com CC, LC, MC, AA, BA, OE (quadrante inferior direito).

O Heatmap (Figura 4.3) forneceu uma visualização quantitativa complementar à PCA, integrando a expressão das variáveis ao perfil individual das cultivares de lúpulo. A análise de agrupamento hierárquico discriminou consistentemente três clusters de cultivares e quatro de variáveis nas safras de verão (2023-2024), inverno (2024) e outono (2024-2025). Na safra de verão (2023-2024), o dendrograma vertical

segregou as cultivares em: grupo 1 (Triple Pearl, Saaz e Zeus) com correlação baixa para a maioria das variáveis; o grupo 2 (Sorachi Ace, Comet e Hallertau Magnum) com correlação alta para a maioria das variáveis; e o grupo 3 (Cascade e Yakima Gold) com correlação alta para as variáveis NCR, NCP, ProdP, Prod. No eixo das variáveis, o agrupamento confirmou a interdependência entre os caracteres produtivos (grupo 1 – NCR, NCP, ProdP, Prod), enquanto a variável BA demonstrou independência relativa (grupo 2 – BA). Atributos físicos e de qualidade dos cones (Grupo 3 – MC, AA, OE; Grupo 4 - CC e LC) formaram clusters associados predominantemente às cultivares do segundo grupo. Na safra de inverno (2024), os grupos de cultivares foram: Grupo 1 (Chinook, Comet, Sorachi Ace, Yakima Gold e Zeus) com correlação alta para Prod, ProdP, NCP e NCR; Grupo 2 (Alpharoma, Dr Rudi, Hallertau Mittelfrüher e Saaz) com correlação baixa em quase todas as variáveis; e Grupo 3 que apresentou heterogeneidade, com a Hallertau Magnum apresentando correlação alta aos atributos físicos dos cones (CC, LC e MC), enquanto Nugget e Triple Pearl mantiveram correlações medianas. O eixo das variáveis manteve a correlação entre caracteres produtivos (grupo 1 - NCR; NCP; ProdP; Prod), isolou OE (grupo 2) e CC (grupo 3), enquanto as variáveis AA, MC e LC foram agrupadas (grupo 4). Na safra de outono (2024-2025), os grupos de cultivares foram: Grupo 1 (Chinook, Nugget, Sorachi Ace e Zeus) com correlação alta para a maioria das variáveis; Grupo 2 (Dr Rudi) exibiu correlação baixa para maioria das variáveis, exceto para NCR e NCP; Grupo 3 (Smooth, Southern Cross e Triple Pearl) com correlação baixa para quase todas as variáveis. No eixo horizontal, manteve a correlação entre caracteres produtivos (grupo 1 - NCR; NCP; ProdP; Prod), os teores de alfa e beta-ácidos foram agrupados (grupo 2 - AA e BA); óleo essencial manteve-se isolado (grupo 3 - OE); e os caracteres físicos dos cones foram agrupados (grupo 4- MC, CC e LC).

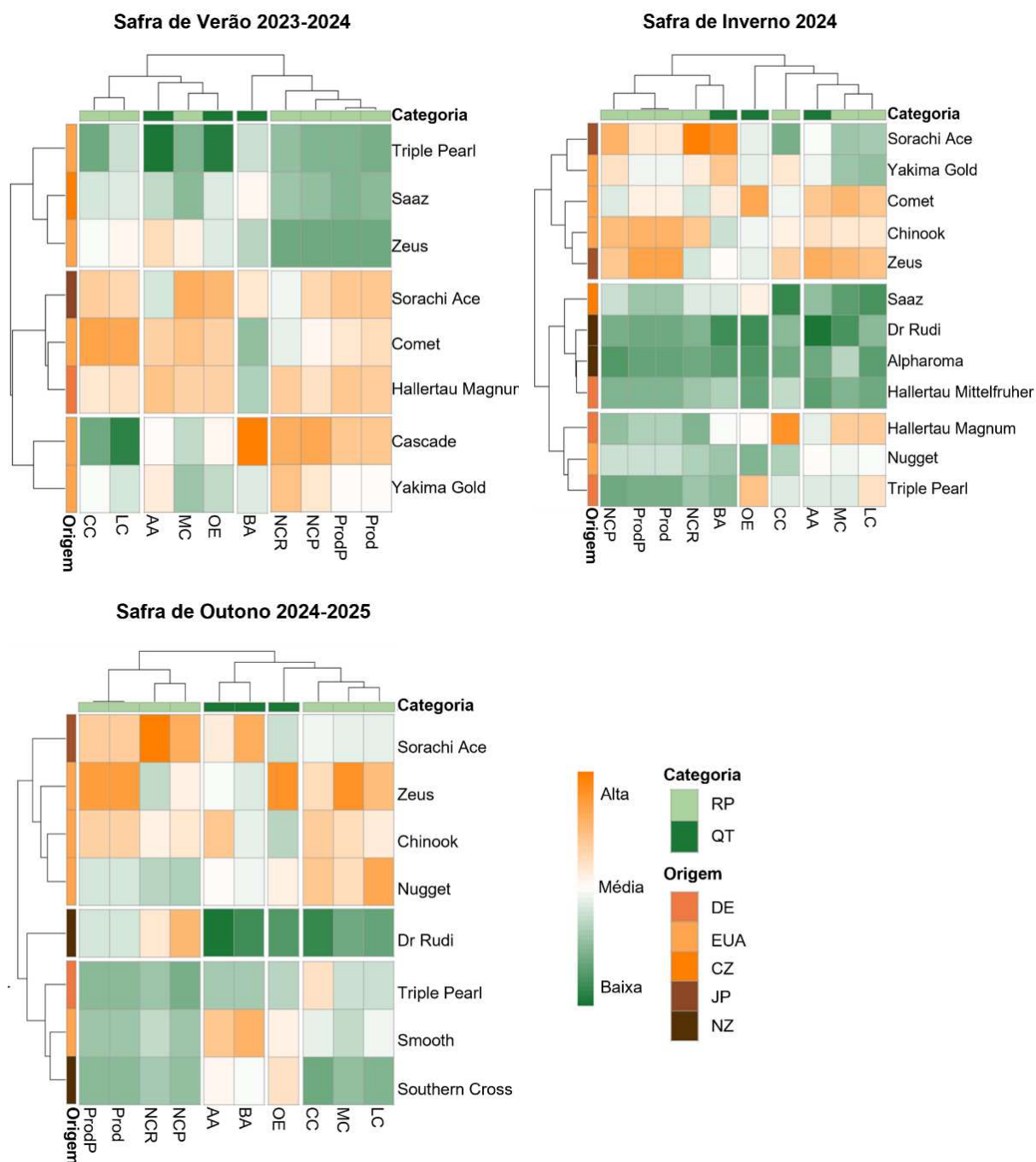


Figura 4.3 - Heatmap elaborado a partir da análise de correlação e agrupamento hierárquico para número de cones por ramo lateral (NCR), número de cones por planta (NCP), massa fresca do cone (MC), comprimento do cone (CC), largura do cone (LC), produção de cones fresco por planta (ProdP), produtividade estimada (Prod), teor de alfa-ácido (AA), teor de beta-ácido (BA) e concentração de óleos essenciais (OE) para as cultivares de lúpulo nas safras de verão de 2023-2024, inverno de 2024 e outono de 2024-2025. RP= Componentes de rendimento produtivo; QT= Qualidade tecnológica.

4.5 CONCLUSÃO

A produção de lúpulo em sistema de safras sucessivas em condições subtropicais demonstrou ser tecnicamente viável mediante o emprego de iluminação suplementar. Embora os itens de rendimento produtivo e a qualidade tecnológica dos cones das cultivares tenham exibido considerável variabilidade ao longo das safras, influenciados principalmente pelas condições climáticas, pelo crescimento vegetativo de cada cultivar e pela maturidade fisiológica das plantas, uma avaliação geral dos resultados das três safras sucessivas permite concluir que as cultivares Chinook, Sorachi Ace e Zeus se destacaram de forma promissora. Tais cultivares evidenciaram um potencial produtivo crescente e a manutenção de teores relativamente estáveis de alfa-ácido, beta-ácido e concentração de óleos essenciais. Este perfil sugere uma adaptação superior dessas cultivares, minimizando a dependência das flutuações de sazonalidade e temperatura do ar observadas nas diferentes safras. Por fim, considerando que os resultados englobam apenas os primeiros anos de estabelecimento das plantas, estudos adicionais são necessários para verificar a resposta produtiva e qualitativa dessas cultivares ao sistema de múltiplas safras após atingirem a plena maturidade fisiológica.

4.6 REFERÊNCIAS

- ACOSTA-RANGEL, A.; AGEHARA, S.; RECHCIGL, J. Double-season production of hops (*Humulus lupulus* L.) with photoperiod manipulation in a subtropical climate. **Scientia Horticulturae**, v. 332, n. 113177, 2024. DOI: 10.1016/j.scienta.2024.113177
- 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. DOI: 10.21475/ajcs.21.15.05.p3192.
- AGEHARA, S. Using Supplemental Lighting to Control Flowering of Hops in Florida. **UF/IFAS Extension**, 2020. Disponível em: <<https://edis.ifas.ufl.edu/publication/HS1365>>. Acesso em: 26 fev. 2025.
- AGEHARA, S.; MARCEDDU, R. Growing hops (*Humulus lupulus* L.) in subtropical climates: Effects of climatic patterns on phenology and seasonal crop performance. **Agronomy Journal**, v. 117, n. 5, 2025. DOI: 10.1002/agj2.70143
- ARRUDA, T. R.; PINHEIRO, P. F.; SILVA, P. I.; BERNARDES, P. C. A new perspective of a well-recognized raw material: Phenolic content, antioxidant and antimicrobial activities and α - and β -acids profile of Brazilian hop (*Humulus lupulus* L.) extracts. **LWT**

- **Food Sci. Technol.** v. 141, 2021. DOI: 10.1016/j.lwt.2021.110905.

ASBC - American Society of Brewing Chemists. Total Essential Oils in Hops and Hop Pellets by Steam Distillation. **Hops Methods**, n. 13, 2010. DOI: 10.1094/ASBCMOA-Hops-2.

BAUERLE, W. L. Disentangling photoperiod from hop vernalization and dormancy for global production and speed breeding. **Scientific Reports**, v. 9, 2019. DOI:10.1038/s41598-019-52548-0.

BONFIM, F. P. G.; VIRIATO, V.; FERNANDES, G. C.; CABRAL, M. N. F.; NEVES, C. S.; CAMPOS, O. P.; ARAÚJO, F. M. S.; RAMOS, A. B. L.; GOMES, J. A. O.; VEIGA-SANTOS, P.; TECCHIO, M. A.; MARQUES, M. O. M. Estabilidade dos compostos aromáticos e amargos do lúpulo Fuggle cultivado em condições subtropicais ao longo de colheitas sucessivas. **Journal of Essential Oil Bearing Plants**, v. 28, n. 4, p. 796–805, 2025. DOI: 10.1080/0972060X.2025.2537840

CAMPOS, O. P.; FORTUNA, G. C.; GOMES, J. A. O.; NEVES, C. S.; BONFIM, F. P. G. Morphological characteristics, trichomes, and phytochemistry of inflorescences of '*Humulus lupulus*' L: Comparison of cropping systems and varieties. **Australian Journal of Crop Science**, v. 17, n. 3, p. 263-274, 2023. DOI: 10.3316/informit.197703104266944.

DONNER, P.; POKORNÝ, J.; JEŽEK, J.; KROFTA, K.; PATZAK, J.; PULKRÁBEK, J. Influence of weather conditions, irrigation and plant age on yield and alpha-acids content of Czech hop (*Humulus lupulus* L.) cultivars. **Plant Soil Environ.** v. 66, p. 41–46, 2020. DOI: 10.17221/627/2019-PSE.

EGTS, H.; DURBEN, D. J.; DIXSON, J. A.; ZEHFUS, M. H. A Multicomponent UV Analysis of α - and β -Acids in Hops. **J. Chem. Educ.**, v. 89, p. 117–120, 2012. DOI: 10.1021/ed1010536.

FAGHERAZZI, M. M. Adaptabilidade de cultivares de lúpulo na região do Planalto Sul Catarinense. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual de Santa Catarina, Lages, 2020.

FORTUNA, G. C. Desempenho agrônômico e fitoquímico de variedades de lúpulo produzidas em condições tropicais sob manejo orgânico e convencional. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2021. Disponível em: <<https://repositorio.unesp.br/entities/publication/eb2eba1c-2003-406a-bbe0-9ea63e0592db>>. Acesso em: 7 nov. 2025.

FORTUNA, G. C.; GOMES, J. A. O.; CAMPOS, O. P.; NEVES, C. S.; BONFIM, F. P. G. Agronomic performance of *Humulus lupulus* L. varieties cultivated in organic and conventional systems in São Paulo center-west, Brazil. **Ciência Rural**, v. 53, n. 8, p. 1-6, 2023. DOI: 10.1590/0103- 8478cr20210704

GALLARDO, M.; AGEHARA, S.; RECHCIGL, J. Optimization of trellis design and height for double-season hop (*Humulus lupulus* L.) production in a subtropical climate: Growth, morphology, yield, and cone quality during establishment years. **European Journal of Agronomy**, v. 162, 2025. DOI: 10.1016/j.eja.2024.127415.

GIACOMINI, S.; OLIVEIRA, J. F.; CARLOT, E. F.; CARLOT, G. F.; PERUZZO, S. T.; MACHADO, P. R.; HENNERICH, J. E.; MEIRA, D. Agronomic performance of hops cultivars in the northern region of Rio Grande do Sul, Brazil. **Communications in Plant Sciences**, v. 13, n.1, p. 26-32, 2023. DOI: 10.26814/cps2023004

GONSAGA, R. F. Desenvolvimento de híbridos de lúpulo adaptados às condições tropicais. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2021. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/213747/gonsaga_rf_dr_jabo_sub.pdf?sequence=11&isAllowed=y>. Acesso em: 7 nov. 2025.

GUTIÉRREZ, R. M.; OLIVEIRA, R. R.; RIBEIRO, T. H. C.; OLIVEIRA, K. K. P.; SILVA, J. V. N.; ALVES, T. C.; AMARAL, L. R.; GOMES, M. S.; GOMES, M. S.; CHALFUN-JÚNIOR, A. Unveiling the phenology and associated floral regulatory pathways of *Humulus lupulus* L. in subtropical conditions. **Planta**, v. 259, n. 150, 2024. DOI 10.1101/2023.09.15.557988.

HEALEY, J. **The Hop List**. Australia: Publicação própria, 2016. Disponível em: <<https://pdfcoffee.com/the-hop-listpdf-pdf-free.html>>. Acesso em: 19 out. 2025.

IHGC - International Hop Growers' Convention. **Economic Commission - Summary Reports**. IHGC: Nuremberg – Germany, 2023.

JASTROMBEK, J. M.; FAGUERAZZI, M. M.; DE CÁSSIO PIEREZAN, H.; RUFATO, L.; SATO, A. J.; DA SILVA RICCE, W.; MARQUES, V. V.; LELES, N. R.; ROBERTO, S. R. Hop: An Emerging Crop in Subtropical Areas in Brazil. **Horticulturae**, v. 8, n. 393, 2022. DOI: 10.3390/horticulturae805039.

LELES, N. R. Desempenho de variedades de lúpulo conduzidas com suplementação artificial de luz sob condição subtropical. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2023.

LELES, N. R.; SATO, A. J.; MORENO, G.; ARALDI, L. B.; ALMEIDA, A. L. D.; CARLI, V. W.; ROBERTO, S. R. Performance of hop cultivars (*Humulus lupulus* L.) under the annual double harvest system under artificial light supplementation in a subtropical climate. **Semina Ciências Agrárias**, v. 45, n. 6, p. 1833-1850, 2024. DOI: 10.5433/1679-0359.2024v45n6p1833.

LELES, N. R.; SATO, A. J.; RUFATO, L.; JASTROMBEK, J. M.; MARQUES, V. V.; MISSIO, R. F.; FERNANDES, N. L. M.; ROBERTO, S. R. Performance of Hop Cultivars Grown with Artificial Lighting under Subtropical Conditions. **Plants**, v. 12, n. 10, 2023. DOI: 10.3390/plants12101971.

MCADAM, E. L.; VAILLANCOURT, R. E.; KOUTOULIS, A.; WHITTOCK, S. P. Quantitative genetic parameters for yield, plant growth and cone chemical traits in hop (*Humulus lupulus* L.). **BMC Genetics**, v. 15, n. 22, 2014. DOI: 10.1186/1471-2156-15-22

NEVES, C. S.; BONFIM, F. P. G.; CAMPOS, O. P.; VIRIATO, V.; FERNANDES, G. C.; CABRAL, M. N. F.; FORTUNA, G. C.; GONÇALVES DE OLIVEIRA, S.; RABINOWITZ, A. N.; SARNIGHAUSEN, V. C. R.; ONO, E. O.; SILVA, J. C. R. L.; MARQUES, M. O. M. Desempenho de rendimento e estabilidade fitoquímica do lúpulo 'Comet' sob

regimes contrastantes de suplementação de luz em condições subtropicais. **Plants**, v. 14, n. 3516, 2025. DOI: 10.3390/plants14223516

RAUT, S.; GERSDORFF, G. J. V.; MÜNSTERER, J.; KAMMHUBER, K.; HENSEL, O.; STURM, B. Influence of pre-drying storage time on essential oil components in dried hops (*Humulus lupulus* L.). **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 101, n. 6, p. 2247-2255, 2021. DOI: 10.1002/jsfa.10844

ROBBAUER, V. G.; BUHR, L. HACK, H.; HAUPTMANN, S.; KLOSE, R.; MEIER, U.; STAUB, R.; WEBER, E. Phanologische Entwicklungsstadien von Kultur-Hopfen (*Humulus lupulus* L.). **Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd.**, v. 47, n. 10, p. 249-253, 1995, ISSN 0027-7479.

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. 3, 2016. DOI: 10.4081/ija.2016.746.

ROSSINI, F.; VIRGA, G.; LORETI, P.; IACUZZI, N.; RUGGERI, R.; PROVENZANO, M. E. Hops (*Humulus lupulus* L.) as a Novel Multipurpose Crop for the Mediterranean Region of Europe: Challenges and Opportunities of Their Cultivation. **Agriculture**, v. 11, n. 6, 2021. DOI: 10.3390/agriculture11060484.

RUGGERI, R.; LORETI, P.; ROSSINI, F. Exploring the potential of hop as a dual purpose crop in the Mediterranean environment: shoot and cone yield from nine commercial cultivars. **European Journal of Agronomy**, v. 93, p. 11-17, 2018. DOI: 10.1016/j.eja.2017.10.011.

RUGGERI, R.; ROSSINI, F.; ROBERTO, S. R.; SATO, A. J.; LOUSSERT, P.; RUTTO, L. K.; AGEHARA, S. Development of hop cultivation in new growing areas: The state of the art and the way forward. **European Journal of Agronomy**, v. 161, 2024. DOI: 10.1016/j.eja.2024.127335.

SIRRINE, R.; LIZOTTE, E.; BROWN, D.; O'BRIEN, T.; LEAC, A. Estimated costs of producing hops in Michigan. **Michigan State University Extension**, E3236, 2015.

SKOMRA, U.; BOCIANOWSKI, J.; AGACKA, M. Agro-morphological differentiation between European hop (*Humulus lupulus* L.) cultivars in relation to their origin. **Journal of Food, Agriculture & Environment**, v. 11, p. 1123 – 1128, 2013.

SPÓSITO, M. B.; ISMAEL, R. V.; BARBOSA, C. M. A.; TAGLIAFERRO, A. L. **A cultura do lúpulo**. Piracicaba: ESALQ, 2019. n. 68. ISSN 1414-4530.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. Tradução de: MASTROBERTI, A. A. et al. 6a ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888 p.

TEGHTMEYER, S. Hops. **Journal of Agricultural & Food Information**, v. 19, n. 1, p. 9-20, 2018. DOI: 10.1080/10496505.2018.1403248.

VAN DE BERGEN. **Lúpulos**, 2025. Disponível em: <https://vandebergen.com/mudas_de_lupulos/>. Acesso em: 4 dez. 2025.

VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e climatologia**, versão digital 2; INMET: Recife, Brasil, 2006.

WOODSKE, D. **Hop Variety Handbook**: Learn more about hops...craft better beer. London: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2012. ISBN 13: 9781475265057.