



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIENCIAS AGRARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS GENETICOS VEGETAIS

Amanda Venturi Corrêa De Almeida

**Caracterização da biologia floral de cultivares de alho roxo cultivadas no Planalto
Catarinense.**

Florianópolis

2025

Amanda Venturi Corrêa De Almeida

**Caracterização da biologia floral de cultivares de alho roxo cultivadas no Planalto
Catarinense.**

Defesa da dissertação de mestrado ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Genéticos Vegetais da Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências Agrárias como requisito parcial para a obtenção do título de mestra em Recursos Genéticos Vegetais.

Orientador: Prof. Dr. Leocir José Welter.

Florianópolis

2025

Almeida, Amanda Venturi Corrêa de
Caracterização da biologia floral de cultivares de alho
roxo cultivadas no Planalto Catarinense / Amanda Venturi
Corrêa de Almeida ; orientador, Leocir José Welter, 2025.
77 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-
Graduação em Recursos Genéticos Vegetais, Florianópolis,
2025.

Inclui referências.

1. Recursos Genéticos Vegetais. 2. Allium sativum. 3.
Melhoramento Genético . 4. Fertilidade. I. Welter, Leocir
José. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa
de Pós-Graduação em Recursos Genéticos Vegetais. III.
Título.

Amanda Venturi Corrêa de Almeida

Título: Caracterização da biologia floral de cultivares de alho roxo cultivadas no Planalto Catarinense.

O presente trabalho em nível de Mestrado foi avaliado e aprovado, em 08 de Agosto de 2025, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof., Dr. Paulo
Cesar Poeta Fermino Junior
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof., Dr. Miguel Pedro Guerra
Universidade Federal de Santa Catarina

Dr. Renato Luís Vieira
Epagri/Caçador

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestra em Recursos Genéticos Vegetais.

 Documento assinado digitalmente
Valdir Marcos Stefenon
Data: 08/11/2025 15:00:17-0300
CPF: ***.138.149-**-
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Coordenação do Programa de Pós-Graduação

 Documento assinado digitalmente
LEOCIR JOSE WELTER
Data: 08/11/2025 07:03:56-0300
CPF: ***.206.779-**-
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof., Dr.(a) Leocir José Welter
Orientador

Florianópolis, 2025.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, que me concedeu força, energia e coragem para alcançar meus objetivos durante o mestrado.

Aos meus pais, Tatiana e Roberto, por todo o suporte, incentivo e ensinamentos, fundamentais em cada etapa da minha trajetória.

Ao meu tio, Valmir, pelo apoio constante e pelo estímulo para que eu continuasse minha jornada acadêmica.

Ao meu namorado, Felipe, agradeço pelo carinho, paciência, incentivo e ajuda incondicional ao longo deste processo.

Aos meus colegas de mestrado, em especial Diogo, Andriele e Camila, pelo companheirismo, pelos ensinamentos compartilhados e pela valiosa amizade.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Leocir José Welter, pela confiança, orientação e pela oportunidade de integrar seu grupo de pesquisa, contribuindo de forma significativa para minha formação.

Ao grupo GEABA e a todos os seus integrantes, pela colaboração e apoio técnico durante a pesquisa.

Aos professores e funcionários da Universidade Federal de Santa Catarina – Campus Curitibanos, pelo ensino de excelência, dedicação e suporte estrutural durante minha formação.

Aos docentes do Centro de Ciências Agrárias (CCA) – Campus Florianópolis, pelo comprometimento com a qualidade do ensino e pela contribuição essencial ao meu aprendizado.

À Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC), pelo apoio financeiro, por meio da concessão de bolsa de estudos, fundamental para a realização deste trabalho.

À ANAPA (Associação Nacional dos Produtores de Alho), pelo apoio financeiro ao projeto e pela concessão de bolsa de estudos por seis meses, os quais foram essenciais para o desenvolvimento desta pesquisa.

À EPAGRI, pela valiosa parceria estabelecida ao longo da realização desta dissertação. O acesso às amostras de alho fornecido foi fundamental para o desenvolvimento da pesquisa.

E por fim, a todas as pessoas que cruzaram meu caminho ao longo desta caminhada acadêmica e que, de alguma forma, contribuíram para a minha formação pessoal e profissional.

Muito obrigada a todos!

RESUMO

O alho é uma hortaliça de relevância econômica e cultural, expressando variações morfológicas conforme o ambiente. As cultivares comerciais apresentam alta similaridade genética, resultando em vulnerabilidade e restrição da variabilidade adaptativa, o que compromete o melhoramento genético e a adaptação da cultura a diferentes condições ambientais. O restabelecimento da fertilidade em acessos próximos ao centro de origem representa uma nova perspectiva para o desenvolvimento de cultivares via reprodução sexuada. Cultivares do Planalto Catarinense, classificadas como *hardneck*, já demonstram capacidade de florescimento e formação de inflorescências completas. Dessa maneira, o presente trabalho objetivou avaliar o potencial de florescimento de cultivares de alho roxo cultivadas na região do Planalto Catarinense. Foram avaliadas três cultivares comerciais de alho roxo (Caçador, Ito e Chonan) e um acesso do Banco de Germoplasma quanto ao florescimento, fenologia e morfologia floral, no município de Curitiba, SC. As coletas foram realizadas em diferentes fases do ciclo reprodutivo, com base nos dias após o plantio (DAP) e dias após a diferenciação floral (DAD), abrangendo desde o início da diferenciação até a abertura da espata. As análises incluíram observações fenológicas a campo, medições de características morfofisiológicas, coleta, contagem de bulbilhos aéreos e flores. Também foram realizadas análises em microscopia de luz e eletrônica de varredura (MEV) para caracterizar as estruturas florais e reprodutivas. Os dados foram organizados em planilhas e analisados por meio de testes estatísticos comparativos, com o objetivo de verificar diferenças entre cultivares e tratamentos. As imagens obtidas e os dados fenológicos auxiliaram na compreensão do desenvolvimento da haste floral e da formação dos bulbilhos aéreos nas diferentes cultivares avaliadas. As análises histológicas e de microscopia eletrônica de varredura permitiram a visualização de estruturas florais em diferentes estádios de desenvolvimento, como primórdios de tépalas, estames e carpelos, além da diferenciação de bulbilhos aéreos na inflorescência. As três cultivares comerciais apresentaram indução floral, porém com variações no grau de desenvolvimento das peças florais. A cultivar Caçador demonstrou maior diferenciação das estruturas florais, com desenvolvimento mais evidente dos estames e carpelos, seguida pela cultivar Ito. A cultivar Chonan apresentou menor grau de diferenciação floral e menor número de flores por inflorescência, indicando menor responsividade à indução reprodutiva. O acesso do Banco de Germoplasma também apresentou estruturas florais diferenciadas, evidenciando seu potencial para o florescimento. Apesar da morfologia bem definida, não foi possível avaliar a fertilidade das estruturas reprodutivas devido ao abortamento das flores. Os resultados sugerem que as cultivares avaliadas apresentam traços de fertilidade preservados, porém estudos futuros são necessários para comprovar o potencial de reprodução sexuada destas.

Palavras-chave: *Allium sativum*; Melhoramento genético; Fertilidade; Variabilidade genética; Sementes biológicas;

ABSTRACT

Garlic is a vegetable of economic and cultural relevance, exhibiting morphological variations depending on the environment. Commercial cultivars show high genetic similarity, resulting in vulnerability and limited adaptive variability, which compromises genetic improvement and the crop's adaptation to different environmental conditions. The restoration of fertility in accessions close to the center of origin represents a new perspective for the development of cultivars through sexual reproduction. Cultivars from the Planalto Catarinense region, classified as hardneck, have already demonstrated the ability to flower and form complete inflorescences. Thus, the present study aimed to evaluate the flowering potential of purple garlic cultivars grown in the Planalto Catarinense region. Three commercial purple garlic cultivars (Caçador, Ito, and Chonan) and one accession from the Germplasm Bank were evaluated for flowering, phenology, and floral morphology in the municipality of Curitiba, SC. Collections were carried out at different stages of the reproductive cycle, based on days after planting (DAP) and days after floral differentiation (DAD), covering the period from the beginning of differentiation to the opening of the spathe. The analyses included field phenological observations, measurements of morphophysiological characteristics, collection and counting of aerial bulbils and flowers. Light microscopy and scanning electron microscopy (SEM) analyses were also performed to characterize floral and reproductive structures. The data were organized in spreadsheets and analyzed using comparative statistical tests to identify differences between cultivars and treatments. The images obtained and the phenological data helped to understand the development of the floral stalk and the formation of aerial bulbils in the different cultivars evaluated. Histological and scanning electron microscopy analyses allowed the visualization of floral structures at different developmental stages, such as tepal, stamen, and carpel primordia, as well as the differentiation of aerial bulbils in the inflorescence. All three commercial cultivars exhibited floral induction, but with variations in the degree of development of floral organs. The Caçador cultivar showed greater differentiation of floral structures, with more evident development of stamens and carpels, followed by the Ito cultivar. The Chonan cultivar showed a lower degree of floral differentiation and fewer flowers per inflorescence, indicating lower responsiveness to reproductive induction. The accession from the Germplasm Bank also presented differentiated floral structures, highlighting its potential for flowering. Despite the well-defined morphology, it was not possible to assess the fertility of the reproductive structures due to flower abortion. The results suggest that the evaluated cultivars retain traces of preserved fertility, but further studies are needed to confirm their potential for sexual reproduction.

Keywords: *Allium sativum*; Genetic improvement; Fertility; Genetic variability; Biological seeds

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Datas de coleta dos materiais e fases fenológicas importantes	33
Tabela 2 - Média das cultivares nas colunas e os dias após a diferenciação (DAD) nas linhas com os grupos estatísticos indicados para as variáveis de comprimento da haste floral (cm) e para o diâmetro da inflorescência (mm).	38
Tabela 3 - Estimativa do fotoperíodo mensal em Curitiba (SC) durante o ciclo da cultura do alho em 2024.	42
Tabela 4 - Média do número de bulbilhos e flores para as cultivares de alho Caçador, Ito e Chonan, e para os tratamentos com retirada dos bulbilhos aéreos (T1) e sem retirada dos bulbilhos aéreos (T2).	47

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diferença entre cultivares Hardneck (desenvolvem haste floral) e Softneck (Não desenvolvem haste floral).....	18
Figura 2 - Classificação do alho em tipos hortícolas, segundo a sua capacidade de florescimento e estrutura do bulbo.	18
Figura 3 - Variabilidade genética do alho em grupos hortícolas cultivados em um mesmo local. A,B,C) Artichocke; D,E) Silverskin; F,G) Creole; H) Porcelains; I) Glazed Purple Strip; J) Turban; M) Marbled Purple Stripes; N) Asiatic.	19
Figura 4 - Ciclo da cultura do alho, mostrando os diferentes estádios desde a germinação da semente até a planta adulta	23
Figura 5 -Escala utilizadas para acompanhamento da fenologia. A) Representação da escala fenológica da cultura do alho. B) Escala descritiva da fenologia do alho.....	32
Figura 6 - Haste floral no ponto de maturação do bulbo, momento em que a haste floral atinge uma curvatura em forma de arco espiralado, popularmente conhecido como “pescoço de ganso”.	34
Figura 7 -Variação de características morfológicas em três cultivares de alho (Caçador, Chonan e Ito) ao longo dos dias após a indução floral.....	38
Figura 8 – Vista frontal de inflorescências das cultivares de alho Chonan, Caçador e Ito antes e após a retirada manual dos bulbilhos aéreos a campo.	45
Figura 9 - Estádio máximo de desenvolvimento das flores de alho atingido pelas cultivares avaliadas entre a quarta para a quinta fase do desenvolvimento floral.	46
Figura 10 - A) Retirada dos bulbilhos aéreos a campo. B) Contagem dos bulbilhos aéreos e flores formadas no final do ciclo das cultivares comerciais de alho	47
Figura 11 – Vista frontal de inflorescências com o desenvolvimento das flores de alho roxo nobre. A) Inflorescência sem a retirada dos bulbilhos. B) Inflorescência com a retirada de bulbilhos.	48
Figura 12 - Secções longitudinais de inflorescências em desenvolvimento de genótipos de alho roxo cultivados no Planalto Catarinense.....	50
Figura 13 – Fotomicrografia em microscopia eletrônica de varredura de cultivares de alho roxo cultivados no Planalto Catarinense	52
Figura 14 - Prancha de imagens integrando as análises estruturais histológicas, morfológicas por MEV e por estereomicroscópio da cultivar Caçador	54
Figura 15 – Prancha de imagens integrando as análises estruturais histológicas, morfológicas por MEV e por estereomicroscópio da cultivar Ito	58
Figura 16 – Prancha de imagens integrando as análises estruturais histológicas, morfológicas por MEV e por estereomicroscópio da cultivar Chonan	60
Figura 17 - Prancha de imagens integrando as análises estruturais histológicas, morfológicas por MEV do acesso 131	63
Figura 18 – A) Vista frontal do acesso 131 por estereomicroscópio demonstrando a formação de bulbilhos aéreos e flores lado a lado, sem a interferência humana. B) Microscopia eletrônica de varredura (MEV) mostrando uma flor bem desenvolvida do acesso 131, onde é possível visualizar as tépalas (T), a estrutura de quatro estames (E) e a formação do estigma (e) no centro.	65

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Objetivos	12
1.1.1	<i>Objetivo geral</i>	12
1.1.2	<i>Objetivo específico</i>	12
1.2	Justificativa.....	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	Origem, História e Domesticação	14
2.2	Taxonomia e Classificação	16
2.3	Descrição Morfológica	19
2.4	Importância Econômica do Alho	24
2.5	Melhoramento Genético e Genômica do Alho: Avanços.....	26
2.5.1	<i>Restauração da Fertilidade do alho</i>	26
2.5.2	<i>Marcadores moleculares e mapas de ligação</i>	27
2.5.3	<i>Abordagens transcriptômicas e genoma do alho</i>	28
3	METODOLOGIA	30
3.1	Caracterização da Área Experimental.....	30
3.2	Material vegetal.....	30
3.3	Fenologia	31
3.4	Análises histológicas	34
3.5	Análises morfológicas externas	35
3.6	Análises dos Dados	36
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1	Fenologia.....	38
4.2	Análise das estruturas florais por microscopia de luz.....	49
4.3	Análises morfológicas externas por microscopia eletrônica de varredura.....	52
4.4	Caracterização Integrada: Estrutura, Morfologia e Aspectos Visuais das Cultivares de Alho Roxo Testadas	53
5	CONCLUSÕES	66

1 INTRODUÇÃO

O alho (*Allium sativum*) é uma planta olerícola aromática, nutracêutica e amplamente utilizada na alimentação mundial. Pertencente à família Amaryllidaceae e o gênero *Allium*, inclui aproximadamente 800 espécies. O *Allium sativum* é a segunda espécie do gênero mais cultivada no mundo e possui um genoma diploide ($2n = 2x = 16$), com um tamanho estimado de 15,9 Gb (Dhall *et al.*, 2023; Chaudhari *et al.*, 2022). O aumento da produção em diversas regiões indica a necessidade de investimentos em programas de melhoramento genético e na seleção de novas cultivares adaptadas às demandas contemporâneas. Contudo, essa tarefa é dificultada pela forma da propagação exclusivamente assexuada das cultivares comerciais, por meio dos bulbilhos, que resultam em linhagens clonais e restringem a base genética disponível para cultivo (Shemesh-Mayer; Goldstein, 2021; Dhall *et al.*, 2023; Chaudhari *et al.*, 2022).

O alho (*Allium sativum*) é considerado uma das plantas cultivadas mais antigas, com centro de origem na Ásia Central (Rivlin, 2001; Etoh, 1986; Kotlinska *et al.*, 1991). Ao longo de sua história evolutiva, o processo de domesticação promoveu a seleção de genótipos com bulbos maiores e mais uniformes, favorecendo a propagação vegetativa em detrimento da reprodução sexuada. Essa pressão seletiva, com a evolução da cultura em diferentes climas estão associadas a mutações, múltiplas e extensas na regulação genética do ciclo anual, da arquitetura da planta e das exigências ambientais. O que contribuiu para a esterilidade observada nas cultivares comerciais atuais (Shemesh-Mayer; Goldstein 2021; Shemesh-Mayers *et al.*, 2023). A ausência de recombinação sexual e a clonagem contínua de materiais propagativos levaram à acumulação de mutações somáticas e à perda funcional de estruturas reprodutivas, como flores e sementes viáveis (Dhall *et al.*, 2023; Chaudhari *et al.*, 2022).

Expedições de pesquisadores que realizaram coletas nas regiões próximas ao centro de origem do alho permitiram a identificação de acessos férteis (Etoh, 1983; Etoh, 1997; Etoh *et al.*, 1991; Hong; Etoh, 1996; Inaba *et al.*, 1995.). O uso destes acessos férteis em estudos de genética, genômica e hibridações está causando uma mudança de paradigma no melhoramento do alho, com a possibilidade de desenvolvimento de novas cultivares por meio de cruzamento e seleção. Estes estudos possibilitaram o desenvolvimento de linhagens e progênies produtoras de sementes, mas ainda não em escala comercial. No entanto, como este germoplasma foi coletado no centro de origem, em muitos casos a fertilidade não é acompanhada dos caracteres de interesse comercial, tais como tamanho e formato de bulbo e número de bulbilhos, tornando o processo de melhoramento mais demorado.

As cultivares comerciais plantadas na região do Planalto Catarinense, denominadas de alho roxo, são classificadas como *hardneck*, pois há a formação da haste floral e inflorescências,

que na lavoura geralmente resultam na produção de microbulbilhos ou bulbilhos aéreos. Cultivares que tem a capacidade de haste floral robusta são consideradas de maior proximidade genética ao seu centro de origem e assim apresentam potencial de restabelecimento da fertilidade (Akhan; Karakan; Horzum, 2022). Estudos preliminares com cultivares roxas brasileiras de alho indicaram potencial de florescimento, com emissão da inflorescência com flores perfeitas, apresentando a estrutura masculina e feminina bem desenvolvidas. Estes achados reforçam a necessidade de mais estudos com estas cultivares, com vistas a possibilidade de restabelecer a fertilidade destas cultivares e liberar a variabilidade genética ‘confinada’ nestes clones em cultivo. Com isso tem-se uma abordagem inovadora visando aumentar a variabilidade genética da espécie e desenvolver novas cultivares para contribuir com a alhicultura brasileira.

Portanto, duas perguntas científicas guiam o presente projeto: (i) O alho roxo brasileiro tem potencial para a produção de sementes biológicas? (ii) É possível restabelecer a fertilidade do alho? Para caminhar em direção às respostas a estas perguntas é necessário gerar conhecimento científico quanto a biologia floral destas cultivares de alho. A premissa é que o alho roxo tem potencial de produção de sementes verdadeiras. Desta forma, no presente projeto foi acompanhado o desenvolvimento fenológico de cultivares de alho roxo ao longo de todo o ciclo, com coletas das estruturas reprodutivas que foram avaliadas por meio de técnicas de histologia e morfologia em microscopia eletrônica. Com isso, pretendeu-se determinar o real potencial de florescimento, para servir de base de estudos futuros que objetivarão propor métodos/estratégias para o restabelecimento da fertilidade.

1.1 Objetivos

1.1.1 *Objetivo geral*

Avaliar o potencial de florescimento de cultivares de alho roxo cultivadas na região do Planalto Catarinense.

1.1.2 *Objetivo específico*

- i. Acompanhar a fenologia e conectá-la ao desenvolvimento floral
- ii. Caracterizar histologicamente e morfolologicamente o desenvolvimento floral.

1.2 Justificativa

A alhicultura brasileira enfrenta um grande desafio diante da reduzida variabilidade genética presente nas cultivares de alho comerciais atualmente disponíveis, que são propagadas exclusivamente de forma assexuada ou vegetativa. A reprodução assexuada, apesar de eficiente para a fixação de caracteres agronômicos desejáveis, limita o avanço de programas de melhoramento genético convencional e contribui para a vulnerabilidade genética da espécie frente a estresses bióticos e abióticos, particularmente dentro de um cenário de mudanças climáticas. No contexto do Planalto Catarinense, as cultivares nobres de alho roxo cultivadas têm se destacado por características agronômicas superiores, tais como bulbos graúdos e com túnica branca e número pequeno de bulbilhos graúdos e de coloração arroxeada. Estas cultivares emitem haste floral e são, portanto, classificadas como do tipo *hardneck*, o que sugere maior proximidade genética com o centro de origem da espécie. Estudos recentes apontam que essas cultivares possuem maior potencial de reprodução sexuada, com o desenvolvimento de estruturas reprodutivas o que representa uma oportunidade inovadora para o restabelecimento da reprodução sexuada e, com isso, a exploração da variabilidade genética confinada em clones que se reproduzem exclusivamente de forma assexuada. O restabelecimento da reprodução sexuada no alho roxo representaria um novo paradigma do melhoramento genético do alho no Brasil, hoje focado em seleção clonal e indução de mutações

A recuperação da capacidade de floração e fertilidade nessas cultivares pode contribuir significativamente para o avanço da alhicultura, possibilitando a geração de variabilidade genética natural, a obtenção de sementes verdadeiras e a expansão dos bancos germoplasma nacionais. Além disso, o conhecimento anatômico e morfológico detalhado da biologia floral dessas variedades é fundamental para compreender os fatores que influenciam sua capacidade reprodutiva e viabilizar intervenções agronômicas eficazes para o restabelecimento da

fertilidade. Diante disso, o presente trabalho justifica-se por sua relevância no contexto científico e produtivo, ao buscar melhor compreender aspectos anatômicos e morfológicos relacionados a estruturas florais do alho roxo e, com isso, proporcionar conhecimentos básicos a serem aplicados para promover o restabelecimento do ciclo reprodutivo completo da espécie. Tal abordagem pode servir de base para estratégias de melhoramento genético, manejo reprodutivo e sustentabilidade da cultura do alho no cenário nacional.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Origem, História e Domesticação

O centro de origem do alho tornou-se palco de incertezas por um longo tempo, apesar das civilizações antigas o cultivarem vastamente. Os primeiros taxonomistas consideraram o alho como uma espécie encontrada no Mediterrâneo. Linnaeus acreditava que a Sicília era o habitat original do alho, enquanto Don, acreditava que o centro de origem era Creta (Linnaeus, 1973; Don, 1827). A posteriori os trabalhos de De Candolle (1886) mencionam como sendo o sudoeste da Sibéria o centro de origem do alho, enquanto Regel (1887) relatou a Dzungaria e os Pamirs do Sul do Tadjiquistão como sendo o seu centro de origem. Por fim, Vavilov (1951) apontou a Ásia Central como centro de origem e propôs que o mediterrâneo e o Cáucaso seriam centros de origem secundários. Para pôr fim a este conflito de informações, plantas férteis primitivas foram descobertas no noroeste das Montanhas Tian Shan, na Ásia Central (Etoh, 1986; Kotlinska *et al.*, 1991). Esse fato reforça a hipótese desta região ser o centro de origem primário do alho. Além disso, outros estudos confirmaram a presença de plantas férteis e cultivares mais primitivas nessa área e análises com marcadores moleculares e bioquímicos também indicam essa região como o provável centro de origem da espécie (Pooler, 1991; Maab; Klaas, 1995).

A acentuação destes debates também se dá pelo fato de seu ancestral primitivo ser desconhecido. Taxonomicamente, o *Allium longicuspis* foi inicialmente considerado como o parente mais próximo do alho cultivado, *Allium sativum*. Estudos sobre a variabilidade genética, análises de cariótipos e caracterizações com marcadores moleculares confirmaram que as duas espécies são análogas, ou seja, apresentam características morfológicas semelhantes, mas não tem uma relação evolutiva direta. Entretanto, alguns pesquisadores consideram o *Allium longicuspis* como uma espécie diferente de alho e outros como um subgrupo inserido dentro do complexo de espécies do *A. sativum*. Alternativamente, Mathew (1996) propôs que o *Allium tuncelianum* poderia ser o ancestral mais próximo. Entretanto Ipek *et al.* (2008) menciona que o *A. tuncelianum* não apresenta similaridade genética com *A. sativum*. Estudos recentes que exploram o genoma do alho, demonstraram que o *A. sativum* forma um clado monofilético com *Narcissus viridiflorus* e que o alho foi filogeneticamente mais próximo de *Asparagus officinalis*, onde as espécies compartilharam um ancestral comum há 80.8 milhões de anos (Sun *et al.*, 2020). Dessa forma, a falta de concordância quanto ao ancestral primitivo do alho e os dados filogenéticos contraditórios reforçam a complexidade do tema, evidenciando que a origem evolutiva do *Allium sativum* ainda permanece em aberto.

A trajetória do alho entre diferentes culturas oferece pistas valiosas sobre seu processo de domesticação e dispersão ao longo dos séculos. Considerado uma das plantas cultivadas mais antigas da história, o alho tem sido amplamente utilizado como condimento, especiaria e agente terapêutico por diversas civilizações (Rivlin, 2001). Evidências históricas indicam que sua domesticação teve início na Ásia Central, expandindo-se pelo Oriente Médio e Norte da África por volta de 3000 a.C.

No Egito Antigo, o alho era utilizado na medicina, na alimentação e em rituais religiosos. Historiadores relatam que as autoridades egípcias adquiriam grandes quantidades da planta para alimentar os trabalhadores envolvidos na construção das pirâmides (Rivlin, 2001; Moyers, 1996). Arqueólogos encontraram esculturas de argila e ilustrações de alho datadas de 3700 e 3200 a.C., respectivamente. Potes de argilas com alho e potes modelados em formato de bulbos foram localizados dentro da tumba do faraó Tutancâmon (Green; Polydoris 1993; Kahn, 1996). As amostras de bulbos de alhos mais antigos, desidratados e preservados foram encontrados em Israel, datados de cerca 5.970 a.C (Zaitschek, 1961). Registros apontam que o alho era amplamente cultivado no Egito e que os israelitas adquiriram o hábito de consumi-lo nesse período. Há menções à sua importância também em textos religiosos judaicos e prescrições terapêuticas (Scott, 1827).

Na Índia Antiga, o alho era citado repetidamente em textos médicos tradicionais. O *Manuscrito de Bower* contém relatos míticos sobre sua origem divina. Durante o domínio muçulmano no Oriente Médio e Leste Europeu, o alho consolidou-se como terapia medicinal, sendo mencionado em diversos compêndios médicos ao longo dos séculos. Foi utilizado no tratamento de peste e varíola e, em 1858, Louis Pasteur comprovou sua eficácia contra microrganismos patogênicos. Durante as Guerras Mundiais, o alho foi amplamente empregado como antisséptico e no tratamento da disenteria (Tucakov, 1971; Ekşi *et al.*, 2020; Rivlin, 2001). Os sumérios também valorizavam suas propriedades medicinais e o introduziram na China (Petrovska; Cekovska, 2010), onde seu uso está documentado por volta de 2000 a.C. A planta tornou-se um componente essencial da dieta, especialmente no combate a enfermidades respiratórias e digestivas. Posteriormente, o alho foi disseminado para a Coreia e o Japão. Alguns historiadores sugerem que sua introdução no Japão ocorreu há cerca de dois mil anos, embora seu uso ainda seja pouco expressivo na culinária japonesa (Kahn, 1996; Moyers, 1996).

Na ilha de Creta, foram encontrados bulbos de alho em escavações datadas entre 1850 e 1400 a.C., incluindo uma trança com 300 dentes (Moyers, 1996). Evidências sugerem que soldados gregos consumiam alho antes das batalhas e que atletas o utilizavam como agente de melhoria de desempenho físico (Green; Polydoris, 1993; Lawson, 1998). Os gregos antigos

registraram extensivamente o uso, a história e o cultivo do alho, legado que mais tarde foi incorporado à medicina romana. Durante o Império Romano, embora seu odor forte causasse repulsa entre alguns segmentos, o alho era utilizado como alimento, condimento e remédio, principalmente entre soldados e trabalhadores. Em 1548, foi introduzido na Grã-Bretanha a partir da costa mediterrânea (Vanjkevic, 2002). Seu cultivo na Inglaterra data de antes do século XVI, sendo empregado sobretudo com fins terapêuticos (Moyers, 1996). O alho foi levado ao Novo Mundo por exploradores franceses e portugueses e, no século XX, passou a ser reconhecido como tratamento eficaz para doenças pulmonares (Moyers, 1996).

Segundo relatos históricos, o alho foi introduzido no Brasil pelos portugueses, trazido nas embarcações das caravelas e fazia parte do cardápio da tripulação devido aos seus efeitos culinários e farmacológicos. Entre as décadas de 1960 e 1970, a produção de alho brasileiro se concentrou principalmente nos estados de Minas Gerais e Goiás, predominando o cultivo de variedades comuns, de bulbo branco, geralmente cultivadas em fundos de quintal para consumo doméstico e uso em remédios caseiros. No final da década de 1970, iniciou-se no país a produção de alhos nobres, por iniciativa do Sr. Takashi Chonan, com apoio técnico do Engenheiro Agrônomo Sérgio Mário Regina. Em Frei Rogério, estado de Santa Catarina, foi realizada a seleção da cultivar de alho que recebeu o nome de seu idealizador, consolidando o estado como berço do alho nobre roxo no Brasil. O cultivo comercial começou em 1977 no município de Curitiba, também em Santa Catarina. Apesar da relevância histórica, o Sul do Brasil vem enfrentando redução nas áreas plantadas de alho devido à baixa produtividade, à concorrência com alhos importados, às instabilidades climáticas e a redução da mão de obra disponível (Lucine, 2008).

Em contrapartida, as regiões Sudeste e Centro-Oeste passaram a incorporar tecnologias de vernalização, processo que consiste no armazenamento do alho em câmaras com temperaturas controladas, favorecendo a indução floral mesmo em climas menos propícios. Com isso, houve uma expansão significativa do cultivo empresarial, caracterizado por grandes áreas, uso intensivo de mecanização, irrigação racionalizada e tecnificação do manejo, elevando os níveis de produtividade e viabilizando a competitividade do alho nacional (Lucine, 2008).

2.2 Taxonomia e Classificação

O *Allium sativum* é uma monocotiledônea, espécie diplóide ($2n = 2x = 16$), com genoma haploide estimado em 15,9 gigapares de bases (Gb). Pertence ao gênero *Allium*, que compreende aproximadamente 1000 espécies, sendo subdividido em 15 subgêneros. O alho é a segunda espécie mais cultivada do gênero. Essa espécie integra a família Amaryllidaceae e a ordem Asparagales (Dhall *et al.*, 2023; Egea *et al.*, 2017; Jang *et al.*, 2024).

A classificação do alho tem sido baseada em características biogeográficas, morfológicas e hortícolas e. Os grupos biogeográficos principais incluem *Sativum* (região do Mediterrâneo), *Ophioscorodon* (Europa Central e Oriental) e os subgrupos Subtropical e *Pekinense* (Sul, Sudeste e Leste Asiático). Acredita-se que o grupo *Longicuspis*, originário da Ásia Central, represente a fonte genética desses agrupamentos (Engeland, 1991; Meredith, 2008; Woodward, 2014).

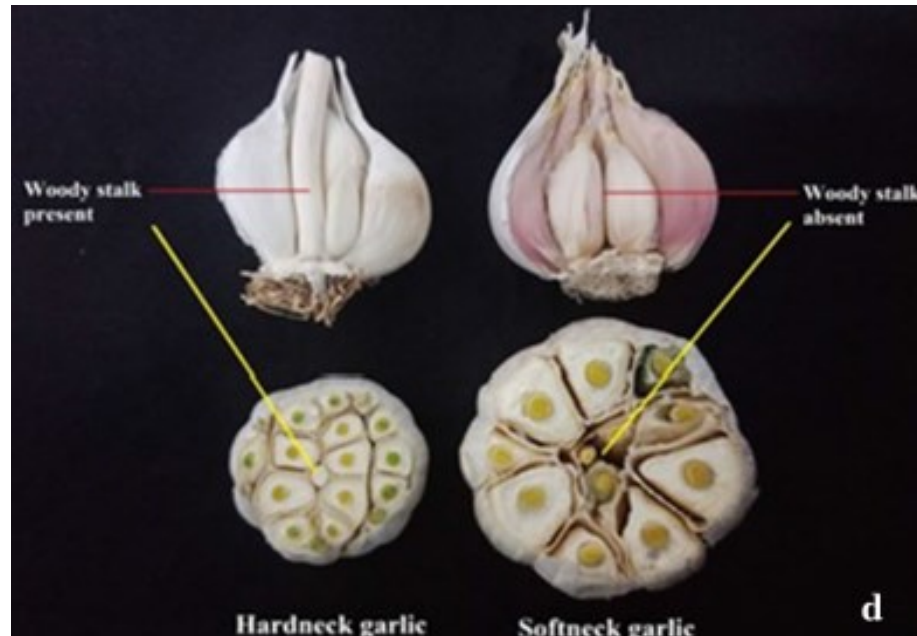
No que se refere à classificação morfológica e hortícola, as cultivares são divididas conforme sua capacidade de emissão de escapo ou haste floral (*bolting*), estrutura do bulbo e fenótipo da planta. A distinção primária se dá entre as variedades que não desenvolvem escapo floral (*softneck*) e aquelas que o desenvolvem (*hardneck*), conforme ilustrado na Figura 1. Com base na intensidade desse florescimento, as cultivares são subdivididas em três tipos: não florescentes (*non-bolters*), parcialmente florescentes (*weak bolters*) e completamente florescentes (*strong bolters*). As categorias varietais mais comuns incluem: Artichoke, Silverskin, Porcelain, Rocambole e Purple Stripe (Engeland, 1991; Meredith, 2008; Woodward, 2014). Esta classificação está demonstrada na Figura 2 e ilustrada na Figura 3.

As variedades do tipo Artichoke são conhecidas por serem produtivas e de fácil cultivo, apresentando entre 12 e 20 bulbilhos por bulbo, com uma disposição típica de dentes grandes na fileira externa e dentes menores na interna. Já as variedades Silverskin destacam-se por sua notável durabilidade em armazenamento, também com 12 a 20 bulbilhos distribuídos em múltiplas camadas. Por sua vez, as variedades Porcelain são facilmente identificadas por seus quatro bulbilhos grandes e simétricos em torno da haste central, sendo bastante apreciadas na culinária devido ao tamanho avantajado dos dentes, embora resultem em menor densidade de plantio por unidade de massa de semente. As variedades Rocambole apresentam de 6 a 11 bulbilhos grandes, que se destacam pela facilidade de descascamento, mas possuem menor vida útil quando comparadas a outras variedades. Uma característica morfológica singular das cultivares desse grupo é o comportamento do escapo floral, que se curva em espiral dupla durante seu desenvolvimento antes de se endireitar. Por fim, as variedades do tipo *Purple Stripe* são caracterizadas por suas túnicas com listras e manchas roxas, cuja intensidade pode variar conforme as condições climáticas. Os bulbos dessa categoria contêm de 8 a 12 bulbilhos, geralmente menores do que os encontrados nas variedades Rocambole. Este grupo é considerado geneticamente o mais próximo do ancestral selvagem do alho e apresenta bom desenvolvimento do escapo floral, além de elevada capacidade de floração (Thompson, 2018).

No Brasil, de acordo com a Portaria nº 242 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), de 17 de setembro de 1992, as variedades são oficialmente agrupadas

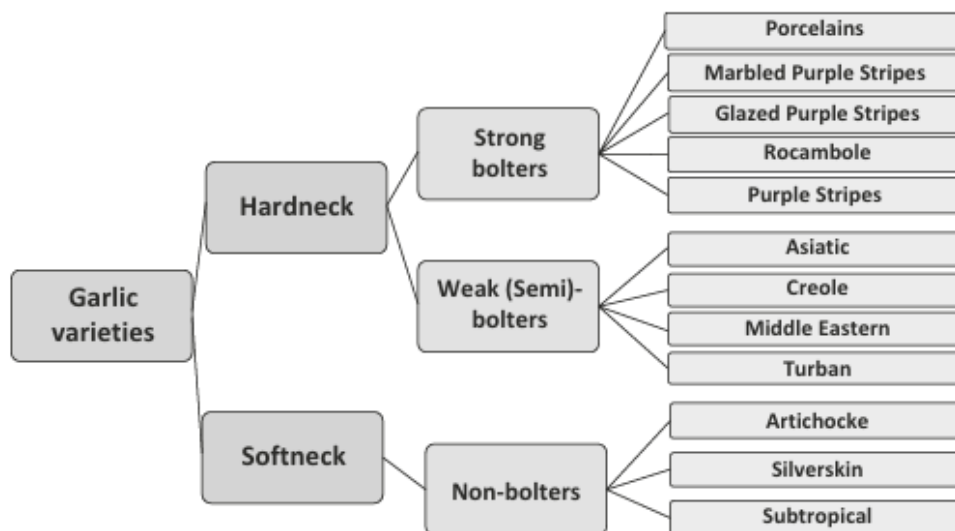
em dois grupos: Alho Branco e Alho Roxo. No grupo Branco predomina a coloração branca nos bulbilhos, podendo ocorrer listras arroxeadas ou de outras tonalidades. Já no grupo Roxo, a coloração roxa é predominante em todos os bulbilhos (MAPA, 2025).

Figura 1- Diferença entre cultivares *Hardneck* (desenvolvem haste floral) e *Softneck* (Não desenvolvem haste floral).



Fonte: Chaudhari et al., 2022.

Figura 2 - Classificação do alho em tipos hortícolas, segundo a sua capacidade de florescimento e estrutura do bulbo.



Fonte: Woodward, 2014.

Figura 3 - Variabilidade genética do alho em grupos hortícolas cultivados em um mesmo local. A,B,C) Artichocke; D,E) Silverskin; F,G) Creole; H) Porcelains; I) Glazed Purple Strip; J) Turban; M) Marbled Purple Stripes; N) Asiatic.



Fonte: Shemesh-Mayers; Goldstein, 2021.

2.3 Descrição Morfológica

O *Allium sativum* é uma planta anual, herbácea, que pode apresentar porte ereto ou prostrado, com altura variando de 20 a 110 cm. Aspectos da anatomia e do desenvolvimento de acessos estéreis e férteis foram estudados por diversos autores (Mann, 1952; Kamenetsky; Rabinowitch, 2001; Winiarczyk; Kosmala, 2009; Shemesh *et al.*, 2013). Os bulbos de alho contêm número variável de bulbilhos (dentes), geralmente entre oito e 14, sendo revestidos por túnicas externas, formadas pelas bainhas secas das folhas mais antigas. Os bulbilhos são brotações laterais que se desenvolvem a partir de meristemas axilares localizados na face adaxial das folhas na inserção com o caule verdadeiro. Cada bulbilho é, por si só, um pequeno bulbo, coberto por folhas protetoras secas cuja coloração pode variar entre branca, roxa ou avermelhada, recobrendo uma folha de reserva modificada que constitui a parte carnosa do dente (Resende *et al.*, 2011; So *et al.*, 2021; Jenderek; Simon, 2003; Vieira, 2012; Brasil, 2015).

As bainhas foliares formam um pseudocaulo curto, compondo uma base em forma de disco da qual também se originam raízes adventícias. O sistema radicular do alho é relativamente espesso e pouco ramificado. As folhas são lineares, alternadas, com bainha tubular, variando de 9 a 12 por planta, e possuem lâminas largas e aerodinâmicas. O bulbo apresenta formato redondo ou ovalado, dividido em bulbilhos que variam em número e forma, sendo geralmente alongados, arqueados e envoltos por brácteas protetoras de coloração variável. Além dessa proteção individual, o bulbo é recoberto por várias túnicas esbranquiçadas, facilmente destacáveis (Resende *et al.*, 2011; So *et al.*, 2021; Jenderek; Simon, 2003).

O ciclo de vida da planta (Figura 4) inicia-se com o rompimento da dormência e a brotação ocorre após exposição a temperaturas entre 4°C e 10°C por várias semanas. Inicialmente, surgem as raízes adventícias ao redor da placa basal, seguidas pela formação das folhas originadas do meristema apical, que posteriormente formarão o pseudocaulo (Simon; Mann; Lewis, 1956; Takagi, 1990). As raízes e folhas se desenvolvem até o início dos mecanismos de transição que controlam a indução da haste floral e o desenvolvimento dos bulbilhos. A emissão da haste floral não ocorre de forma visível em todas as variedades, manifestando-se apenas quando o meristema apical deixa de formar folhas vegetativas e passa a produzir estruturas reprodutivas (Takagi, 1990), muitas vezes estas estruturas são induzidas, mas ficam comprimidas na parte interna da bainha ou do pseudocaulo, sendo essas características um critério importante para distinção entre subespécies de alho.

A inflorescência é do tipo umbela, podendo conter até 100 primórdios florais, cada um com 5 a 6 flores, com amadurecimento desigual. O amadurecimento das flores é afetado pela localização destes primórdios, iniciando no centro da umbela (Shemesh-Mayer; Goldstein, 2018; Kamenetsky; Rabinowitch, 2001). Muitas variedades cultivadas apresentam bulbilhos aéreos, que funcionam como estruturas de propagação vegetativa, semelhantes aos bulbilhos subterrâneos (Shemesh *et al.*, 2013). Esses bulbilhos aéreos competem com as flores por nutrientes e espaço, podendo limitar ou até mesmo impedir o florescimento. As flores são pequenas, com órgãos organizados em perianto formado por seis tépalas, seis estames e um ovário sincárpico constituído por três carpelos fundidos, formando três lóculos, cada um contendo dois óvulos (Jang *et al.*, 2024; Winiarczyk; Kosmala, 2009; Etoh, 1985; 1986; Kamenetsky *et al.*, 2004).

Segundo Rotem *et al.* (2011), o processo de florogênese no alho pode ser dividido em quatro fases: Primeira: Transição do meristema apical para a fase reprodutiva; Segunda: Alongamento da haste floral; Terceira: Diferenciação da inflorescência; Quarta: Conclusão do desenvolvimento, denominada antese.

O desenvolvimento das flores do alho ocorre em dez etapas, com duração média de 18 a 22 dias, variando conforme o genótipo (Shemesh-Mayer *et al.*, 2013). A primeira etapa é caracterizada pela flor fechada, com anteras verdes envolvidas por tépalas também verdes. Na segunda etapa, as tépalas se alongam e tornam-se rosadas, fase que antecede a antese em aproximadamente 10 a 14 dias. Na terceira etapa, as anteras começam a adquirir coloração roxa ou rosada, cerca de 6 a 8 dias antes da antese. A quarta etapa é marcada pela intensificação da cor nas anteras (púrpura), e pela superfície do estigma lisa e regular, momento em que ocorre a antese. Um dia após a antese, inicia-se a quinta etapa, caracterizada pelo desdobramento das tépalas e estames, que se tornam visíveis. A sexta etapa ocorre de dois a três dias após a antese, sendo marcada pela contínua abertura das anteras, permitindo a liberação do pólen; nesse momento, os ovários começam a apresentar coloração entre verde e roxa. Na sétima etapa, há liberação de pólen, porém o estigma não está receptivo. Na oitava, observa-se o esvaziamento máximo do saco polínico, com crescimento máximo dos estames, e o estigma torna-se receptivo. Na nona etapa, a receptividade do estigma aumenta, enquanto as anteras começam a murchar. A décima e última etapa corresponde à senescência das flores. Após a fertilização, o desenvolvimento da semente dura cerca de um mês até atingir a maturação completa (Shemesh-Mayer *et al.*, 2013).

Presume-se que, durante a domesticação, as plantas de alho foram inicialmente cultivadas na Ásia Central e selecionadas com foco na formação de bulbos maiores. Posteriormente, foram transportadas por comerciantes para diferentes regiões climáticas, onde a evolução da cultura resultou na perda da capacidade de florescimento, além de alterações no ciclo anual e na arquitetura da planta. A migração da espécie de seu centro de origem para regiões relativamente mais frias da Europa e da Ásia causou modificações na estrutura da inflorescência e estimulou o desenvolvimento de numerosos bulbilhos aéreos em variedades que apresentam emissão da haste floral. Essas modificações estão associadas a mutações múltiplas e extensas em todo o genoma do alho. Em especial, genes relacionados à vernalização e ao relógio circadiano sofreram alterações que impactaram significativamente a evolução da espécie. Como o genoma do alho é extremamente grande e altamente repetitivo, os homólogos dos genes-chave envolvidos na florogênese e na adaptação ao estresse estão distribuídos por todos os cromossomos, com variantes expressas de maneira diferencial em ambientes distintos. Portanto, a capacidade de florescimento, a resposta ao estresse e o metabolismo da planta são regulados tanto em nível genético quanto transcricional. Essas alterações genéticas e estruturais ao longo da domesticação do alho, associadas à perda da capacidade de florescimento, podem

estar relacionadas ao surgimento de barreiras reprodutivas que resultam em diferentes tipos de esterilidade (Shemesh-Mayer *et al.*, 2023; Shemesh-Mayer *et al.*, 2012).

Nas plantas completamente estéreis (tipo 1), a microsporogênese é interrompida precocemente, ainda nos estádios de micrósporos com um ou dois núcleos. Já nas plantas com esterilidade masculina (tipo 2), observa-se a ausência de micrósporos funcionais, embora a fertilidade feminina seja preservada. A degeneração do tapete ocorre após a formação pós-mitótica das células generativa e vegetativa, indicando uma interrupção tardia que compromete exclusivamente a função reprodutiva masculina. Nas plantas com esterilidade tipo 3, o desenvolvimento morfológico do androceu e gineceu ocorre de forma aparentemente normal; contudo, a maioria dos grãos de pólen é inviável, caracterizando uma barreira funcional que compromete a fecundação, apesar da formação estrutural completa dos órgãos sexuais. A esterilidade feminina, por sua vez, pode ocorrer devido à ausência de receptividade do estigma — impedindo a germinação do tubo polínico — ou ao aborto ovular, que inviabiliza o desenvolvimento do embrião após a fecundação. Esses fenômenos representam barreiras pré e pós-zigóticas, respectivamente. Tais mecanismos, isolados ou combinados, refletem as mutações genéticas e alterações transcricionais que afetam diretamente a morfogênese floral e a viabilidade reprodutiva nas variedades cultivadas de alho (Shemesh-Mayer *et al.*, 2012).

A formação dos bulbos e o florescimento constituem transições de desenvolvimento fundamentais, sendo reguladas principalmente pela temperatura e pelo fotoperíodo. No estágio indutivo (fase de diferenciação), fotoperíodos curtos e temperaturas baixas induzem a transição floral em muitos clones de alho, além de iniciar a formação de gemas laterais nas axilas foliares. Mais adiante, no estágio morfogênico (fase de enchimento), fotoperíodos longos e temperaturas mais elevadas promovem o enchimento dos bulbilhos, emissão da haste floral e o desenvolvimento das flores. A vernalização, tratamento baseado na exposição prévia dos bulbilhos a temperaturas baixas, tem demonstrado acelerar o desenvolvimento e melhorar a formação dos bulbos (Guevara-Figueroa *et al.*, 2015; Pooler; Simon, 1993; Aoba; Takagi, 1971; Wu *et al.*, 2015; Mathew *et al.*, 2011; Kamenetsky; Rabinowitch, 2001).

A vernalização na cultura do alho (*Allium sativum*) é uma técnica fisiológica que visa induzir a diferenciação do meristema apical, promovendo o desenvolvimento vegetativo e, em genótipos *bolting*, a emissão da haste floral. Essa indução ocorre por meio da exposição dos bulbilhos a temperaturas entre 3 °C e 5 °C, com umidade relativa controlada entre 65 % e 70 %, por um período de 40 a 60 dias para as regiões centro-oeste e sudeste, Na região sul este período se reduz a 30 a 40 dias, devido as condições climáticas naturalmente mais amenas. Durante esse processo, há alterações no balanço hormonal da planta, com aumento na síntese de giberelinas

e citocininas, que estimulam o crescimento e a floração, e redução do ácido abscísico, que está associado à dormência. Além disso, a vernalização reduz a exigência fotoperiódica de cultivares nobres, principalmente de cultivares de ciclo mais curto, permitindo seu cultivo em regiões com dias mais curtos. Fisiologicamente, essa técnica antecipa o ciclo da planta, favorece a bulbificação e pode ativar genes relacionados à florogênese, especialmente em cultivares férteis. A prática também contribui para a quebra da dormência dos bulbilhos e para a uniformidade do estande no campo (Gouveia *et al.*, 2008; Souza; Macedo, 2009; Guimarães - Ribeiro, 2023; Reghin; Kimoto, 1998).

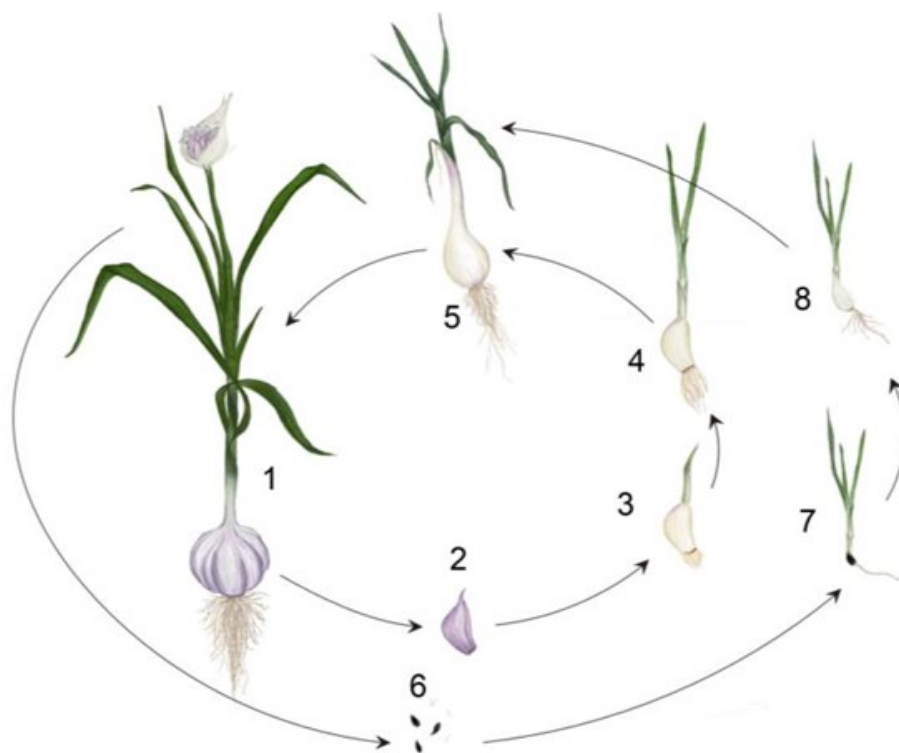
Por outro lado, o fotoperíodo longo pode resultar em bulbos menores, ao mesmo tempo em que favorece o alongamento da haste floral. Contudo, os efeitos do florescimento sobre a formação dos bulbilhos — e vice-versa — ainda não são totalmente compreendidos. Sabe-se que o desenvolvimento do bulbo se inicia mais cedo em cultivares que não emitem escape, sugerindo uma possível competição entre o desenvolvimento vegetativo e reprodutivo. No entanto, estudos divergem quanto à existência dessa competição direta. As condições ótimas de temperatura e fotoperíodo podem variar entre cultivares e fatores genéticos exercem forte influência sobre a floração. Algumas variedades, mesmo sob fotoperíodo longo e condições indutivas, não emitem haste floral, o que contribui para a explicação da infertilidade observada em muitos cultivares (Guevara-Figueroa *et al.*, 2015; Pooler; Simon, 1993; Aoba; Takagi, 1971; Wu *et al.*, 2015; Mathew *et al.*, 2011; Kamenetsky; Rabinowitch, 2001).

Figura 4 - Ciclo da cultura do alho, mostrando os diferentes estádios desde a germinação da semente até a planta adulta. 1) Planta adulta de alho, apresentando haste floral. 2) Bulbilho dormente, recentemente destacado da planta-mãe, ainda não desenvolveu raízes adventícias.

3) Bulbilho germinado, com novas raízes adventícias e as primeiras folhas emergiram. 4) Planta jovem de alho que ainda não diferenciou (não iniciou a formação de novos bulbilhos).

5) Planta de alho que está crescendo e desenvolvendo os bulbilhos, para a formação de uma planta adulta. 6) Sementes verdadeiras são produzidas em algumas variedades férteis de alho.

7) Quando uma semente germina, uma nova plântula emerge, com raiz primária originada do meristema apical do embrião e novas folhas desenvolvendo-se a partir do meristema apical do caule. 8) Sob condições, plantas derivadas de sementes podem produzir novos bulbos, que podem ser propagados vegetativamente.



Fonte: Parreño et al., 2023.

2.4 Importância Econômica do Alho

Os registros sobre a área cultivada com alho iniciaram-se em 1961, com estimativa de 771.238 hectares e produção de 4.300.697 toneladas (FAO, 2025). Os dados mais recentes, referentes ao ano de 2023, indicam uma área cultivada de aproximadamente 1.689.758 hectares, resultando em produção mundial estimada de 28.672.255,8 toneladas. A Ásia é responsável por mais de 89 % da produção mundial de alho, seguida pela Europa (4 %), Américas (3,6 %) e África (2,9 %). Os cinco maiores produtores são: China (75,2%), Índia (6,4%), República da Coreia (1,9%), Egito (1,4%) e Estados Unidos (1,2%). Segundo os dados de 2023, o Brasil ocupa a 15ª posição no ranking global de produção, com produção de 184.844 toneladas e área colhida de 13.544 hectares. O estado de Minas Gerais é o maior produtor nacional. Em Santa Catarina, a produção foi de 8.969 toneladas, com área colhida de 1.098 hectares em 2023, destacando-se o município de Frei Rogério como principal centro produtor (IBGE, 2025).

O consumo anual de alho no Brasil mantém-se estável, em torno de 300 mil toneladas, o que corresponde a um consumo médio per capita de 1,5 kg por ano. A produção nacional, contudo, não é suficiente para suprir a demanda interna, sendo necessárias importações regulares, principalmente da Argentina, China e Espanha, cujos produtos chegam ao mercado com preços altamente competitivos. Embora consiga suprir parte de sua demanda, o Brasil

apresenta potencial para alcançar a autossuficiência, em virtude da possibilidade de expansão da área cultivada. Para isso, são necessários estudos edafoclimáticos que viabilizem maior eficiência produtiva e sustentabilidade. Regiões tradicionalmente ocupadas por pequenos produtores têm reduzido ou abandonado a produção, devido à degenerescência do alho-semente, ao atraso tecnológico e ao aumento das importações (Resende *et al.*, 2021; Resende, 2018).

Além dos aspectos produtivos e econômicos, o alho destaca-se por seu valor funcional e potencial terapêutico, o que tem impulsionado a valorização da cultura em diversas regiões. A qualidade do alho é determinada por sua composição química e pelo teor de compostos bioativos. Esse vegetal apresenta potencial para promover a saúde cardiovascular em múltiplos níveis: reduz a pressão arterial em indivíduos hipertensos, modula concentrações de colesterol levemente elevadas e fortalece o sistema imunológico (Martins; Petropoulos; Ferreira, 2016; Ried, 2014; Zhou *et al.*, 2016; Carvalho; Ferreira; Barros, 2017). Os compostos organossulfurados presentes no alho são responsáveis por seu aroma característico, bem como por grande parte de seus efeitos terapêuticos. A alicina, um dos principais compostos encontrados, é uma molécula fisiologicamente ativa com diversos potenciais e benefícios à saúde. Essas características têm estimulado pesquisas voltadas à conservação pós-colheita, ao melhoramento genético e à otimização das condições de cultivo, com o objetivo não apenas de garantir a produtividade, mas também de assegurar a qualidade funcional do alho disponível no mercado (Borlinghaus *et al.*, 2014; Zhou *et al.*, 2016; Carvalho; Ferreira; Barros, 2017).

Nesse contexto, o uso de cultivares adaptadas às condições edafoclimáticas brasileiras desempenha papel fundamental na sustentabilidade da cadeia produtiva. As cultivares mais plantadas e com melhores características de alho roxo nobre, são Ito, Caçador, Quitéria, Jonas e Chonan, que se destacam por apresentar bulbos de alto valor comercial, com túnicas brancas e bulbilhos de coloração roxa intensa, sendo amplamente cultivadas nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste (Resende *et al.*, s.d.; Resende *et al.*, 2021). Já a cultivar São Valentin tem sido plantada na região Sul devido à sua maior rusticidade e à maior tolerância a pragas e doenças. A cultivar BRS Hozan também tem ganhado espaço por reunir rusticidade, atributos de qualidade típicos dos alhos nobres e menor exigência de vernalização, o que favorece pequenos produtores e amplia a viabilidade do cultivo em diferentes regiões do país (Resende *et al.*, s.d.; Resende *et al.*, 2021). A escolha adequada da cultivar, portanto, influencia diretamente o desempenho agrônomo, a aceitação comercial e a competitividade da produção nacional frente às importações.

2.5 Melhoramento Genético e Genômica do Alho: Avanços

2.5.1 Restauração da Fertilidade do alho

As primeiras tentativas de obtenção de sementes verdadeiras de alho foram relatadas em 1953 e 1956, por Konokov e Zizina, respectivamente. A partir de 1983, um grupo de pesquisadores iniciou a coleta de genótipos férteis de alho próximos ao centro de origem da espécie. Foram coletados 17 clones que produziram mais de 3.000 sementes (Etoh, 1983; Etoh, 1997; Etoh *et al.*, 1991; Hong; Etoh, 1996; Inaba *et al.*, 1995). Esses resultados serviram de base para estudos aprofundados sobre as características reprodutivas do alho e as barreiras à fertilização.

Na década de 1990, uma equipe nos Estados Unidos conseguiu produzir mais de 400 sementes por umbela (Jenderek, 1998; Jenderek; Hannan, 2000). Posteriormente, uma nova coleta de genótipos férteis foi realizada na Ásia Central por equipes internacionais, nas quais seleções combinadas com condições de dias curtos resultaram na produção de até 450 sementes por inflorescência (Baitulin *et al.*, 2000; Kamenetsky; Rabinowitch, 2001; Kamenetsky *et al.*, 2004).

Os primeiros estudos sobre a biologia reprodutiva do alho sugeriam que o equilíbrio hormonal ou a competição por energia restringiam o desenvolvimento simultâneo de órgãos reprodutivos e vegetativos. Atualmente, compreende-se que as barreiras à fertilidade do alho são mais complexas e variáveis, manifestando-se em diferentes graus. Restaurar a fertilidade nessa espécie permitiria novas combinações genéticas em programas de melhoramento e estudos genéticos. Por isso, esse objetivo tornou-se central entre os pesquisadores da área, que vêm direcionando sua atenção aos processos morfológicos e fisiológicos envolvidos na florogênese (Etoh, 1979, 1980, 1985; Gori; Ferri, 1982; Jenderek, 2004; Katayama, 1936; Novak, 1972; Pooler; Simon, 1994; Shemesh-Mayer *et al.*, 2013; Shemesh-Mayer; Goldstein, 2018; Winiarczyk *et al.*, 2012; Winiarczyk; Gébura, 2016; Winiarczyk; Kosmala, 2009; Takenaka, 1931; Tchorzewska *et al.*, 2015, 2017).

O processo reprodutivo pode ser interrompido precocemente — antes ou durante as transições do meristema para o estágio reprodutivo — por doenças ou condições ambientais desfavoráveis (Konvicka, 1973; Bem-Michael *et al.*, 2018). Nos casos em que ocorre o desenvolvimento da flor e do pendoamento inicial, inicia-se o estágio seguinte dentro da inflorescência, no qual os botões florais e vegetativos (bulbilhos aéreos) competem por nutrientes, podendo os bulbilhos comprimir as flores jovens (Kamenetsky; Rabinowitch, 2001; Koul; Gohil, 1970). Mesmo que as flores se diferenciem, seu desenvolvimento pode ser

comprometido por abortamento do pólen e degeneração do tapete, resultando em um fenótipo de macho-esterilidade (Ettoh, 1979, 1980; Gori; Ferri, 1982; Jenderek, 2004; Novak, 1972; Shemesh-Mayer *et al.*, 2013; Tchorzewska *et al.*, 2015). Atualmente, há consenso de que a remoção dos bulbilhos é essencial para evitar a senescência floral e possibilitar a produção de sementes verdadeiras em clones férteis. Alguns autores concluíram que existem fatores fundamentais para a obtenção de sementes verdadeiras: sendo estas: a utilização de um genótipo fértil; a remoção dos bulbilhos aéreos das inflorescências, as condições climáticas ideais ao desenvolvimento floral, uma boa nutrição e qualidade fitossanitária (Kaur; Dhall, 2017).

Aparentemente, o processo reprodutivo do alho foi prejudicado em diversos momentos ao longo da evolução da espécie, o que torna desafiador encontrar germoplasma com potencial de fertilidade adequado. Além disso, esses materiais devem ser expostos a condições ambientais específicas, que favoreçam a expressão dos genes de floração, a diferenciação floral e o bom desempenho morfológico das flores. Assim, as pesquisas atuais buscam integrar a seleção de novos germoplasmas, associado a estudos fisiológicos e genéticos e o desenvolvimento de marcadores moleculares relacionados às características reprodutivas (Shemesh-Mayer; Goldstein, 2018).

Apesar dos avanços no conhecimento sobre fatores fisiológicos, genéticos e ambientais envolvidos nesse processo, o germoplasma com produção fértil de sementes ainda não está amplamente disponível (Kamenetsky, 2007; Shemesh *et al.*, 2008; Pooler; Simon, 1993; Jenderek; Zewdie, 2005; Rotem *et al.*, 2011; Kamenetsky *et al.*, 2015; Shemesh-Mayer *et al.*, 2015). Com o avanço do conhecimento sobre os fatores que influenciam a reprodução sexuada e a produção de sementes em alho, espera-se que um novo paradigma no melhoramento do alho seja alcançado.

2.5.2 Marcadores moleculares e mapas de ligação

Antes do sequenciamento do genoma do alho, diversos grupos de pesquisa relataram o desenvolvimento e a utilização de diferentes tipos de marcadores, desde isoenzimas até marcadores baseados em DNA, incluindo RAPD, SSR, ISSR, SRAP e AFLP (Ettoh; Ogura, 1981; Maab; Klass, 1995; Ma *et al.*, 2009; Zhao *et al.*, 2011; Lee *et al.*, 2011; Chen *et al.*, 2014; Barboza *et al.*, 2018). Esses marcadores foram aplicados a diversos fins, tais como o estudo das relações filogenéticas entre espécies do gênero *Allium*, a caracterização da diversidade intraespecífica e a avaliação de acessos em bancos de germoplasma. Com a disponibilidade do sequenciamento do genoma do alho, tornou-se possível determinar a localização genômica desses marcadores, confirmando que muitas das sequências SSR selecionadas aleatoriamente

não correspondem a alelos. Assim, marcadores derivados de sequências expressas, tais como os ESTs e as leituras de RNA-seq, passaram a ser considerados mais reprodutíveis e informativos (Chen *et al.*, 2013; Ipek *et al.*, 2015).

O primeiro mapa de ligação do genoma do alho foi construído em 2005, utilizando 84 plantas de uma população S₁ obtida por autofecundação de uma variedade de origem soviética. Essa população também possibilitou o estudo da esterilidade masculina, herdada como um traço recessivo e atribuída a um dos grupos de ligação (Zewdie *et al.*, 2005). No mesmo ano, foi publicado um segundo mapa, baseado em marcadores AFLP e marcadores gênicos específicos, utilizando duas populações de mapeamento obtidas por autopolinização (Ipek *et al.*, 2005). O principal desafio no mapeamento genético do alho reside na infertilidade da maioria das variedades disponíveis, o que dificulta a geração de cruzamentos e populações de mapeamento. No entanto, a aplicação da técnica DArT-seq, relacionada ao GBS, foi empregada com sucesso em alho para avaliar a diversidade genética e identificar acessos redundantes em uma ampla coleção de germoplasma da Espanha (Egea *et al.*, 2017). Além disso, o primeiro estudo sobre variações epigenéticas em alho destacou a importância de preservar variantes epigenéticas, já que as coleções analisadas por esse grupo apresentaram níveis de variação epigenética superiores aos de variação genética (Giménez *et al.*, 2016; Giménez; Lampasona, 2018). Isso sugere que mecanismos epigenéticos regulam características fenotípicas importantes, como floração, resistência a estresses e produtividade, podendo explicar por que cultivares com genótipos idênticos apresentam respostas diferentes ao ambiente (Giménez; Lampasona, 2018).

2.5.3 Abordagens transcriptômicas e genoma do alho

Os esforços para caracterizar o conteúdo gênico do genoma do alho vêm sendo realizados desde 2015. Esses estudos permitem compreender, em nível molecular, os principais problemas enfrentados pela cultura. Alguns trabalhos de transcriptômica buscaram entender a base molecular desses desafios e podem contribuir para a restauração da produção de sementes verdadeiras em determinadas variedades. Outros estudos concentram-se na relação entre as temperaturas de armazenamento e a formação dos bulbos (Rohkin *et al.*, 2015; Chand *et al.*, 2015; Buso *et al.*, 2008; Garcia-Lampasona *et al.*, 2012; Jo *et al.*, 2012).

As primeiras montagens do transcriptoma do alho foram realizadas em 2012, utilizando a tecnologia de sequenciamento Illumina. As sequências obtidas possibilitaram a identificação de genes envolvidos na via de assimilação do enxofre e na biossíntese de compostos organossulfurados (Sun *et al.*, 2012). Posteriormente, Kamenetsky *et al.* (2015) montaram e anotaram um transcriptoma integrado, com amostras provenientes de flores, inflorescências,

folhas, dentes, prato basal e raízes de uma variedade fértil de alho, permitindo a identificação de genes ortólogos relacionados à floração.

Atualmente, o alho possui uma montagem genômica em escala cromossômica, obtida por meio da combinação das tecnologias de sequenciamento PacBio, Illumina e ONT, além de bibliotecas de apoio. Essa montagem resultou em uma sequência que cobre 96,1% do genoma, conforme estimativas recentes. A principal dificuldade nesse processo decorre da alta complexidade do genoma, que contém um número elevado de sequências repetitivas concentradas nas regiões centrais dos cromossomos, além de apresentar altos níveis de heterozigosidade (Wang *et al.*, 2022; Liao *et al.*, 2003). O que era esperado, devido a ausência de recombinação sexual o que contribui para a acumulação de mutações somáticas, o que aumenta a heterozigosidade. Dificultando a interpretação de marcadores moleculares, mascarando diferenças reais entre genótipos, dificultando a distinção entre cultivares férteis e estéreis (Vieira; Nodari, 2007).

Apesar dos avanços significativos na compreensão dos mecanismos genéticos e fisiológicos da reprodução do alho, a maioria dos estudos ainda se concentra em genótipos férteis próximos do centro de origem. Entretanto, o alho roxo cultivado no Brasil, especificamente no Planalto Catarinense, tem despertado um crescente interesse científico. Estudos recentes demonstraram variabilidade morfológica e genética significativa entre acessos clonais dessa variedade, reforçando o potencial para programas de seleção clonal e conservação de germoplasma adaptado às condições locais (Mazzuco, 2023; Beise *et al.*, 2023). Além disso, novas abordagens vêm sendo exploradas, como a mutagênese induzida por radiação gama, atualmente em desenvolvimento pela ESALQ/USP, com o objetivo de gerar novas cultivares de alho adaptadas ao Brasil (ANAPA, 2023). Embora este projeto esteja em fase inicial, ele representa uma estratégia inovadora e promissora para ampliar a base genética de variedades propagadas vegetativamente. Neste cenário, o atual trabalho busca contribuir para investigar aspectos reprodutivos e morfoanatômicos do alho roxo oferecendo subsídios para futuras estratégias de melhoramento genético e conservação deste importante grupo varietal.

3 METODOLOGIA

3.1 Caracterização da Área Experimental

O experimento foi conduzido na Área Experimental Agropecuária da UFSC, Campus de Curitibanos, localizada no município de Curitibanos, em Santa Catarina, nas coordenadas geográficas de latitude 27°16' S e longitude 50°30' W e altitude de 950 metros. O clima da região é Cfb segundo a classificação de Köppen (1948), que é caracterizado por temperaturas inferiores a 15 °C no mês mais frio e superiores a 25 °C no mês mais quente do ano. A precipitação média anual variou entre 1.500 mm e 1.700 mm, sendo bem distribuída ao longo do ano (EMBRAPA, 2011).

As cultivares comerciais foram plantadas em três canteiros, preparados com um mês de antecedência em relação à data de plantio, totalizando uma área de 9 m². Cada canteiro teve as dimensões de três metros de comprimento, um metro de largura e 20 cm de altura. As parcelas experimentais foram alocadas dentro dos canteiros, com a dimensão de um metro de canteiro cada. Dessa forma, o experimento foi conduzido como um delineamento inteiramente casualizado (DIC), com os materiais alocados aleatoriamente em parcelas de um metro dentro dos canteiros. O acesso foi plantado em apenas um canteiro, em uma parcela de um metro de canteiro. A adubação foi reduzida em 60 % em comparação ao manejo convencional utilizado em lavouras comerciais, seguindo a recomendação da análise de solos, para evitar vigor excessivo das plantas. A irrigação foi realizada de forma constante, por meio de gotejamento. As aplicações fitossanitárias foram realizadas de modo preventivo, seguindo calendário de aplicação, utilizando produtos químicos recomendados para o alho.

3.2 Material vegetal

Ao todo, foram avaliadas quatro cultivares quanto ao potencial de florescimento: 1) três cultivares comerciais de alho clonal de ciclo precoce cultivadas no Planalto Catarinense (Chonan, Ito e Caçador); 2) um acesso (131) do Banco de Germoplasma da Epagri, com potencial de florescimento previamente comprovado. Os bulbos das cultivares comerciais foram obtidos de produtores locais e o acesso 131 foi disponibilizado pela Epagri Caçador. Das cultivares comerciais foram selecionados bulbos da classe 4, apresentando diâmetro equivalente a 37 a 42 mm. Esses bulbos foram submetidos à vernalização a 2 °C $\pm$ 2, com duração de 30 dias. Após esse período, os bulbos foram debulhados e os bulbilhos foram selecionados conforme a categoria de massa, sendo considerados para plantio apenas aqueles com massa

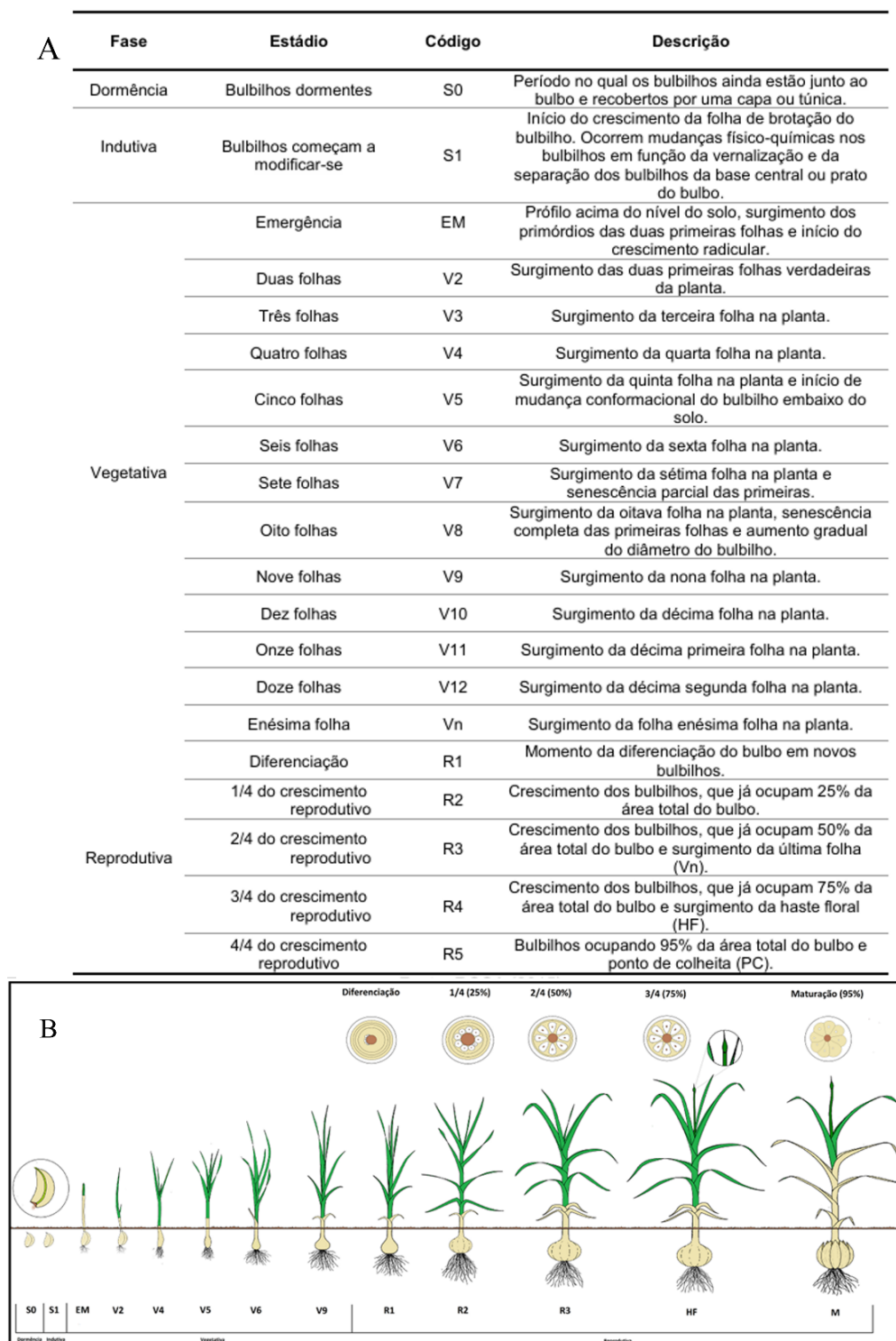
superior a 3 g e inferior a 4 g. O plantio foi realizado em campo, conforme descrito anteriormente. As cultivares comerciais foram distribuídas nas parcelas alocadas nos canteiros experimentais. O plantio dos bulbilhos foi realizado em linhas, com uma distância de 10 cm entre as linhas e 10 cm entre plantas, totalizando aproximadamente 70 plantas por parcela. Ao todo cada cultivar tinha 210 plantas. O acesso 131 foi plantado em apenas uma parcela, devido ao número pequeno de bulbilhos disponível, totalizando apenas 20 plantas. Para este acesso, foram realizadas apenas análises estruturais e morfológicas e o acompanhamento simples da fenologia, sem o acompanhamento destrutivo semanal, devido ao baixo número de plantas. Portanto, as coletas foram feitas de forma mais pontual e espaçadas e sem uma coleta final devido ao tamanho das estruturas quando estas se tornam visíveis.

3.3 Fenologia

O plantio foi realizado no dia 03 de julho de 2024 e, a partir desta data, foi realizada o acompanhamento da fenologia das plantas com base em uma escala previamente estabelecida, demonstrada na Figura 5. Para determinar o estágio fenológico, foram marcadas aleatoriamente cinco plantas por parcela em cada canteiro. Semanalmente, foram registrados o número de folhas, a altura da planta e o diâmetro do pseudocaule. O objetivo principal dessas avaliações foi identificar as seguintes fases fenológicas: ponto de diferenciação, ponto de maturação do bulbo e desenvolvimento da haste floral. As datas que demonstram estes pontos estão demonstradas na Tabela 1.

A partir do ponto de diferenciação, foram iniciadas as coletas semanais de três plantas por cultivar, com o intuito de realizar as avaliações estruturais e morfológicas. Nessa etapa, foi feita a coleta dos tecidos correspondentes ao ponto das estruturas em diferenciação da inflorescência, localizadas na extremidade da haste floral. Realizaram-se 10 coletas, consideradas suficientes para caracterizar a diferenciação dessas estruturas até o ponto de abertura das inflorescências. Para as análises estruturais e morfológicas (Histológica e MEV), foram utilizadas somente quatro pontos de coleta, aos 16, 44, 61 e 68 dias após a diferenciação (DAD). Nestas plantas coletadas, por serem análises destrutivas, foram registrados o comprimento e o diâmetro da haste floral, o diâmetro da inflorescência e o diâmetro do bulbo. Com a finalidade de garantir padronização metodológica, foi adotada como marco para o início das coletas a data correspondente à diferenciação das cultivares comerciais, permitindo melhor uniformidade na comparação dos dados entre os genótipos avaliados. As datas das coletas realizadas são apresentadas na Tabela 1.

Figura 5 -Escala utilizada para acompanhamento da fenologia. A) Representação da escala fenológica da cultura do alho. B) Escala descritiva da fenologia do alho.



Fonte: Rebelato (2016); Rosa, (2015).

Tabela 1- Datas de coleta dos materiais e fases fenológicas importantes

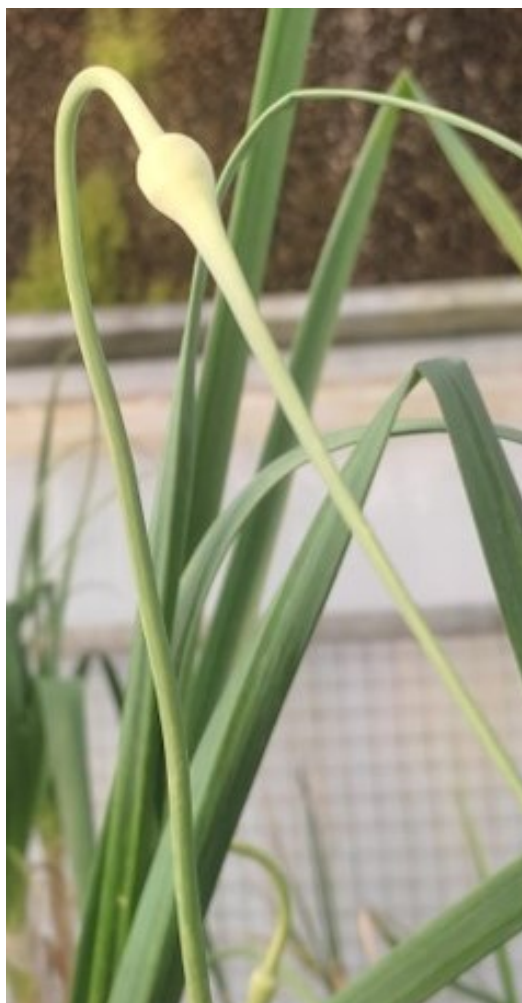
Data da coleta	*DAP	*DAD	Observações
24/09/2024	83	1	Ponto de diferenciação das cultivares
26/09/2024	85	4	-
01/10/2024	90	9	-
09/10/2024	98	16	Coleta para as análises estruturais e morfológicas
16/10/2024	106	24	Cultivar Ito emissão da última folha visível
23/10/2024	113	31	Haste torna-se visível a campo Cultivar Caçador emissão da última folha visível
05/11/2024	126	44	Cultivar Chonan emissão da última folha visível. Coleta para as análises estruturais e morfológicas.
15/11/2024	136	54	-
22/11/2024	142	61	Ponto de maturação, exceto Chonan. Coleta para as análises estruturais e morfológicas
29/11/2024	150	68	Abertura das espatas, exceto Chonan. Coleta para as análises estruturais e morfológicas
*09/12/2024	160	78	Abertura da espata para a cultivar Chonan

*DAP = Dias após o plantio; DAD = Dias após a diferenciação. * Dado não utilizado nas avaliações.

A partir do ponto de maturação do bulbo, definida como o momento em que a haste adquiriu uma forma de “pescoço de ganso” (representada na Figura 6), que ocorreu aos 150 DAP, foi removida a espata, estrutura que reveste a inflorescência, permitindo a visualização do desenvolvimento das flores e dos bulbilhos aéreos na inflorescência. Uma semana após a abertura das espatas, iniciou-se a retirada e coleta diário dos bulbilhos aéreos em formação, que prosseguiu até o momento de senescência total das folhas das cultivares (cerca de 18 dias).

Os bulbilhos aéreos formados foram removidos com o auxílio de uma pinça (como demonstrado na Figura 10), em dez plantas marcadas, e nas demais plantas eles foram mantidos na inflorescência a título de comparação. Os bulbilhos aéreos retirados foram contados e pesados, possibilitando a quantificação da produção por inflorescência. Ao final do ciclo, nestas hastes foi realizada a contagem do número de flores por planta e do número total de bulbilhos formados, sendo considerado o tratamento 1. No tratamento 2, sem a retirada dos bulbilhos, foi também realizada a contagem dos bulbilhos e flores, permitindo comparar o efeito de retirar ou não os bulbilhos aéreos.

Figura 6 - Haste floral no ponto de maturação do bulbo, momento em que a haste floral atinge uma curvatura em forma de arco espiralado, popularmente conhecido como “pescoço de ganso”.



Fonte: O autor.

No final de Dezembro as plantas estavam com poucas folhas verdes e algumas doenças de final de ciclo começaram a aparecer, como a alternaria e a ferrugem. Este fato resultou em perda de plantas a campo devido ao avanço do ciclo do alho. Neste momento o experimento foi finalizado coletando os materiais que encerraram o seu ciclo e realizando a contagem das flores e bulbilhos.

3.4 Análises histológicas

As análises foram realizadas no laboratório de Ecologia e Morfologia Vegetal (CC1209), em Curitiba, SC. Os botões florais coletados foram fixados em solução FAA (formaldeído, ácido acético e álcool etílico) por uma semana e, posteriormente, conservados em álcool 70 % até o momento da análise.

Para a confecção das lâminas histológicas, os tecidos passaram por uma desidratação etílica crescente, nas concentrações de 80 %, 90 %, 95 % permanecendo aproximadamente um dia em cada concentração. Para a inclusão em historesina, os tecidos vegetais passaram por uma etapa de pré-infiltração, com duração de 24 horas, seguida pela infiltração em solução apropriada, por um período estimado entre 24 e 48 horas. Foi utilizado um kit de historesina da Leica®.

Após esse processo, no momento da utilização, foi preparada a solução de inclusão, na proporção de 1 mL de endurecedor para cada 15 mL de solução de infiltração. A solução preparada foi inserida nos moldes plásticos, juntamente com o tecido vegetal, permanecendo por aproximadamente 24 horas para o endurecimento completo. Em seguida, os blocos foram retirados dos moldes e colados com auxílio de adesivo instantâneo (tipo superbonder) em suportes de madeira, possibilitando o encaixe no equipamento de corte.

No micrótomo rotativo manual, modelo YD - 315®, os blocos de madeira foram fixados de modo a permitir que a lâmina realizasse secções com espessura de 6 µm. Durante o seccionamento, as secções obtidas foram coletadas com auxílio de uma pinça e depositadas sobre lâminas de vidro contendo água, em uma placa levemente aquecida. Esse procedimento facilitou a expansão da resina, melhorando a qualidade das imagens obtidas. As lâminas foram, então, secas, coradas com azul de toluidina, preparado segundo o protocolo de O'Brien et al. (1965), onde o corante foi colocado em contato com a amostra por um minuto e, em seguida, enxaguado com água destilada. As amostras foram analisadas ao microscópio de epifluorescência Olympus BX60 acoplado com câmera digital Olympus DP73, e fotomicrografadas com o software cell Sens Standard® para seleção das melhores lâminas. As lâminas selecionadas foram cobertas com lamínulas coladas com bálsamo do Canadá, visando à sua conservação por tempo prolongado. As amostras permanentes foram avaliadas no microscópio de luz quanto à diferenciação de estruturas reprodutivas ou vegetativas.

3.5 Análises morfológicas externas

As análises foram realizadas no Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME), localizado na UFSC, em Florianópolis. As amostras florais destinadas à análise em microscópio eletrônico de varredura (MEV) foram inicialmente fixadas em solução FAA e, posteriormente, armazenadas em etanol 70 %. Após esse período, as amostras foram transferidas para álcool etílico absoluto (100 %), etapa que precedeu a secagem por ponto crítico. Essa mudança de concentração de álcool ocorreu por meio de uma série etílica crescente: 80, 90, 95 e 100 %, permanecendo cerca de 24 h em cada etapa.

A secagem por ponto crítico das amostras foi realizada com equipamento específico (EM CPD 030 / LEICA), utilizando dióxido de carbono líquido como agente intermediário, a fim de preservar as estruturas morfológicas superficiais. Em seguida, as amostras secas foram fixadas em stubs metálicos com fita dupla-face condutiva. Para garantir a condutividade elétrica e possibilitar a análise no MEV, as amostras foram metalizadas com ouro em aparelho de sputtering (SCD050), formando uma camada fina e uniforme sobre a superfície vegetal. A visualização foi realizada no microscópio eletrônico de varredura modelo JEOL JSM-6390LV, operando sob tensão de aceleração de 8 kV. Foram obtidas imagens em vista frontal em diferentes ampliações, com o objetivo de caracterizar estruturas florais e superficiais. Análises da morfologia externa das inflorescências também foram realizadas com auxílio de estereomicroscópio, modelo Leica KL300 LED, com câmera digital acoplada.

3.6 Análises dos Dados

Os dados obtidos ao longo do experimento foram organizados em planilhas eletrônicas. As variáveis quantitativas (número de folhas, altura da planta, diâmetro da haste floral, comprimento da haste floral, diâmetro da inflorescência e diâmetro do bulbo) foram apresentadas por meio de gráficos. Em seguida, adotou-se uma abordagem estatística baseada em modelos lineares com covariáveis (ANCOVA), considerando o caráter temporal e contínuo da variável “dias após indução floral” (DAD). O uso da ANCOVA foi preferido em relação à ANOVA tradicional, uma vez que esta última assume tratamentos categóricos independentes, enquanto a ANCOVA permite controlar o efeito do tempo (DAD) sobre as variáveis de interesse ao comparar os diferentes cultivares. Dessa forma, foi possível identificar o efeito isolado do tempo (DAD) e das cultivares sobre variáveis morfofisiológicas como comprimento da haste floral, diâmetro da inflorescência, número de folhas, diâmetro do bulbo, entre outros. Para variáveis nas quais o efeito do fator “Cultivar” foi estatisticamente significativo, procedeu-se com testes de comparação múltipla de médias, por meio do método de Tukey, com nível de significância de 5% ($p < 0,05$) para cada um dos DAD para as três cultivares.

A fim de avaliar os efeitos de diferentes cultivares e tratamentos sobre o número de bulbilhos e de flores, foi conduzida uma análise estatística bifatorial em delineamento inteiramente casualizado, considerando os fatores cultivar (três níveis: *Ito*, *Caçador* e *Chonan*) e tratamento (dois níveis: *T1* (com retirada de bulbilhos) e *T2* (Sem retirada de bulbilhos), com dez repetições por combinação (cada planta foi considerada uma repetição). Inicialmente, foi aplicada uma Análise de Variância (ANOVA) bifatorial para cada variável dependente (*número de bulbilhos* e *número de flores*), com o objetivo de identificar efeitos principais dos fatores e

possíveis interações entre eles. Quando diferenças significativas foram observadas, as médias foram comparadas pelo teste de comparações múltiplas de Tukey ($\alpha = 0,05$).

As imagens obtidas por microscopia de luz e eletrônica de varredura foram utilizadas para a caracterização descritiva das estruturas florais e reprodutivas, considerando a diferenciação morfológica observada ao longo das coletas, ilustradas na forma de pranchas. Essas imagens serviram como suporte visual aos dados quantitativos, complementando as análises fenológicas. As informações obtidas permitiram relacionar os estádios fenológicos, a anatomia floral e o comportamento das cultivares avaliadas, contribuindo para a compreensão do processo de desenvolvimento da haste floral e da formação dos bulbilhos aéreos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Fenologia

Os genótipos avaliados apresentaram comportamento fenotípico semelhante dentro das condições ambientais e agrônômicas do experimento (Tabela 1). Esse padrão homogêneo provavelmente está associado à proximidade genética entre as cultivares ou a capacidade de adaptação que permite respostas adaptativas semelhantes ao ambiente de cultivo (Fasoula; Fasoula, 2000). Entretanto, duas variáveis apresentaram diferença estatística em pontos de coleta específicos: o diâmetro da inflorescência apresentou diferença estatística apenas aos 24 e 44 DAD e o comprimento da haste floral, aos 24, 31 e 44 DAD (Tabela 2).

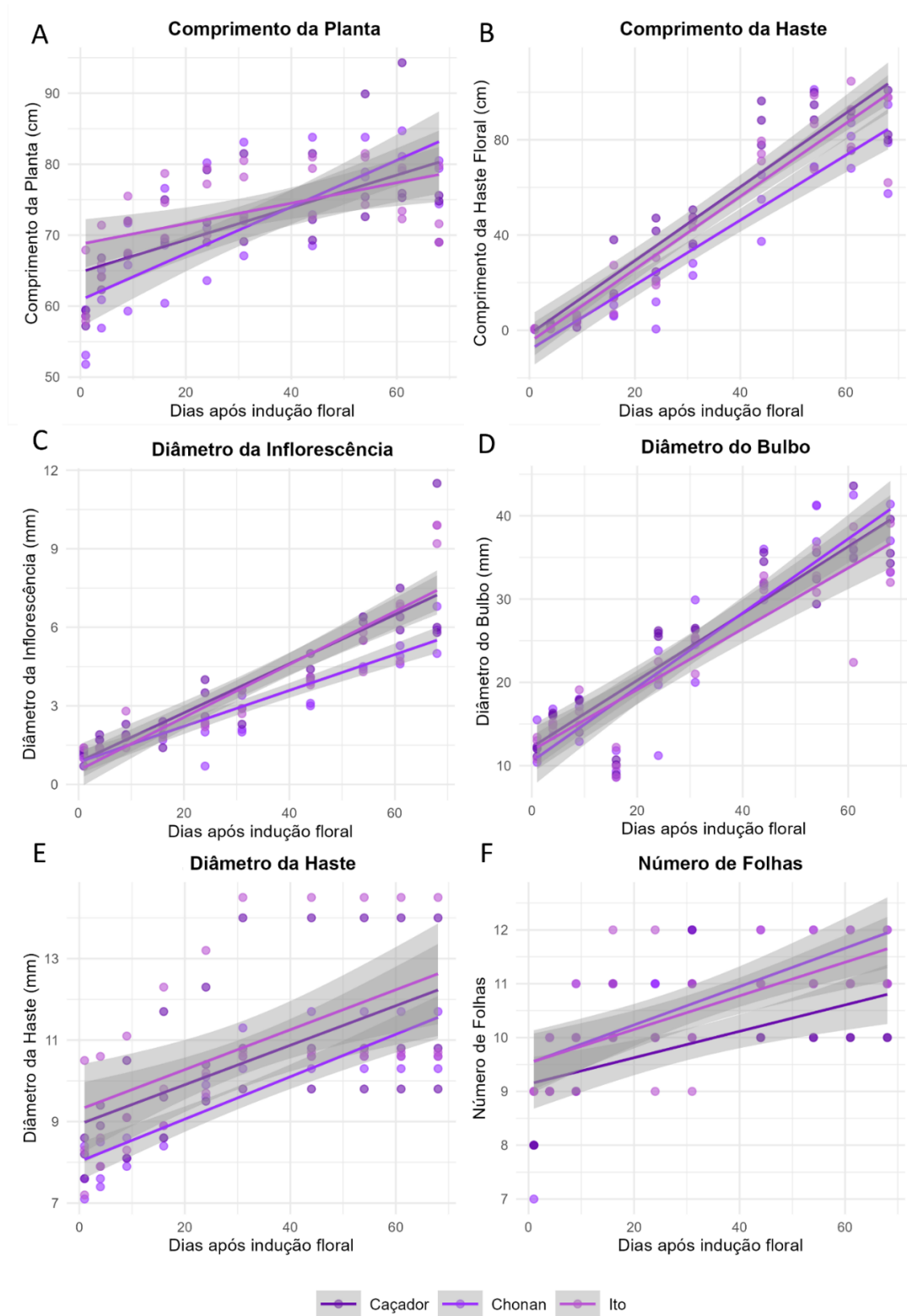
Tabela 2 - Média das cultivares nas colunas e os dias após a diferenciação (DAD) nas linhas com os grupos estatísticos indicados para as variáveis de comprimento da haste floral (cm) e para o diâmetro da inflorescência (mm).

Comprimento	DAD (dias)	Caçador	Ito	Chonan
da Haste Floral (cm)	24	37.80 a	23.33 ab	11.23 b
	31	44.80 a	45.47 a	28.73 b
	44	87.43 a	74.90 ab	52.53 b
Diâmetro da Inflorescência (mm)	24	3.37 a	2.30 ab	1.67 b
	31	2.93 a	3.07 a	2.5 a
	44	4.50 a	3.93 ab	3.37 b

*Médias seguidas por letras diferentes na linha indicam diferença estatística significativa pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Cultivares com a mesma letra não diferem entre si.

Os dados quantitativos evidenciaram a estabilização do número de folhas, do crescimento da planta e do diâmetro da haste (Figura 7). Bem como mostram, a evolução do crescimento dos bulbos, da inflorescência e do alongamento da haste floral. Refletindo os marcos fenológicos determinantes no ciclo produtivo do *Allium sativum* L.

Figura 7 -Variação de características morfológicas em três cultivares de alho (Caçador, Chonan e Ito) ao longo dos dias após a indução floral. Os gráficos representam a evolução temporal dos seguintes parâmetros: comprimento da planta, comprimento da haste floral, diâmetro da inflorescência, diâmetro do bulbo, diâmetro da haste e número de folhas. As médias observadas foram ajustadas por modelos de regressão linear para cada cultivar, com bandas de confiança de 95% (área sombreada ao redor das linhas). Os pontos representam observações individuais.



Fonte: O autor.

Na figura 7A é apresentado o Para o crescimento médio das plantas ao longo dos dias após a diferenciação não foram observadas diferenças significativas entre as cultivares (Figura 7A). A cultivar Caçador no momento da diferenciação estava com 58,4 cm e chegou ao máximo de 81,8 cm (61 DAD). Neste estágio a cultivar já se encontrava com apenas cinco folhas verdes

e a haste em formato de “pescoço de ganso”, indicando a maturação do bulbo. Posterior a esta data observou-se redução na altura das plantas, provavelmente devido ao início da senescência da planta. A cultivar Ito iniciou com 61,5 cm e chegou a 91,4 cm (61 DAD). Neste estágio ela se encontrava com apenas quatro folhas verdes e a haste em indicativo de maturação dos bulbos, seguindo o mesmo comportamento que a cultivar anterior no 68 DAD. Já a cultivar Chonan, apresentava 54,8 cm no início da diferenciação e chegou a 81,6 cm aos 61 DAD. Ela encontrava-se com seis folhas verdes e com as hastes ainda em transição de início do aparecimento para o desenvolvimento do “duplo laço”, que antecede o ponto de indicação da maturação do bulbo. Como nos 68 DAD também houve uma redução nas medidas de comprimento, esta pode ser justificada pelo avanço na senescência das folhas. Diferente das outras duas cultivares, a cultivar Chonan ainda não se encontrava em ponto de colheita evidenciando ter um ciclo mais longo do que as outras duas cultivares.

A análise estatística indicou haver diferença estatística para a elongação da haste floral ao longo do período após a diferenciação entre as cultivares somente para os DADs 24, 31 e 44 (Figura 7B). Nestes pontos, a cultivar Caçador apresentou as maiores médias de crescimento (37,8; 44,8; 87,43 cm, respectivamente) em comparação à cultivar Chonan (11,23; 28,73; 52,53 cm, respectivamente). A cultivar Ito apresentou nos 24 e 44 DADs médias intermediárias (23,33; 74,90; cm, respectivamente). Para os 31 DAD, a cultivar apresentou média de 45,47 cm, que foi superior a cultivar Chonan. Para os demais pontos não há diferença estatística. A cultivar Caçador no início das coletas apresentou haste floral com 0,5 cm (1 DAD), tendo um pico no crescimento aos 16 DAD com 22,4 cm. Destaca-se os 31 DAD, onde a haste atingiu 44,8 cm, tornando-se visível a campo. A haste atingiu o comprimento máximo aos 54 DAD com 94,3 cm, quando a haste estava em desenvolvimento para formação do “duplo laço” antecedendo o momento do estágio do formato de “pescoço de ganso”. A cultivar Ito apresentou 0,5 cm de comprimento no início das coletas, com pico de crescimento aos 16 DAD com 16 cm. Aos 31 DAD, a haste atingiu 45,5 cm tornando-se visível a campo. Aos 61 DAD a haste atingiu o tamanho máximo de 91,4 cm de comprimento. Para a cultivar Chonan as coletas iniciaram com 0,4 cm de comprimento, com pico de crescimento aos 44 DAD com 52,5 cm, momento em que a haste se tornou visível. Aos 54 DAD, com 79,4 cm, atingiu seu comprimento máximo. A diminuição do comprimento das hastes florais das cultivares Caçador e Chonan aos 61 DAD e da cultivar Ito aos 68 DAD pode estar associado à reorganização estrutural da haste floral, que na emissão é ereta, mas que começa a se curvar levemente em espiral a medida que se desenvolve, seguida da formação de duas curvas, denominado “duplo laço” e, por fim, esticando-se formando uma curva, conhecido como “pescoço de ganso”.

O crescimento da inflorescência ao longo dos dias após a diferenciação revelou que, assim como no crescimento da haste, o desenvolvimento da inflorescência inicia-se após a diferenciação (Figura 7C). Não houve diferença estatística entre as cultivares para o diâmetro da inflorescência, exceto para os 24 e 44 DAD. Nestes pontos, a cultivar Caçador apresentou maiores médias de diâmetro da inflorescência (com 3,37 e 4,50 mm, respectivamente) em relação a cultivar Chonan, que apresentou as menores médias (1,67 e 3,37 mm, respectivamente). A cultivar Ito apresentou médias intermediárias (2,30 e 3,93 mm, respectivamente). A cultivar Caçador iniciou com diâmetro da inflorescência de 1 mm tendo o seu desenvolvimento crescente ao longo dos dias após a diferenciação, atingindo 2,9 mm aos 31 DAD, quando a haste está visível a campo, e diâmetro máximo aos 68 DAD com 7,7 mm. A cultivar Ito iniciou com diâmetro de inflorescência de 1,2 mm, 3 mm aos 31 DAD e 9,6 mm aos 68 DAD. A cultivar Chonan iniciou com 1 mm de diâmetro da inflorescência, 2,5 mm aos 31 DAD, quando a haste se tornava visível a campo, atingindo 5,9 mm de diâmetro aos 68 DAD.

O crescimento do bulbo ao longo dos dias após a diferenciação revelou que seu enchimento do bulbo só ocorreu após a diferenciação (Figura 7D). Visualmente foi possível observar tendências diferentes para as três cultivares, mas não houve diferença estatística significativa entre as cultivares. Na primeira coleta a cultivar Caçador iniciou com um diâmetro de bulbo de 11,8 mm, com crescimento contínuo ao longo dos dias, chegando aos 68 DAD com diâmetro médio de 36,5 mm. A cultivar Ito iniciou com um diâmetro médio de 12,4 mm, com crescimento contínuo ao longo dos DAD, e atingiu diâmetro médio de 34,8 mm aos 68 DAD. A cultivar Chonan iniciou com um diâmetro médio de 12,6 mm, também com crescimento contínuo ao longo dos DAD, atingindo os 68 DAD o diâmetro médio de 37,2 mm.

Para o parâmetro engrossamento da haste floral ao longo dos dias após a diferenciação, observou-se uma tendência de três retas distintas para o diâmetro da haste, mas sem diferenças estatísticas significativas entre elas (Figura 7E). No momento da primeira coleta a haste apresentava um diâmetro de 8,1 mm, 8,6 mm e 7,7 mm para as cultivares Caçador, Ito e Chonan, respectivamente. O aumento de diâmetro estabilizou aos 31 DAD com diâmetro de 11,53 mm e 11,93 mm para as cultivares Caçador e Ito, respectivamente, e aos 44 DAD com diâmetro médio de 10,86 mm para a cultivar Chonan.

Com relação ao número de folhas em relação aos dias após a diferenciação, não houve diferenças significativas entre as cultivares (Figura 7F). No momento da diferenciação, a cultivar Caçador estava com média de oito folhas emitidas. Aos 31 DAD a cultivar atingiu o

número máximo de folhas emitidas que foi 11. A cultivar Ito estava com média de 9 folhas no momento da diferenciação e aos 44 DAD também atingiu a média máxima de 11 folhas. A cultivar Chonan iniciou a diferenciação com média de oito folhas e aos 31 DAD emitiu o máximo de 11 folhas. As cultivares diferenciaram com oito a nove folhas, o que não condiz com o padrão de diferenciação estabelecido pela escala fenológica, que ocorre quando há a emissão da 12ª folha. Este fato pode ser explicado pelo efeito do fotoperíodo sobre as cultivares de alho que são extremamente afetadas por ele. As cultivares foram plantadas mais tarde, fora da janela de plantio adotado pelos produtores na região, recebendo assim estímulo de aumento no fotoperíodo com menos dias, uma vez que em julho inicia o alongamento do fotoperíodo no Sul do Brasil (Tabela 3). Além disso, segundo a experiência dos produtores de alho e de relatos da literatura científica, o alho é extremamente sensível a essas variações de fotoperíodo (Rotem *et al.*, 2007; Bem-Michael *et al.*, 2018). O equinócio da primavera, onde dia e noite têm praticamente a mesma duração, ocorreu no dia 22/09/2024, e nos dias que se seguiram foram constatadas as primeiras evidências da diferenciação das cultivares.

Tabela 3 - Estimativa do fotoperíodo mensal em Curitibanos (SC) durante o ciclo da cultura do alho em 2024.

Mês	Fotoperíodo Estimado	Data de referência	Intervalo entre uma data e outra	Observações
Junho	9h56 min	03/06/2024	-	Encurtamento dos dias antes do solstício
Julho	10h24 min	03/07/2024	30 dias	Alongamento dos dias
Agosto	11h18 min	03/08/2024	31 dias	Intensificação do fotoperíodo
Setembro	12h00 min	22/09/2024	50 dias	Equinócio de primavera
Outubro	12h40 min	03/10/2024	11 dias	Fotoperíodo em ascensão
Novembro	13h23 min	03/11/2024	31 dias	Fotoperíodo em ascensão
Dezembro	13h51 min	01/12/2024	28 dias	Fotoperíodo, próximo ao pré-solstício de verão

*Valores de fotoperíodo calculados com base na latitude de Curitibanos (SC) (27°17'16" S) e nas datas de referência ao longo do ciclo de cultivo em 2024. Os dados foram obtidos na plataforma Weather Spark.

Genótipos do gênero *Allium* frequentemente compartilham perfis estruturais e fisiológicos conservados, especialmente em cultivares comerciais, o que pode limitar a expressão diferenciada de características sob ambientes de cultivo uniformes (Benke *et al.*, 2022). Além disso, estudos como o de Chandregowda e Anjanappa (2021) demonstram que, mesmo diante da variabilidade observada nos valores médios de algumas variáveis, como número de folhas, diâmetro do bulbo ou altura da planta, essa variação pode não se traduzir em significância estatística, sobretudo quando as populações possuem histórico genético próximo ou são cultivadas sob condições de baixa pressão seletiva.

Algumas das diferenças visíveis a campo, relativas ao crescimento e desenvolvimento ao longo do ciclo das três cultivares, podem ser reflexos de estratégias fisiológicas distintas de alocação de recursos, influenciadas por fatores genéticos. A análise comparativa evidencia padrões de desenvolvimento e expressão fenotípica singulares entre os genótipos. As cv. Caçador e Ito apresentaram perfil mais acelerado, atingindo o ponto de colheita aos 143 DAP, com picos expressivos de crescimento da haste floral e expansão da inflorescência. Embora tenham iniciado a diferenciação com 8 a 9 folhas visíveis, completaram rapidamente o número máximo aos 31 DAD, comportamento compatível com cultivares de ciclo curto. A cv. Ito destacou-se pelo maior diâmetro da inflorescência ao final do ciclo, o que sugere uma estratégia reprodutiva com ênfase em expansão tardia. Em contraponto, a cv. Chonan demonstrou desenvolvimento vegetativo e reprodutivo mais lento, com ciclo fenológico prolongado (160 DAP), haste floral de menor vigor e inflorescência reduzida. A emissão foliar nessa cultivar ocorreu gradualmente ao longo dos DADs, sendo concluída apenas aos 44 dias. Esses resultados reforçam a existência de contrastes na dinâmica de crescimento entre os materiais avaliados, os quais refletem diferenças intrínsecas em suas estratégias adaptativas e fisiológicas ao longo do ciclo.

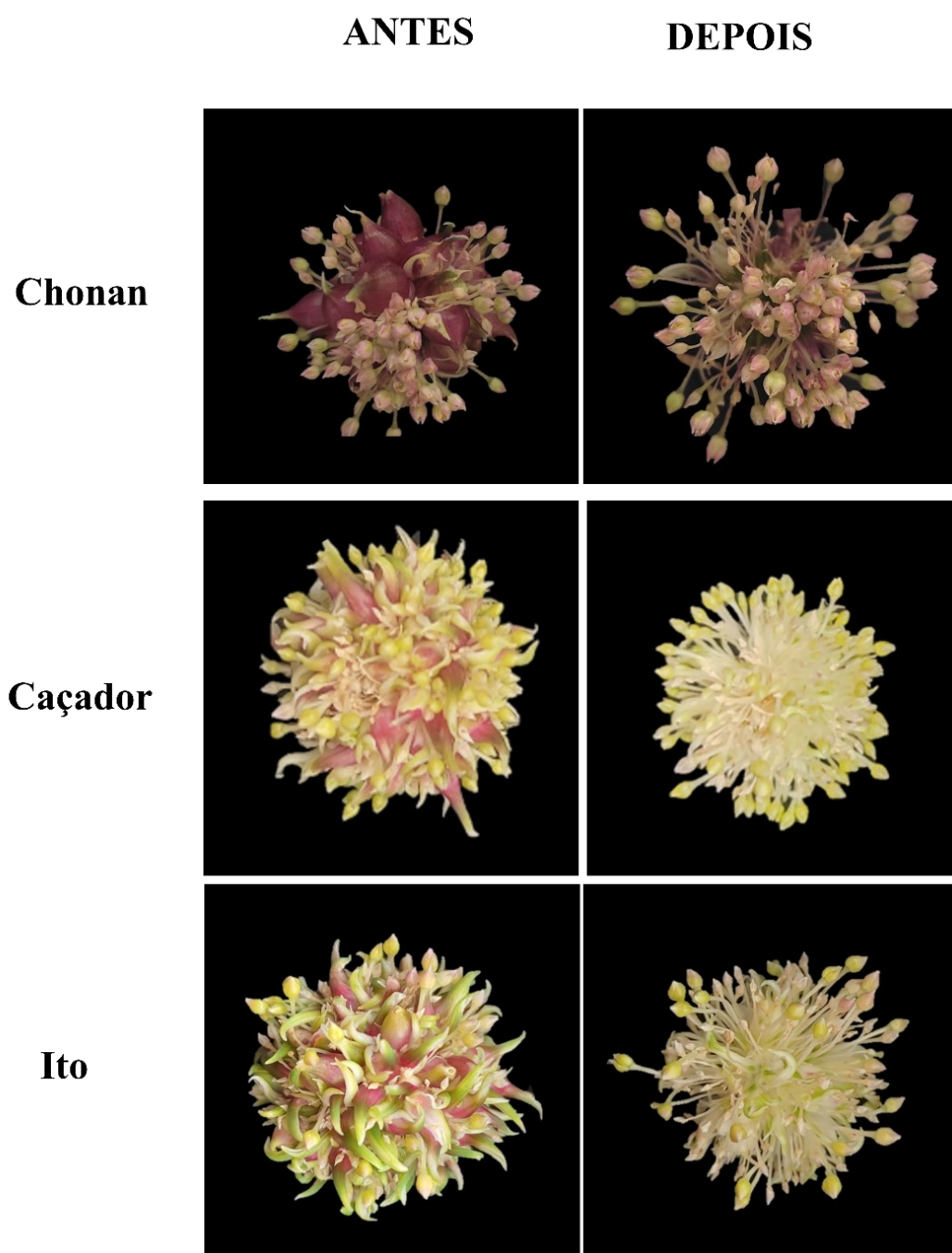
A cv. Caçador, apresentou uma maior eficiência nas fases iniciais, principalmente no alongamento floral e no aumento do diâmetro da inflorescência, o que pode estar associado à maior eficiência na transferência de assimilados para órgãos reprodutivos nestas fases. Essa característica é comumente relacionada à precocidade agrônômica e à adaptabilidade em sistemas de cultivo com ciclos reduzidos (Sönmez *et al.*, 2025; Benke *et al.*, 2022). Em contrapartida a cultivar Ito apresentou uma maior eficiência nas fases finais, principalmente para as características de alongamento da haste e aumento no diâmetro da inflorescência, sugerindo uma estratégia mais tardia de alocação reprodutiva. Essa dinâmica pode ser explicada por ajustes hormonais e moleculares relacionados ao controle do tamanho floral, conforme demonstrado por Yang *et al.* (2025), que identificaram o papel de genes ligados à síntese de

auxinas e ácido abscísico na regulação do florescimento em *Allium sativum* sob condições de estresse térmico. Esses padrões distintos de desenvolvimento indicam que os genótipos avaliados expressam trajetórias fenológicas próprias. Já a cv. Chonan apresentou um desenvolvimento mais moderado e contínuo ao longo do ciclo, evidenciando um perfil fenológico mais longo. Em comparação com as demais cultivares, Chonan demonstrou menor taxa de crescimento em variáveis-chaves como comprimento da haste floral e diâmetro da inflorescência, além de alcançar o seu ponto de maturação do bulbo em fase posterior. Estudos como os de Habuš Jercic *et al.* (2023) demonstram que ecótipos de alho adotam mecanismos morfológicos e fisiológicos distintos, como acúmulo diferencial de compostos bioativos, para lidar com variações ambientais, o que reforça o perfil adaptativo observado em Chonan. Embora as cultivares estivessem em um mesmo ambiente, o plantio de forma tardio e o manejo diferenciado, com adubação reduzida e irrigação contínua, fez com que elas adotassem comportamentos diferentes em relação ao observado em lavouras de produtores de alho na região. As cvs. Caçador e Ito encurtaram os seus ciclos, enquanto a cv. Chonan manteve o seu ciclo normal o que resultou visualmente a campo em plantas inferiores às demais cultivares no período avaliado.

Na última semana de outubro, aos 113 dias após o plantio (DAP), as cultivares iniciaram o aparecimento visível da haste floral a campo, correspondendo aos 31 DAD. Após mais 36 dias, as plantas apresentaram a haste floral com formato conhecido como “pescoço de ganso”, indicando a maturação dos bulbos, que estariam prontos para colheita, correspondendo aos 68 DAD. Aos 150 DAP iniciou-se a abertura das inflorescências com a retirada manual da espata. Nesse momento, foi implementado um túnel alto com sombrite, instalado sobre dois canteiros, com a finalidade de proteger as estruturas florais da incidência solar direta. Os bulbilhos retirados durante estas semanas, interferem no desenvolvimento das flores. Essa interferência pode estar relacionada à redistribuição de assimilados e à reorganização hormonal nas fases iniciais do florescimento. A remoção precoce ou tardia pode modular o padrão de alocação de recursos, alterando a expressão de estruturas reprodutivas e influenciando a dinâmica fenológica das cultivares (Kumari *et al.*, 2020). Aos 170 DAP as cultivares avaliadas apresentaram cerca de uma a duas folhas verdes, quando algumas doenças de final de ciclo começaram a aparecer, como a alternaria e a ferrugem. No início de janeiro de 2025 tivemos temperaturas elevadas o que resultou no secamento das hastes e abortamento das flores que estavam sob as condições de campo em recipientes com água. O ponto máximo de desenvolvimento das hastes florais obtido nas cultivares comerciais está demonstrado na Figura 9. Esta fase, mostra a transição da quarta etapa, com a intensificação da cor das anteras, mais

purpuras. Neste momento, ocorre a antese. Um dia após, inicia-se a quinta etapa, onde há o desdobramento das tépalas e estames que começam a se tornarem visíveis.

Figura 8 – Vista frontal de inflorescências das cultivares de alho Chonan, Caçador e Ito antes e após a retirada manual dos bulbilhos aéreos a campo.



Fonte: O autor.

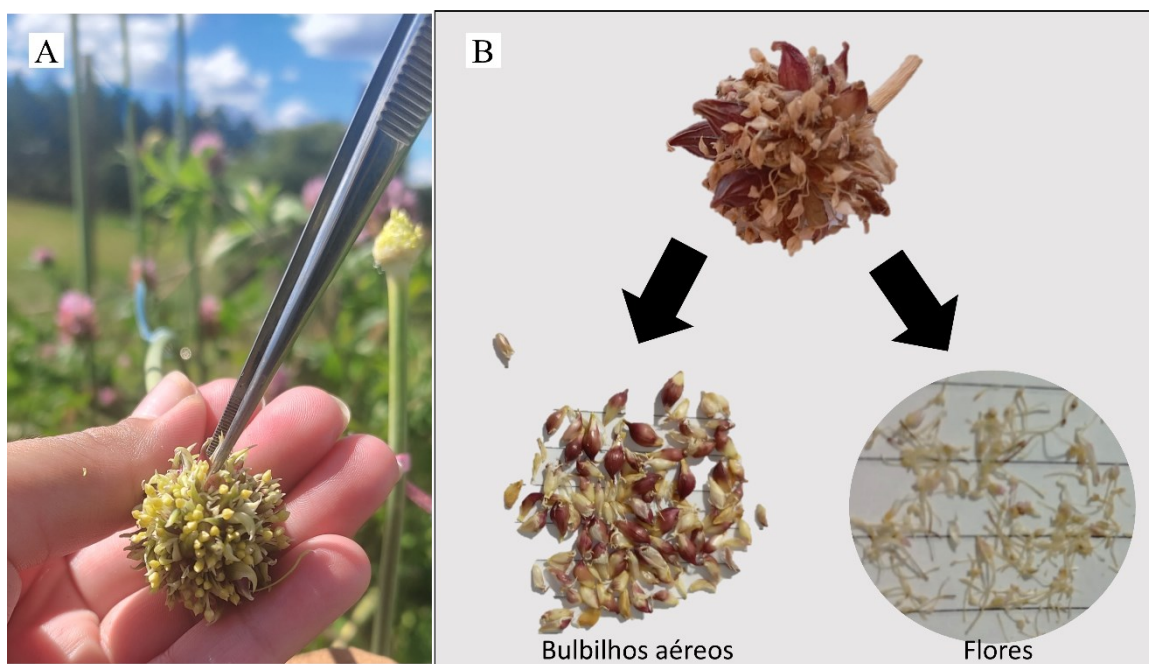
Figura 9 - Estádio máximo de desenvolvimento das flores de alho atingido pelas cultivares avaliadas entre a quarta para a quinta fase do desenvolvimento floral.



Fonte: O autor.

Na Figura 10, apresenta-se a demonstração das flores e bulbilhos contabilizados. A análise bifatorial para número médio de bulbilhos aéreos e flores formadas nas inflorescências das cultivares avaliadas estão demonstrados na Tabela 4. Para a variável número de bulbilhos, observou-se efeito significativo tanto para o fator Cultivar ($p = 0,0051$) quanto para o fator Tratamento ($p < 0,0001$). No entanto, a interação Cultivar $\times$ Tratamento não foi significativa ($p = 0,49$), indicando que os efeitos dos tratamentos sobre os bulbilhos são consistentes entre as cultivares. Para a variável número de flores, apenas o fator Tratamento apresentou efeito significativo ($p = 0,0444$), enquanto o fator Cultivar ($p = 0,7360$) e a interação entre fatores ($p = 0,4844$) não foram estatisticamente significantes. Para o fator Cultivar, a cv. Ito apresentou a maior média, com aproximadamente 163 bulbilhos formados em sua inflorescência. Em contrapartida, a cv. Chonan foi a que apresentou a menor média com aproximadamente 112 bulbilhos. A cultivar Caçador teve média de aproximadamente 143 bulbilhos, não diferindo das outras duas cultivares.

Figura 10 - A) Retirada dos bulbilhos aéreos a campo. B) Contagem dos bulbilhos aéreos e flores formadas no final do ciclo das cultivares comerciais de alho.



Fonte: O autor.

Tabela 4 - Média do número de bulbilhos e flores para as cultivares de alho Caçador, Ito e Chonan, e para os tratamentos com retirada dos bulbilhos aéreos (T1) e sem retirada dos bulbilhos aéreos (T2).

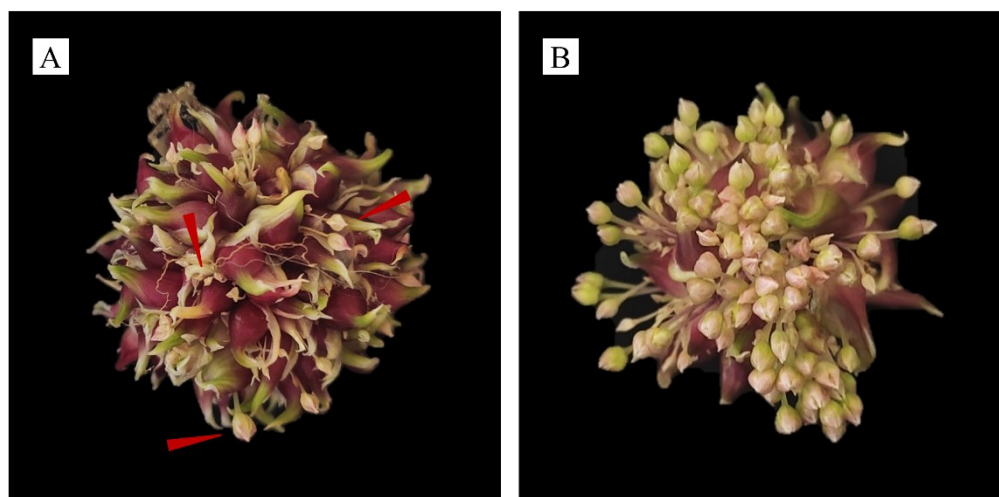
Fator	Níveis	Bulbilhos	Flores
Cultivar	Ito	163,05 a	95,7 a
	Caçador	143,35 ab	102,8 a
	Chonan	112,30 b	106,7 a
Tratamento	T1	173,43 a	87,83 b
	T2	105,70 b	116,73a

*Médias seguidas de letras diferentes na mesma coluna diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância com 10 repetições.

Para o fator tratamento, houve diferença significativa tanto para o número de bulbilhos quanto para o número de flores. O tratamento T1, com a retirada dos bulbilhos a campo, apresentou maior média de bulbilhos, com aproximadamente 173 bulbilhos ao longo do ciclo, e menor número de flores, com aproximadamente 87 flores formadas. O tratamento 2, sem a retirada de bulbilhos a campo, a média foi de aproximadamente 105 bulbilhos formados no final do ciclo e maior número de flores formadas (cerca de 116 flores). Contudo, este maior número de flores registrado no Tratamento 2 não reflete necessariamente a qualidade morfológica ou funcional dessas estruturas reprodutivas. A observação visual a campo permitiu identificar

diferenças marcantes entre os tratamentos: nos materiais que não passaram pela retirada de bulbilhos, como ilustrado na Figura 11-A, as flores apresentam distintos estádios de desenvolvimento, mas a maioria não completa sua diferenciação, evidenciando abortamento floral. As setas vermelhas sinalizam essas estruturas em diferentes estádios, reforçando a limitação reprodutiva observada. Em contrapartida, conforme demonstrado na Figura 11-B, os materiais submetidos à retirada de bulbilhos apresentam maior desenvolvimento e morfologia mais avançada das flores, com estruturas visivelmente desenvolvidas entre os bulbilhos aéreos. A maior proporção de flores com potencial de viabilidade nesse tratamento sugere que a remoção favorece a redistribuição de recursos, reduz a competição e promove condições mais favoráveis ao desenvolvimento floral completo.

Figura 11 – Vista frontal de inflorescências com o desenvolvimento das flores de alho roxo nobre. A) Inflorescência sem a retirada dos bulbilhos. B) Inflorescência com a retirada de bulbilhos.



Fonte: O autor.

Esses dados podem ser discutidos com base nas figuras 11, 13, 14 e 15 das cultivares analisadas neste trabalho. Inicialmente, durante o desenvolvimento da inflorescência — antes que ela se torne visível — observam-se estruturas primárias que se diferenciam em flores, como demonstrado nas figuras 12-C 13-B. A partir de determinado ponto do desenvolvimento, especialmente quando as hastes florais estão mais avançadas, começam a emergir meristemas secundários, cuja diferenciação tende à formação de bulbilhos aéreos. Ao realizar a retirada manual dos bulbilhos, há uma redução da pressão por recursos — especialmente espaço físico e nutrientes — sobre os primórdios florais, o que favorece o desenvolvimento pleno das flores. Por outro lado, a retirada dos bulbilhos também libera espaço para que novos meristemas secundários se desenvolvam, formando novos bulbilhos aéreos. Esse processo coincide com

condições ambientais favoráveis à bulbificação aérea, como fotoperíodos longos e temperaturas elevadas (Shemesh-Mayer; Goldstein, 2018; Bem-Michael *et al.*, 2018). Como consequência, observou-se um maior número de bulbilhos formados e um menor número de flores, efeito que pode estar diretamente relacionado à técnica de manejo, visto que muitas flores acabam sendo removidas juntamente com os bulbilhos. Como evidenciado nas figuras 12–D, bulbilhos aéreos e flores frequentemente estão conectados na mesma base estrutural, tornando difícil a separação sem perdas florais. Nos materiais em que não se realizou a retirada dos bulbilhos aéreos, os meristemas secundários formados se desenvolveram intensamente, ocupando espaço e competindo por nutrientes. Nesse cenário, as flores passam a sofrer restrição morfofisiológica e, com frequência, ocorre o abortamento floral devido ao estrangulamento das estruturas reprodutivas. Deste modo, a retirada manual dos bulbilhos aéreos é fundamental nas cultivares avaliadas.

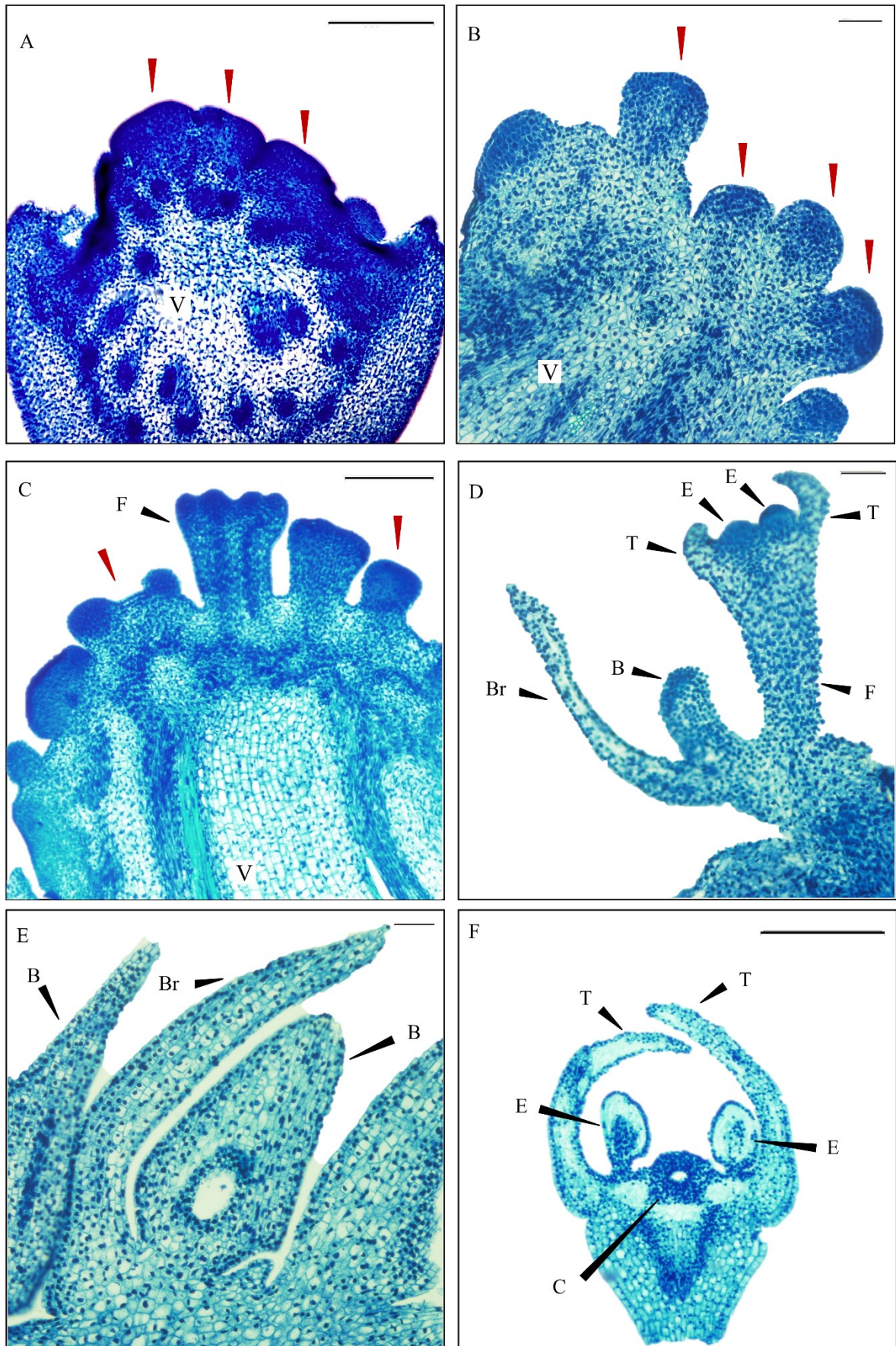
4.2 Análise das estruturas florais por microscopia de luz

Análises histológicas foram realizadas para avaliar o desenvolvimento das estruturas florais e bulbilhos aéreos em cultivares de alho roxo cultivado no Planalto Catarinense (Figura 12). Inicialmente (4 DAD), observou-se a transição do meristema vegetativo para o meristema reprodutivo (Fig. 12–A), seguida pelo surgimento dos primórdios florais e desenvolvimento do sistema vascular da inflorescência, aos 9 e 24 DAD, respectivamente (Fig. 12–B e C). No estágio intermediário (44 DAD) visualizou-se a formação de meristemas vegetativos secundários, destinados à produção de bulbilhos aéreos, posicionados entre as estruturas florais em desenvolvimento (Fig. 12–D). Na figura 12 – E, observou-se o avanço do desenvolvimento dos bulbilhos aéreos aos 61 DAD. Por fim, a Figura 12–F evidencia a consolidação da morfogênese floral (68 DAD), com diferenciação de tépalas, estames e pistilo.

Essa dinâmica reflete a complexidade na diferenciação que ocorre nas inflorescências do alho roxo, na qual estruturas vegetativas e reprodutivas se desenvolvem lado a lado, durante o desenvolvimento da inflorescência. Embora não tenha sido possível avançar até a etapa de avaliação funcional da fertilidade, devido uma onda de calor que abortou as flores, os padrões de diferenciação observados se alinham a relatos da literatura que descrevem o comportamento reprodutivo em genótipos férteis e parcialmente férteis de alho. Nestes genótipos genes relacionados com o florescimento, como o *gaLFY*, demonstram expressão elevada durante a diferenciação floral e são reprimidos nos bulbilhos vegetativos e meristemas não reprodutivos (Shemesh-Mayer *et al.*, 2015). Adicionalmente, a perda ou atenuação da capacidade reprodutiva em algumas cultivares pode estar relacionada a eventos da domesticação e a

posterior evolução da espécie em diferentes climas, associando a mutações múltiplas e extensas em todo o genoma. Segundo Shemesh-Mayer *et al.* (2023) são mudanças abrangentes na regulação genética do ciclo anual, da arquitetura da planta e das exigências ambientais que impactaram a expressão de genes associados à florogênese e na funcionalidade das estruturas florais (Kamenetsky *et al.*, 2015). Fatores epigenéticos também têm sido apontados como moduladores importantes desse comportamento. Giménez; Lampasona (2018) identificaram níveis elevados de variação epigenética em germoplasmas clonais, superiores à diversidade genética detectada por marcadores convencionais. Esses resultados contribuem para a compreensão dos caminhos morfofisiológicos predominantes nas cultivares comerciais e abrem espaço para aprofundar estudos futuros sobre o comportamento reprodutivo e a fertilidade floral das cultivares estudadas.

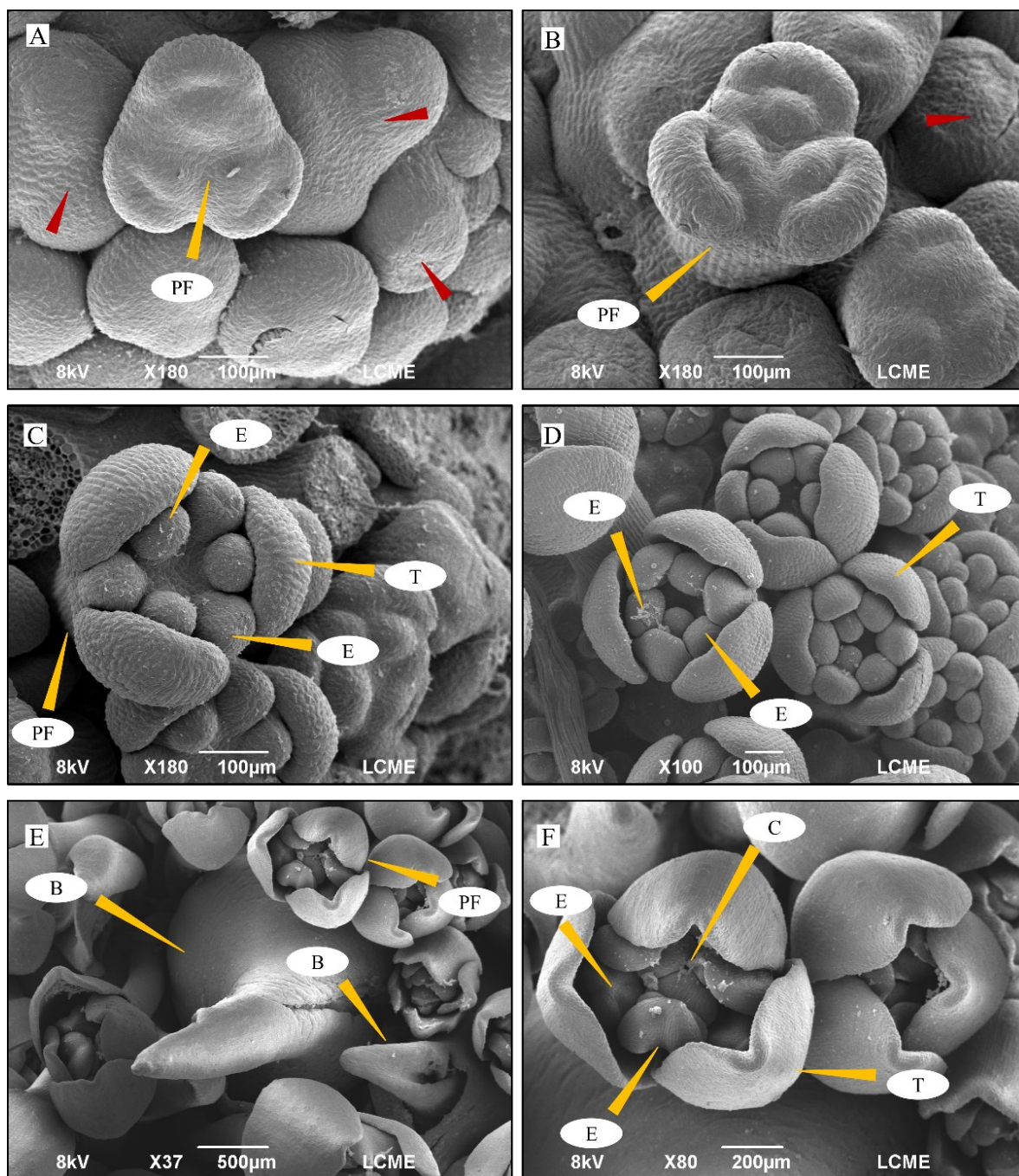
Figura 12 - Secções longitudinais de inflorescências em desenvolvimento de genótipos de alho roxo cultivados no Planalto Catarinense. As inflorescências foram amostradas entre setembro e dezembro de 2024. Estruturas identificadas: sistema vascular (V), primórdios florais (F), tépalas (T), estames (E), carpelo (C), bulbilhos aéreos (B) e brácteas (Br). **A)** Secção longitudinal do meristema apical do caule, após a transição para o estágio reprodutivo (setembro), aos 4 DAD. As setas vermelhas indicam estruturas iniciais em diferenciação. Escala = 0,2 mm. **B)** Secção longitudinal do meristema da inflorescência (início de outubro), aos 9 DAD. As estruturas destacadas pelas setas vermelhas apresentam maior desenvolvimento, e observa-se o início da organização vascular da inflorescência. Escala = 0,05 mm. **C)** Secção longitudinal da inflorescência (segunda semana de outubro) aos 24 DAD, evidenciando o avanço do sistema vascular e o início da diferenciação do primórdio floral mais antigo (F – seta), enquanto as demais estruturas seguem em desenvolvimento (setas vermelhas). Escala = 0,2 mm. **D)** Secção longitudinal do meristema da inflorescência (início de novembro) aos 44 DAD, com foco na diferenciação da estrutura floral (F) e na formação de bulbilho aéreo (B). Na flor em diferenciação, identificam-se duas tépalas laterais (T) e dois estames centrais (E) em estágio inicial de desenvolvimento. O bulbilho (B) apresenta massa central envolta por bráctea (Br) em formação. Escala = 0,05 mm. **E)** Secção longitudinal da inflorescência (final de novembro) aos 61 DAD, demonstrando o desenvolvimento das estruturas dos bulbilhos (B) e das brácteas (Br) que os revestem. Escala = 0,05 mm. **F)** Secção longitudinal de uma flor (final de novembro) aos 68 DAD. A flor encontra-se mais formada, com tépalas (T) bem desenvolvidas, estames (E) mais diferenciados e início da formação do carpelo (C). Escala = 0,2 mm.



4.3 Análises morfológicas externas por microscopia eletrônica de varredura

A Figura 13 apresenta imagens obtidas por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), que permitiram observar com alta resolução a morfologia e a sequência de diferenciação das estruturas reprodutivas em inflorescências do alho roxo. Essa abordagem revelou detalhes importantes sobre a organização dos primórdios florais, a disposição dos verticilos e a formação de estruturas vegetativas secundárias. Os registros obtidos mostram padrões compatíveis com o desenvolvimento floral descrito em genótipos férteis de *A. sativum* e outras espécies do gênero, tais como *A. cepa* e *A. oschaninii* (Jones; Emsweller, 1936; Kamenetsky; Rabinowitch, 2001; Krantal *et al.*, 1998). Observou-se que os primórdios florais se organizam em padrão helicoidal, ou seja, surgem de maneira alternada e espiralada, com diferenciação simultânea de tépalas e estames a partir de um único meristema, seguida pela formação do carpelo. A presença de bulbilhos aéreos em desenvolvimento na mesma região da inflorescência indica uma dinâmica concorrente entre vias ontogenéticas vegetativas e reprodutivas, como discutido por Takagi (1990) e Shemesh-Mayer *et al.* (2015), frequentemente associada à regulação hormonal e ao enfraquecimento da dominância apical. O conjunto dessas observações contribui para compreender os processos morfofisiológicos gerais da espécie e estabelece uma base sólida para as comparações entre as diferentes cultivares de alho roxo comerciais, apresentadas nas seções seguintes.

Figura 13 – Fotomicrografia em microscopia eletrônica de varredura de cultivares de alho roxo cultivados no Planalto Catarinense. Estruturas identificadas: primórdios florais (PF), estames (E), tépalas (T), carpelo (C) e bulbilhos aéreos (B). **A)** Diferenciação dos centros de desenvolvimento no meristema da inflorescência, com início do desenvolvimento dos primeiros primórdios florais (PF). As setas vermelhas indicam estruturas iniciais em diferenciação. **B)** Os centros de desenvolvimento do meristema tornam-se mais pronunciados, com maior número de estruturas diferenciando-se para primórdios florais. **C e D)** Desenvolvimento dos primórdios florais individuais, nos quais os verticilos externos das estruturas florais surgem primeiro. As tépalas (T) e os estames (E) se diferenciam simultaneamente a partir de um único meristema. **E)** Meristemas vegetativos desenvolvidos aparecem na região central da inflorescência, diferenciando-se rapidamente e formando pequenos bulbos — os bulbilhos aéreos (B) — em meio às flores mais desenvolvidas (PF). **F)** Flores em estágio avançado de diferenciação, com formação visível de três tépalas (T), estames (E) no interior da flor e início do desenvolvimento do carpelo (C).



Fonte: O autor.

4.4 Caracterização Integrada: Estrutura, Morfologia e Aspectos Visuais das Cultivares de Alho Roxo Testadas

Nesta seção, são apresentadas as pranchas ilustrativas (Figuras 14, 15, 16, 17 e 18), referentes à caracterização integrada das três cultivares comerciais de alho roxo e acesso 131 oriundo do banco de germoplasma da Embrapa, obtido em parceria com a Epagri Caçador. A análise contemplou aspectos estruturais, por meio das lâminas histológicas, e aspectos morfológicos externos, por meio das observações por Microscopia Eletrônica de Varredura

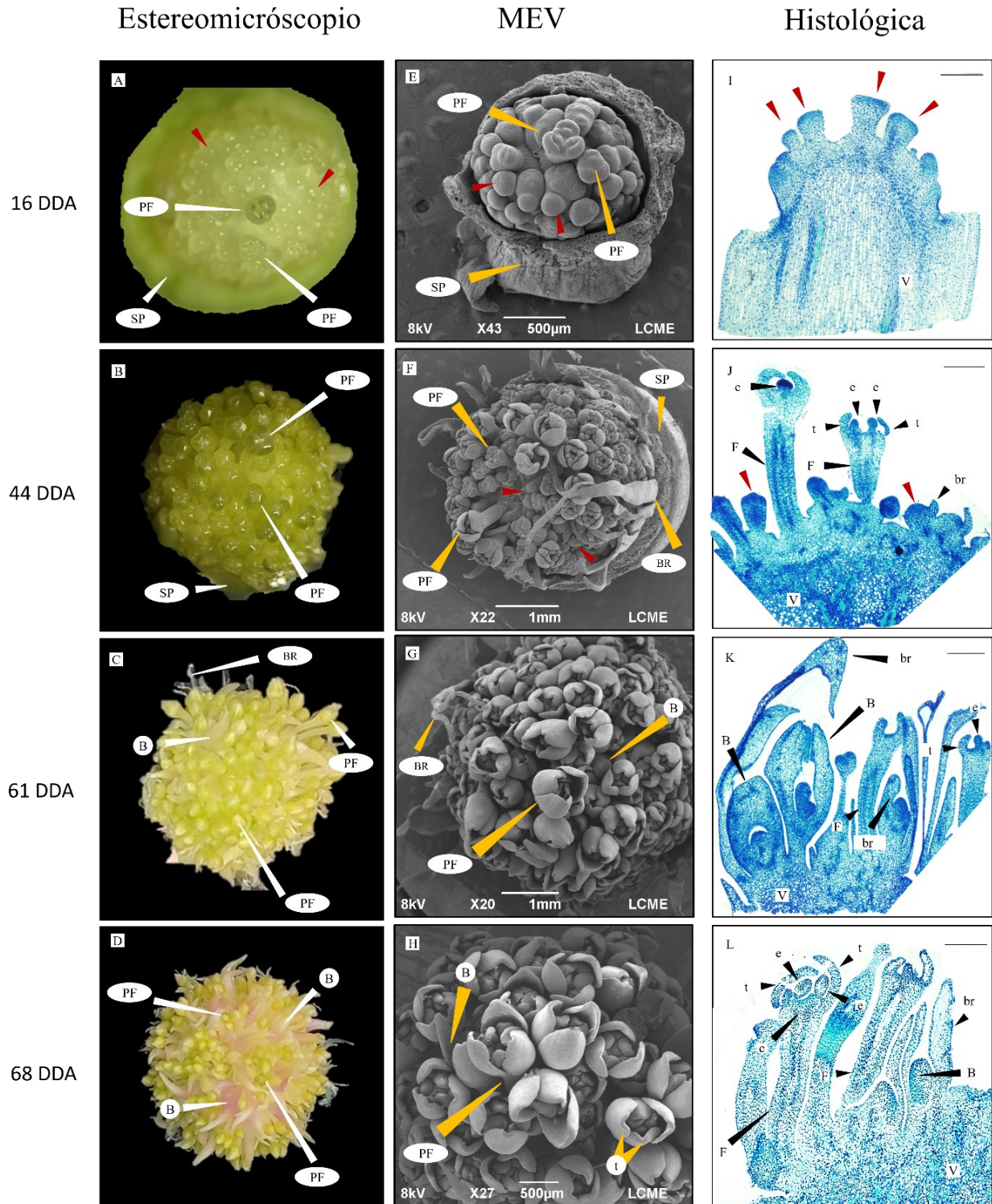
(MEV) e macroscópios em um estereomicroscópio. As coletas foram estrategicamente selecionadas para contrastar as cultivares comerciais durante o desenvolvimento das inflorescências, abrangendo os seguintes períodos: 16, 44, 61 e 68 dias após a diferenciação (DAD). Já para o acesso 131 foram realizadas apenas três coletas, devido ao baixo número de plantas, em função do reduzido número de bulbilhos disponíveis no plantio. Essa abordagem multidimensional permitiu compreender, de maneira abrangente, o processo de diferenciação reprodutiva nas inflorescências, relacionando as estruturas observadas com o estágio de desenvolvimento de cada cultivar. As pranchas apresentam, lado a lado, o desenvolvimento estrutural histológico, e morfológicos externos (MEV e estereomicroscópio) das cultivares ao longo do processo de formação da inflorescência. Essa disposição evidencia que as três abordagens de observação oferecem informações complementares para a caracterização das cultivares quanto ao desenvolvimento das estruturas florais, além de contribuírem para uma compreensão inicial do seu comportamento reprodutivo.

Durante a transição do estágio vegetativo para o reprodutivo, observou-se o rápido desenvolvimento da espata, que passa a envolver o meristema apical pouco antes da formação floral tornar-se evidente. Embora não seja visualizada diretamente nas imagens, essa estrutura encontra-se em desenvolvimento contínuo até sua remoção, realizada aos 150 dias após o plantio (DAP). As pranchas iniciam-se com registros aos 16 dias após a diferenciação floral (DAD), momento em que as cultivares apresentavam, em média, comprimento de haste floral de 16 cm para 'Ito', 22,4 cm para 'Caçador' e 7,6 cm para 'Chonan', com diâmetro do ápice em torno de 20 mm em todas as cultivares. Nesta fase, verifica-se o início da diferenciação dos primórdios florais, identificado por meio de análises histológicas, observações morfológicas externas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e por estereomicroscópio.

Figura 14 - Prancha de imagens integrando as análises estruturais histológicas, morfológicas por MEV e por estereomicroscópio da cultivar Caçador. As inflorescências foram amostradas entre setembro e dezembro de 2024. Estruturas identificadas: sistema vascular (V), primórdios florais (F ou PF), tépalas (T), estames (E), carpelo (C), bulbilhos aéreos (B), espata (SP) e brácteas (Br). As letras A, E e I, representam as amostras aos 16 DAD, sobre diferentes perspectivas, estrutural, morfológica e visual. **A)** Estrutura observada com o estereomicroscópio, evidenciando no centro os primeiros primórdios foliares e, nas setas vermelhas, estruturas em diferenciação. As letras B, F e J, representam as amostras aos 44 DAD. **E)** Início da diferenciação dos centros meristemáticos da inflorescência. Os primeiros primórdios florais (PF) tornam-se visíveis; setas vermelhas indicam estruturas iniciais em diferenciação. Escala: 0,5 mm. **I)** Secção longitudinal do meristema apical da inflorescência aos 16 dias após diferenciação floral (DAD). Observa-se sistema vascular bem desenvolvido e o início da diferenciação do primeiro primórdio foliar (F), com estruturas em diferenciação indicadas pelas setas vermelhas. Escala = 0,2 mm. **B)** Imagem ampliada por

estereomicroscópio, mostrando clara diferenciação das estruturas florais. As letras C, G e K, representam as amostras aos 61 DAD. **F)** Desenvolvimento dos primórdios florais individuais: os verticilos externos surgem primeiro; tépalas e estames se diferenciam simultaneamente a partir do mesmo meristema. Escala: 1 mm. **J)** Secção longitudinal do meristema da inflorescência aos 44 DAD. Identificam-se flores em diferenciação, com tépalas laterais (T), estames centrais (E) e carpelos (c) em estágio inicial. A seta vermelha destaca massa central envolta por bráctea (Br) em formação. A seta verde indica que houve uma quebra das estruturas durante a preparação para análise de microscopia. **C)** Vista a campo: desenvolvimento simultâneo de flores e bulbilhos aéreos. As letras D, H e L, representam as amostras aos 68 DAD. **G)** Primórdios florais mais desenvolvidos, com visibilidade restrita às tépalas. Escala: 1 mm. **K)** Secção longitudinal aos 61 DAD. Há diferenciação simultânea de flores e bulbilhos. Observam-se tépalas (T), estames (E) e carpelos (c) em diferentes estádios, além do desenvolvimento de bulbilhos (B) próximos ao meristema, envoltos por brácteas (Br). Escala = 0,2 mm. **D)** Vista a campo: estágio avançado de desenvolvimento das flores na inflorescência e progresso acentuado na formação dos bulbilhos aéreos. **H)** Meristemas vegetativos diferenciando-se rapidamente na extremidade da inflorescência, formando bulbilhos aéreos (B), entre flores mais desenvolvidas (PF). Escala: 0,5 mm. **L)** Secção longitudinal aos 68 DAD. As estruturas apresentam estádios mais avançados de formação, com bulbilho aéreo (B) formados, próximo ao meristema da inflorescência. As estruturas florais seguem diferenciadas, com tépalas (T), estames (E) e carpelos (c) evidentes. Escala = 0,2 mm.

CAÇADOR



Fonte: O autor.

Em alho o alongamento inicial da haste floral precede a expansão do meristema floral, sendo que a diferenciação dos primórdios florais ocorre somente após a haste atingir entre 5 e 7 mm de comprimento (Kamenetsky; Rabinowitch, 2001). No presente estudo, as cultivares 'Caçador' e 'Ito' apresentaram-se mais adiantadas em relação ao seu desenvolvimento e ciclo

reprodutivo nesse estágio, como evidenciado nas Figuras 14 e 15 – A, E e I, onde se observou um avanço maior na diferenciação dos primórdios florais em comparação à cultivar 'Chonan', coletada no mesmo tempo. É provável que a diferenciação do meristema em primórdios florais tenha ocorrido um pouco antes, entre os 9 e 16 DAD, para as cultivares 'Caçador' e 'Ito'. Por outro lado, a cultivar 'Chonan', conforme demonstrado na Figura 16 – A, E e I, encontra-se ainda no início do processo de diferenciação floral, com o comprimento da haste floral condizente com o descrito na literatura. Este comportamento sugere que 'Chonan' possui um ciclo fenológico mais longo em comparação com as demais cultivares avaliadas.

Aos 44 dias após a diferenciação floral (DAD), observaram-se evidências claras da diferenciação das flores individuais (Figura 14, 15, 16 – B, F e J; 17 – C, F e I). Neste estágio, os materiais analisados encontram-se no terceiro estágio da florogênese — a diferenciação da inflorescência — conforme descrito por Kamenetsky e Rabinowitch (2002). De acordo com a literatura, o meristema apical passa a se subdividir em múltiplas protuberâncias, que originam os primórdios florais individuais (Kamenetsky; Rabinowitch, 2001). O crescimento da inflorescência é acompanhado pelo aumento no número de primórdios florais. Segundo os autores, a diferenciação floral se inicia quando a inflorescência atinge entre 2 e 3 mm de diâmetro. A diferenciação dos órgãos florais ocorre inicialmente nos primórdios mais antigos, enquanto os mais jovens ainda se apresentam como domos meristemáticas indiferenciados — fenômeno já descrito em outras espécies do gênero *Allium* (Kamenetsky, 1997; Krontal *et al.*, 1998). No presente estudo, aos 44 DAD, verificou-se que as inflorescências atingiram cerca de 4 mm de diâmetro, valor compatível com os relatos da literatura.

Aos 61 e 68 dias após a diferenciação (DAD), foi possível observar o desenvolvimento das tépalas e estames, indicando o avanço morfogenético das inflorescências. Em algumas imagens, notou-se a diferenciação dos verticilos internos, com a formação inicial dos carpelos, visualizados na disposição arqueada das tépalas sobre os estames. De acordo com Jones e Emsweller (1936), Esau (1965) e De Mason (1990), tépala e estame se originam simultaneamente a partir de um único primórdio floral, destacando a sincronia do desenvolvimento floral. Uma etapa relevante da formação da inflorescência, descrita por Kamenetsky e Rabinowitch (2001), é o alongamento do pedicelo floral, o que confere à inflorescência uma forma esférica. Esse alongamento ocorre normalmente quando a haste floral atinge cerca de 15 cm de comprimento. No presente estudo, tal estrutura foi identificada aos 44 DAD para as cultivares Ito e Caçador, e somente a partir dos 61 DAD na cultivar Chonan. Esse processo também origina o "bico" da espata, típico das cultivares de alho, consequência da alongação da haste.

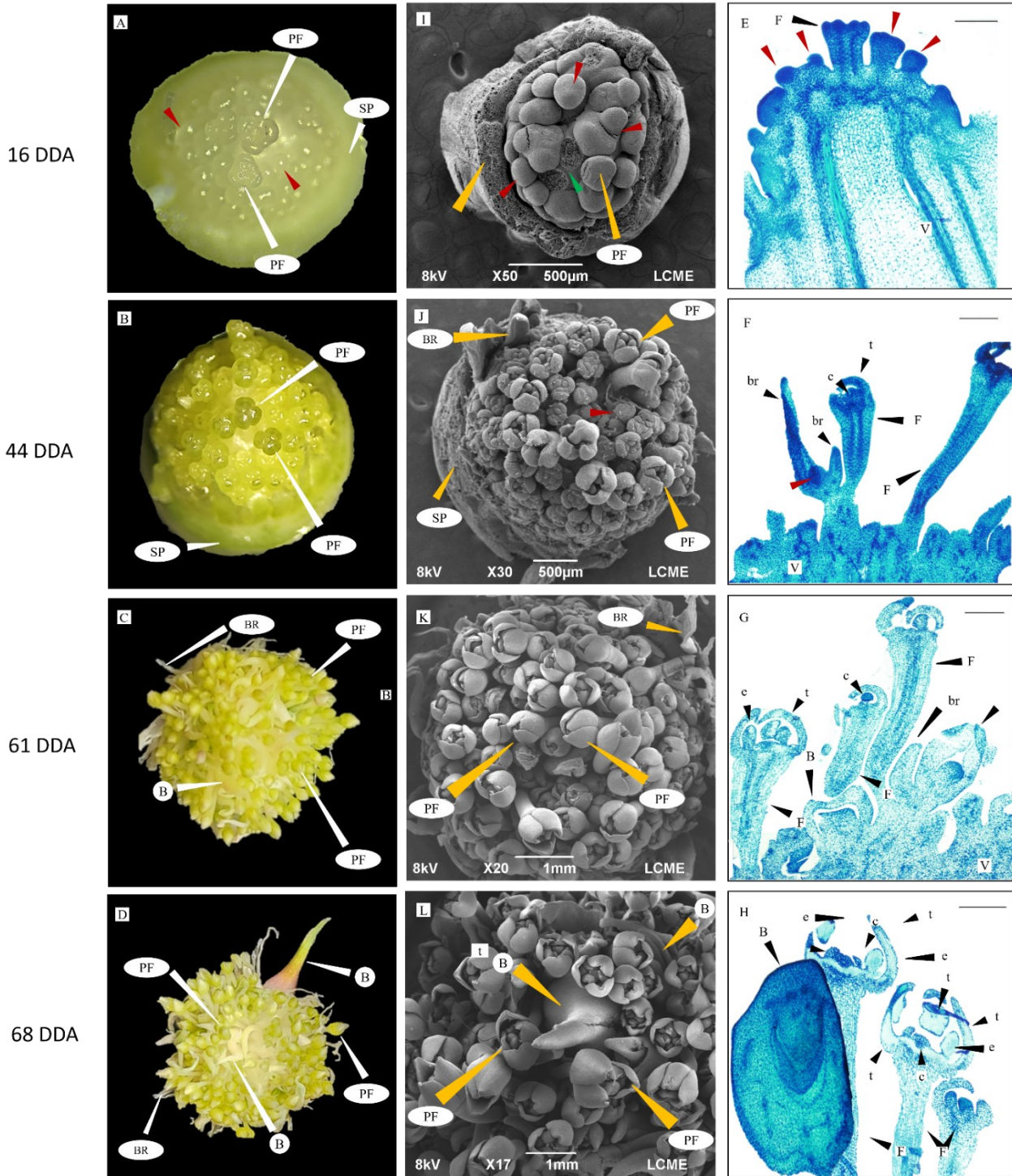
Figura 15 – Prancha de imagens integrando as análises estruturais histológicas, morfológicas por MEV e por estereomicroscópio da cultivar Ito. As inflorescências foram amostradas entre setembro e dezembro de 2024. Estruturas identificadas: sistema vascular (V), primórdios florais (F ou PF), tépalas (T), estames (E), carpelo (C), bulbilhos aéreos (B), espata (SP) e brácteas (Br). As letras A, E e I, representam as amostras aos 16 DAD, sobre diferentes perspectivas, estrutural, morfológica e visual. **A)** As estruturas observadas com estereomicroscópio, evidenciam no centro os primeiros primórdios florais e, nas setas vermelhas, estruturas em diferenciação. As letras B, F e J, representam as amostras aos 44 DAD. **E)** Análise morfológica das estruturas, mostrando o início da diferenciação dos centros meristemáticos da inflorescência. Os primeiros primórdios florais (PF) tornam-se visíveis; setas vermelhas indicam estruturas iniciais em diferenciação. Escala: 0,5 mm. **I)** Secção longitudinal do meristema apical da inflorescência aos 16 dias após diferenciação floral (DAD). Observa-se sistema vascular bem desenvolvido e, no centro, o início da diferenciação do primeiro primórdio floral (F), com estruturas em diferenciação indicadas pelas setas vermelhas. Escala = 0,2 mm. **B)** Imagem ampliada por estereomicroscópio, mostrando clara diferenciação das estruturas florais. As letras C, G e K, representam as amostras aos 61 DAD. **F)** Desenvolvimento dos primórdios florais individuais: os verticilos externos surgem primeiro; tépalas e estames se diferenciam simultaneamente a partir do mesmo meristema. Escala: 0,5 mm. **J)** Secção longitudinal do meristema da inflorescência aos 44 DAD. Identificam-se flores em diferenciação, com tépalas laterais (T), estames centrais (E) e carpelos (c) em estágio inicial. A seta vermelha destaca massa central envolta por bráctea (Br) em formação. Escala = 0,2 mm. **C)** Vista a campo: desenvolvimento simultâneo de flores e bulbilhos aéreos. As letras D, H e L, representam as amostras aos 68 DAD. **G)** Primórdios florais mais desenvolvidos, com visibilidade restrita às tépalas. Escala: 1 mm. **K)** Secção longitudinal aos 61 DAD. Há diferenciação simultânea de flores e bulbilhos. Observam-se tépalas (T), estames (E) e carpelos (C) em diferentes estádios, além do desenvolvimento de bulbilhos (B) próximos ao meristema, envoltos por brácteas (Br). Escala = 0,2 mm. **D)** Vista a campo: estágio avançado de desenvolvimento das flores na inflorescência e progresso acentuado na formação dos bulbilhos aéreos. **H)** Meristemas vegetativos diferenciando-se rapidamente na região central da inflorescência, formando bulbilhos aéreos (B), entre flores mais desenvolvidas (PF). Escala: 1 mm. **L)** Secção longitudinal aos 68 DAD. As estruturas apresentam estádios mais avançados de formação, com bulbilho aéreo (B) bem definido. As flores seguem diferenciadas, com tépalas (T), estames (E) e carpelos (c) evidentes. Escala = 0,2 mm

ITO

Estereomicroscópio

MEV

Histológica



Fonte: O autor.

Outro componente importante observado durante o processo foi o surgimento das brácteas, estruturas mais visíveis nos estádios avançados e que apresentaram variações entre

genótipos. Nas cultivares comerciais (Caçador, Ito e Chonan), as brácteas foram menos expressivas quando comparadas ao acesso 131, o qual apresentou brácteas bem distribuídas por toda a periferia da inflorescência. Nos genótipos com emissão de haste floral, a formação da inflorescência está interligada ao desenvolvimento dos dentes do bulbo. Segundo Takagi (1990) e Pooler e Simon (1994), esse processo está associado à quebra da dominância apical, induzida pela iniciação floral, o que favorece a formação de brotos axilares e bulbilhos aéreos, fenômeno relacionado a alterações hormonais que regulam a diferenciação de meristemas secundários.

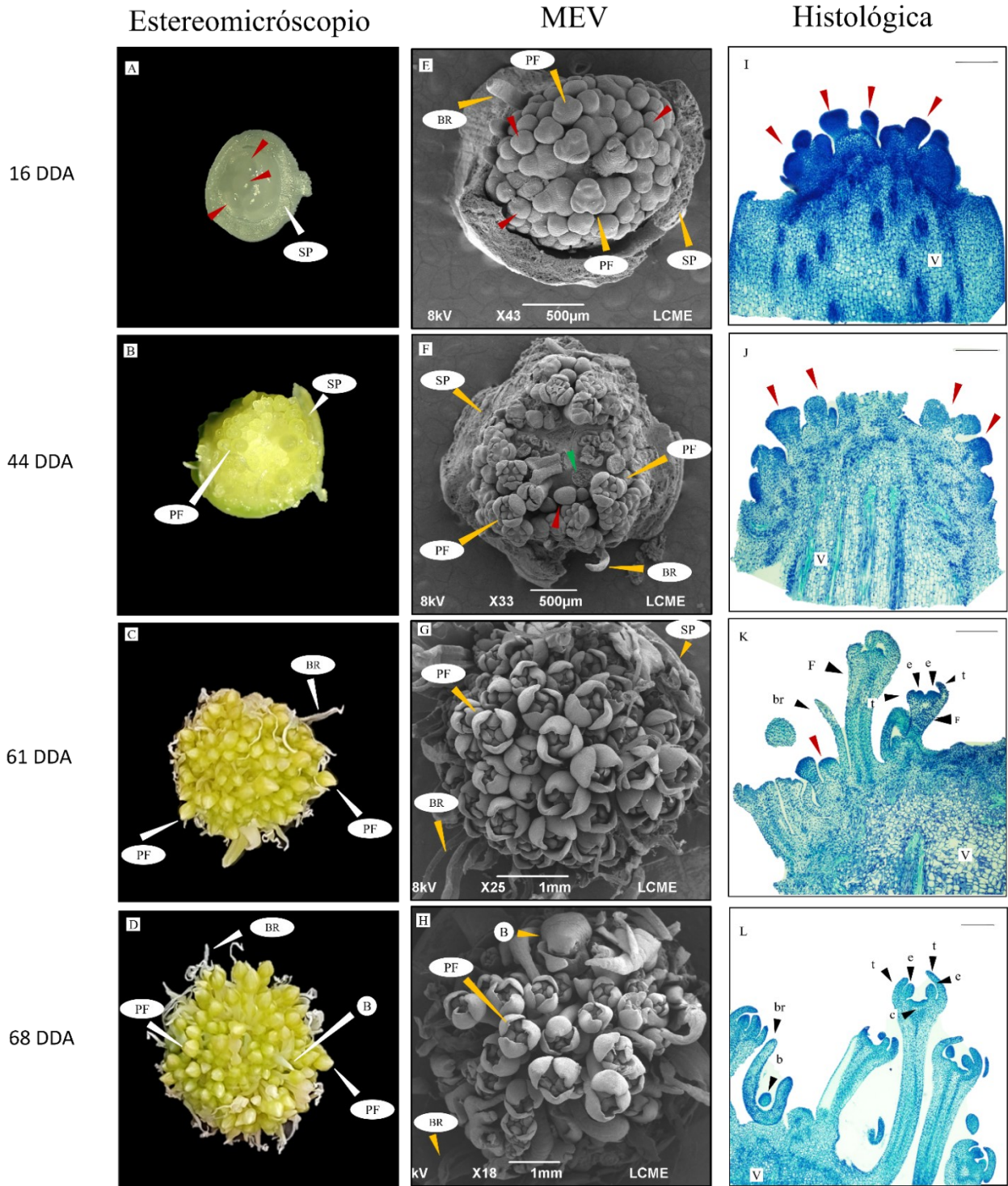
O ponto de abertura da espata foi previamente definido por testes e realizado manualmente aos 68 DAD para as cultivares Caçador e Ito. Nessa ocasião, as hastes florais atingiram 91,4 cm (Caçador), 85,7 cm (Ito). Na cultivar Chonan ocorreu a abertura da espata aos 78 DAD, momento em que os materiais atingiram o ponto de maturação do bulbo. Segundo Kamenetsky e Rabinowitch (2001), a formação floral de bulbilhos aéreos está praticamente concluída quando a haste atinge cerca de 30 cm, sendo a abertura natural da espata esperada entre 35 e 50 cm. Apesar disso, no presente estudo, as flores ainda se encontravam em fase inicial de desenvolvimento, com início de pigmentação rosada nas tépalas, indicando que estavam na transição entre o primeiro e o segundo estágio de desenvolvimento floral. Em contrapartida, os bulbilhos aéreos já apresentavam crescimento acelerado após a abertura da espata, o que sugere uma diferenciação floral retardada nas cultivares avaliadas, em relação ao esperado na literatura.

A literatura considera a flor praticamente formada na quarta fase, próxima à antese, quando ocorre a abertura total das tépalas e exposição das anteras. Nas cultivares comerciais, esse estágio foi observado entre 100 e 110 DAD, com coloração arroxeada das anteras. Ainda que as flores fossem visíveis a olho nu, o rápido crescimento dos bulbilhos frequentemente causou a compressão e degeneração das flores jovens. Estudos anteriores apontam que a remoção contínua dos bulbilhos aéreos pode permitir o pleno desenvolvimento floral, favorecendo a polinização e formação de sementes (Koul; Gohil, 1970; Konvicka, 1984; Etoh *et al.*, 1988; Pooler; Simon, 1994).

Figura 16 – Prancha de imagens integrando as análises estruturais histológicas, morfológicas por MEV e por estereomicroscópio da cultivar Chonan. As inflorescências foram amostradas entre setembro e dezembro de 2024. Estruturas identificadas: sistema vascular (V), primórdios florais (F ou PF), tépalas (T), estames (E), carpelo (C), bulbilhos aéreos (B), espata (SP) e brácteas (Br). As letras A, E e I, representam as amostras aos 16 DAD, sobre diferentes perspectivas, estrutural, morfológica e visual. **A)** Estrutura observada com estereomicroscópio, evidenciando, nas setas vermelhas, estruturas no início da sua diferenciação. As letras B, F e J, representam as amostras aos 44 DAD. **E)** Início da diferenciação dos centros

meristemáticos da inflorescência. Os primeiros primórdios florais (PF) tornam-se visíveis; setas vermelhas indicam estruturas iniciais em diferenciação. **I)** Secção longitudinal do meristema apical da inflorescência aos 16 dias após diferenciação floral (DAD). Observa-se sistema vascular bem desenvolvido e o início da diferenciação com estruturas em diferenciação indicadas pelas setas vermelhas. Escala = 0,2 mm. **B)** Imagem ampliada por estereomicroscópio, mostrando clara diferenciação das estruturas florais. As letras C, G e K, representam as amostras aos 61 DAD. **F)** Desenvolvimento dos primórdios florais individuais: os verticilos externos surgem primeiro; tépalas e estames se diferenciam simultaneamente a partir do mesmo meristema. A seta verde indica que houve uma quebra das estruturas durante a preparação para análise de microscopia. **J)** Secção longitudinal do meristema da inflorescência aos 44 DAD. Início da diferenciação do primeiro primórdio foliar (F), com estruturas em diferenciação indicadas pelas setas vermelhas. Escala = 0,2 mm. **C)** Vista a campo: desenvolvimento das flores sem apresentar bulbilhos aéreos. As letras D, H e L, representam as amostras aos 68 DAD. **G)** Primórdios florais mais desenvolvidos, com visibilidade restrita às tépalas. **K)** Secção longitudinal aos 61 DAD. Identificam-se flores em diferenciação, com tépalas laterais (T), estames centrais (E) e carpelos (c) em estágio inicial. A seta vermelha destaca massa central envolta por bráctea (Br) em formação. Escala = 0,2 mm. **D)** Vista a campo: estágio avançado de desenvolvimento das flores na inflorescência e progresso acentuado na formação dos bulbilhos aéreos nas extremidades da inflorescência. **H)** Meristemas vegetativos diferenciando-se rapidamente na extremidade da inflorescência, formando bulbilhos aéreos (B), entre flores mais desenvolvidas (PF). **L)** Secção longitudinal aos 68 DAD. Há diferenciação simultânea de flores e bulbilhos. Observam-se tépalas (T), estames (E) e carpelos (c) em diferentes estádios, além do desenvolvimento de bulbilhos (B) próximos ao meristema, envoltos por brácteas (Br). Escala = 0.2 mm.

CHONAN



Fonte: O autor.

O acesso 131 (Figuras 17 e 18) apresenta maior similaridade com os dados descritos por Kamenetsky e Rabinowitch (2001), com o desenvolvimento das estruturas florais e vegetativas da inflorescência praticamente concluído antes mesmo da haste floral tornar-se visível a olho nu. Este material foi plantado no mesmo dia em que as demais cultivares

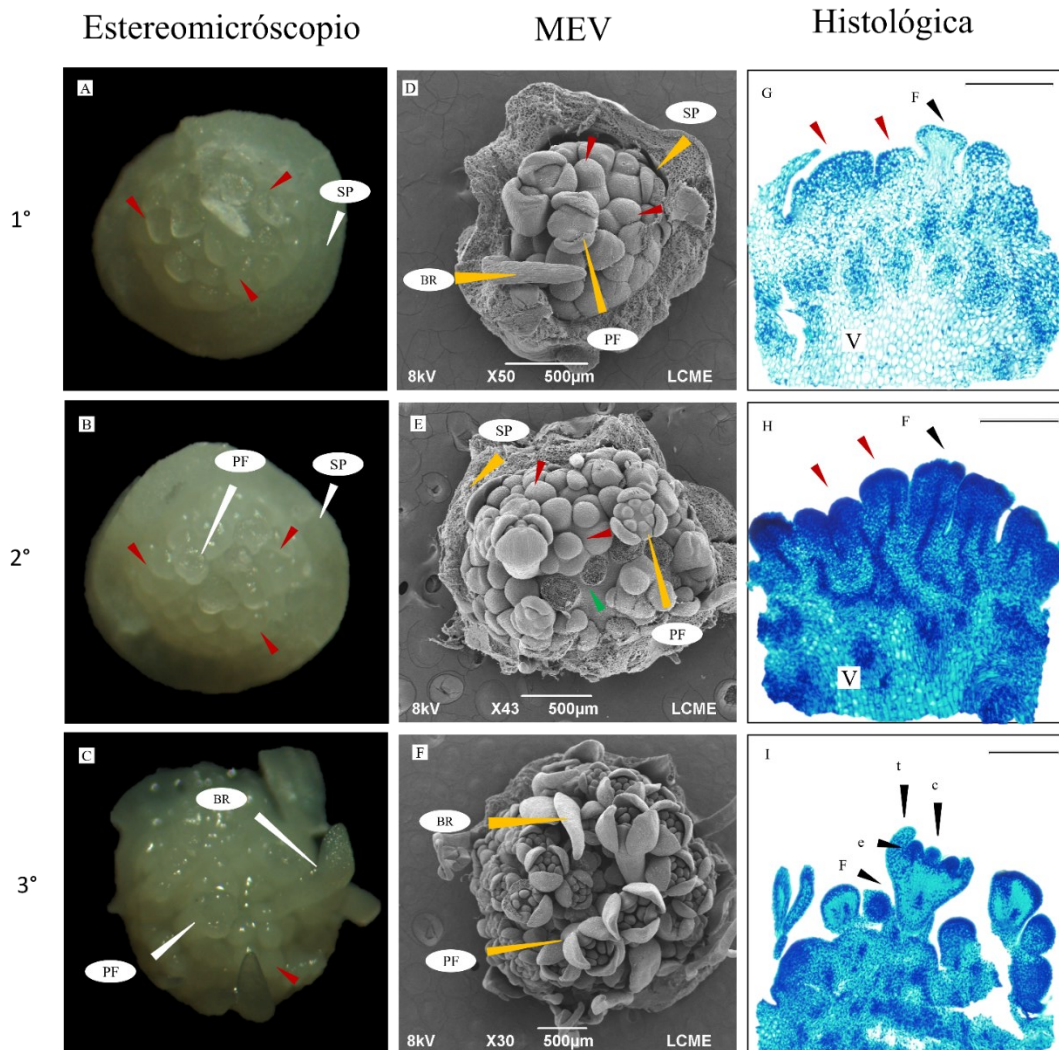
comerciais, mas só diferenciou após os 120 DAP, e suas flores estavam visíveis a campo com mais de 210 DAP. Além disso, este acesso não necessita de manipulação, como a abertura da espata e a retirada dos bulbilhos aéreos, para o desenvolvimento das flores. Como apresentado na Figura 18–A, o acesso 131 forma bulbilhos aéreos entre as flores individuais, que estão em estágio de desenvolvimento mais avançado que o observado nas cultivares comerciais analisadas. Mesmo sem a retirada dos bulbilhos aéreos, o acesso conclui o seu ciclo com o desenvolvimento de todos os estágios florais, como demonstrado na Figura 18–B. Nas flores podem ser observadas tépalas, estames e o estigma bem formados nas análises morfológicas por microscopia eletrônica de varredura. Durante o desenvolvimento, foi possível visualizar a diferenciação de seis estruturas (Figura 17-E) relacionadas à formação dos estames; contudo, na flor já formada, observam-se apenas quatro estames (Figura 18-B), indicando a necessidade de uma avaliação mais aprofundada do processo de desenvolvimento floral. Ainda assim, ressalta-se que esse acesso necessita de mais estudos, com maior número de repetições e coletas, para que possa ser considerado um comparativo mais robusto de desenvolvimento frente às cultivares comerciais avaliadas.

Apesar dos avanços obtidos na caracterização morfológica do desenvolvimento floral nas cultivares analisadas, este trabalho não contemplou análises específicas de viabilidade reprodutiva, como testes de germinação polínica ou receptividade estigmática. O acompanhamento fenológico permitiu observar estruturas florais visivelmente formadas e, em alguns casos, indicativos de abortamento floral; contudo, não foi possível confirmar a fertilidade funcional das flores. Diante disso, não se pode descartar a existência de barreiras reprodutivas, como esterilidade masculina, feminina ou funcional, fenômenos já descritos em variedades de alho submetidas à domesticação intensiva (Kamenetsky *et al.*, 2012; Shemesh-Mayer *et al.*, 2013). Assim, a possibilidade de esterilidade das flores permanece em aberto e representa uma perspectiva relevante para estudos futuros que visem compreender os mecanismos genéticos e fisiológicos que limitam a reprodução sexual em *Allium sativum*.

Figura 17 - Prancha de imagens integrando as análises estruturais histológicas, morfológicas por MEV do acesso 131. Estruturas identificadas: sistema vascular (V), primórdios florais (F ou PF), tépalas (T), estames (E), carpelo (C), bulbilhos aéreos (B), espata (SP) e brácteas (Br). **A)** Visualização em estereomicroscópio dos meristemas em diferenciação, indicado pelas setas vermelhas. **D)** Início da diferenciação dos centros meristemáticos da inflorescência. Os primeiros primórdios florais (PF) tornam-se visíveis; setas vermelhas indicam estruturas iniciais em diferenciação. Escala: 0,5 mm. **G)** Seção longitudinal do meristema apical da inflorescência dias após a diferenciação. Observa-se o início da diferenciação dos primórdios foliares, com estruturas em diferenciação indicadas pelas setas vermelhas. Escala = 0,2 mm. **B)** Visualização em estereomicroscópio onde é possível

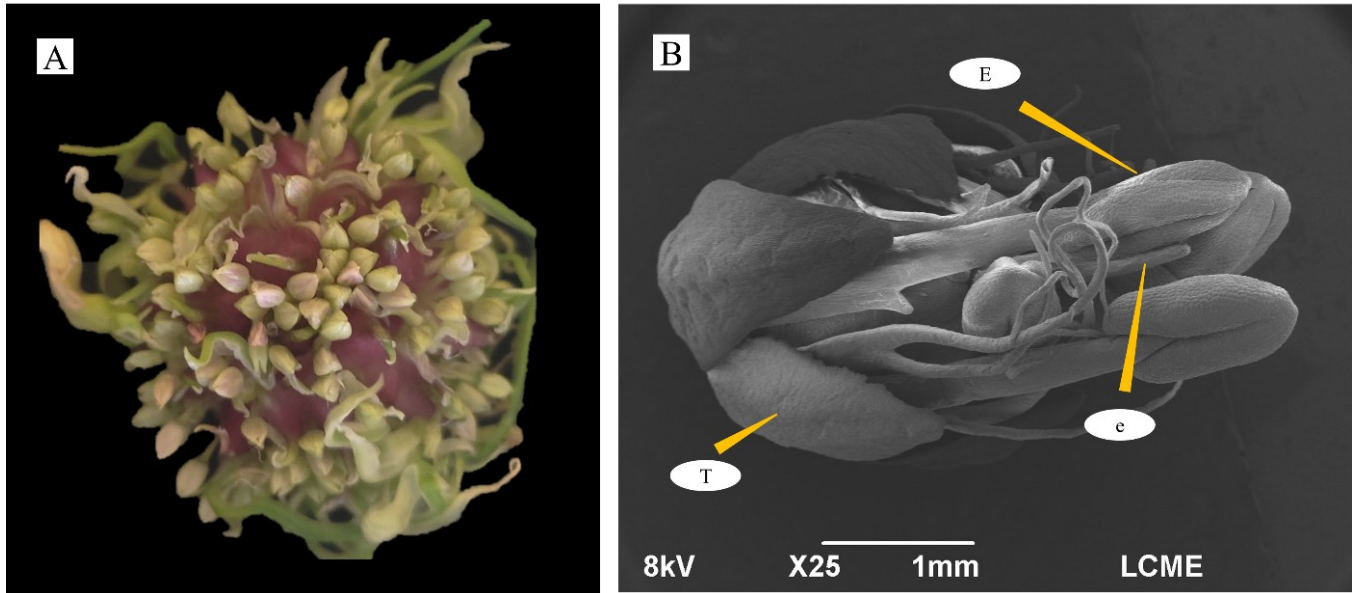
visualizar os primeiros primórdios florais diferenciados, e a seta vermelha indicando meristemas em processo de diferenciação. **E)** Desenvolvimento dos primórdios florais individuais: os verticilos externos surgem primeiro; tépalas e estames se diferenciam simultaneamente a partir do mesmo meristema. A seta verde indica que houve uma quebra das estruturas durante a preparação para análise de microscopia. Escala: 0,5 mm **H)** Seção longitudinal do meristema da inflorescência uma semana depois da diferenciação. Observa-se o início da diferenciação dos primórdios foliares, com estruturas em diferenciação indicadas pelas setas vermelhas. Escala = 0,2 mm. **C)** Visualização em estereomicroscópio, estágio mais avançado do desenvolvimento floral, mas ainda no início da diferenciação. Disposição de brácteas (Br) em toda a extensão da espata (SP). **F)** Primórdios florais mais desenvolvidos, com visibilidade das tépalas e estames, sem apresentar desenvolvimento de bulbilhos. Escala: 0,5 mm. **I)** Seção longitudinal no meio do ciclo da cultivar, antes da haste estar visível. Identificam-se flores em diferenciação, com tépalas laterais (T), estames centrais (E) e carpelos (c) em estágio inicial. Escala = 0,2 mm.

Acesso 131



Fonte: O autor.

Figura 18 – A) Vista frontal do acesso 131 por estereomicroscópio demonstrando a formação de bulbilhos aéreos e flores lado a lado, sem a interferência humana. B) Microscopia eletrônica de varredura (MEV) mostrando uma flor bem desenvolvida do acesso 131, onde é possível visualizar as tépalas (T), a estrutura de quatro estames (E) e a formação do estigma (e) no centro.



Fonte: O autor.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho permitiu a caracterização da estrutura e morfologia floral de cultivares comerciais de alho roxo cultivadas no Planalto Catarinense, evidenciando que, mesmo propagadas exclusivamente por via assexuada, tais cultivares mantêm potencial de florescimento. A integração entre análises fenológicas, histológicas, morfológicas por MEV e por estereomicroscópio demonstrou que os genótipos avaliados compartilham padrões de diferenciação floral semelhantes aos descritos em cultivares férteis.

Entre os materiais estudados, o acesso 131 destacou-se pela morfogênese floral avançada ainda antes da emissão visível da haste, desenvolvendo espontaneamente flores viáveis, mesmo na presença de bulbilhos aéreos. Essa singularidade o posiciona como material estratégico para estudos futuros sobre restauração da fertilidade em genótipos clonais. Ainda assim, o acesso 131 e as cultivares comerciais apresentaram o desenvolvimento das mesmas estruturas florais. Entretanto o acesso não necessita de nenhum manejo para concluir o seu ciclo reprodutivo, chegando até o ponto de senescência das suas flores. As cultivares comerciais necessitam de intervenção para que haja uma produção expressiva de flores sobre a formação de bulbilhos aéreos, mas são cultivares que priorizam o ciclo para maturação dos bulbos, o que torna difícil a sua manutenção a campo após os 150 DAP, onde qualquer estresse leva a translocação dos recursos e ao abortamento das flores.

Os dados obtidos consolidam a hipótese de que cultivares comerciais de alho roxo podem reunir condições estruturais, morfológicas e fisiológicas para retomar o ciclo reprodutivo completo, indicando que ainda existem traços férteis preservados nesses clones. Com isso, a pesquisa contribui para abrir caminho a estratégias futuras de manejo reprodutivo e programas de melhoramento genético, visando à ampliação da variabilidade adaptativa do alho no Brasil. No entanto, reforça-se a necessidade da continuidade dos estudos, para verificar se as estruturas formadas são viáveis e permitem a formação de sementes biológicas.

Por fim, apesar da morfologia floral bem definida, a ausência de testes específicos de funcionalidade reprodutiva, como germinação de pólen e receptividade estigmática, impede conclusões sobre a viabilidade fértil das flores. Assim, recomenda-se a continuidade de estudos com foco em mecanismos genéticos, hormonais e epigenéticos que modulam a florogênese e a fertilidade funcional dos genótipos avaliados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AKAN, Serkan; KARAKAN, Fatma Yildiz; HORZUM, Osman. Differential response of softneck and hardneck garlic ecotypes to quality attributes for long-term storage. **Emirates Journal of Food and Agriculture**, v. 35, n. 4, p. 346–357, 2022.
- ALEXANDER, Melvin Philip A versatile stain for pollen. **Stain Technology**, v. 55, n. 1, p. 13–18, 1980.
- ANAPA – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DOS PRODUTORES DE ALHO. **Anapa visita ESALQ/USP para acompanhar projeto de mutagênese no alho**. 2023. Disponível em: <https://anapa.com.br/anapa-visita-esalq-usp-para-acompanhar-projeto-de-mutageneses-no-alho/>. Acesso em: 6 jul. 2025.
- AOBA, Takashi; TAKAGI, Hiroshi. Studies on the growth and bulbing of garlic. **Scientific Reports of the Faculty of Agriculture, Okayama University**, v. 58, p. 23–30, 1971.
- BAITULIN, Ilyas Omarovich. et al. Fertile garlic in Central Asia. **Plant Genetic Resources Newsletter**, v. 123, p. 45–51, 2000.
- BARBOZA, Paulo Marcelo *et al.* Molecular and genetic diversity in garlic: current insights and future prospects. **Genetic Resources and Crop Evolution**, v. 65, p. 1361–1376, 2018.
- BEISE, Dalvan. *et al.* Comparação genético-molecular do alho roxo do Planalto Catarinense e Centro-Oeste do Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE RECURSOS GENÉTICOS, 7., 2023, Brasília. **Anais**. Brasília: Embrapa Recursos Genéticos e Biotecnologia, 2023. Disponível em: http://aplics.infobibos.com.br/Anais/cbrg/7/resumos/Resumo7CBRG_0046.pdf. Acesso em: 6 jul. 2025.
- BEM MICHAEL, B. *et al.* Floral organ formation is impaired in *Allium sativum* under high temperature. **Plant Cell Reports**, v. 37, p. 345–357, 2018.
- BENKE, A. P.; MAHAJAN, V.; MANJUNATHAGOWDA, D. C.; MOKAT, D. N. Interspecific hybridization in *Allium* crops: status and prospectus. **Genetic Resources and Crop Evolution**, v. 69, n. 1, p. 1–9, 2022. DOI: 10.1007/s10722-021-01241-4.
- BORLINGHAUS, J. *et al.* Allicin: chemistry and biological properties. **Molecules**, v. 19, p. 12591–12618, 2014.
- BRASIL. Ministério da Saúde. **Monografia da espécie *Allium sativum* L. (alho)**. Brasília: Ministério da Saúde, 2015. Disponível em: <https://www.gov.br/saude/pt-br/aceso-a-informacao/participacao-social/consultas-publicas/2017/arquivos/MonografiaAllium.pdf>. Acesso em: 15 set. 2025.
- BUSO, G. S. C. *et al.* Caracterização genética de germoplasma de alho por meio de marcadores RAPD. **Horticultura Brasileira**, v. 26, n. 1, p. 116–121, 2008.
- CANDOLLE, Alphonse de. **Origin of cultivated plants**. New York: D. Appleton and Company, 1886. 468 p.
- CARVALHO, Ana Maria; FERREIRA, I. C. F. R.; BARROS, L. Food and nutrition roles of garlic: an update review of its bioactive properties. **Trends in Food Science and Technology**, v. 62, p. 132–141, 2017.

CHAND, K. *et al.* Effect of storage temperature on sprouting behavior and bulb quality in garlic. **Journal of Food Science and Technology**, v. 52, p. 4206–4213, 2015.

CHANDREGOWDA, D.; ANJANAPPA, M. Genetic variability studies for yield and yield contributing traits in onion (*Allium cepa* L.). **Vegetos**, v. 34, p. 174–182, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42535-020-00170-1>. Acesso em: 21 jul. 2025.

CHAUDHARI, G. V.; HEDAU, N. K.; RAM, H.; KHADE, Y. P.; KANT, L.; KHAR, A. Garlic: retrospecto, status quo and dimensions. **Genet Resour Crop Evol**, n. 69, p. 2645–2660, 2022.

CHEN, Shuxia *et al.* Analysis of the genetic diversity of garlic (*Allium sativum* L.) by simple sequence repeat and inter simple sequence repeat analysis and agro-morphological traits. **Biochemical Systematics and Ecology**, v. 55, p. 260–267, 2013.

DE MASON, D. A. Ontogeny of inflorescence and flower development in *Allium cepa* L. **American Journal of Botany**, v. 77, n. 6, p. 835–850, 1990.

DHALL, R. K.; CAVAGNARO, P. F.; SINGH, H.; MANDAL, S. History, Evolution and domestication of garlic: a review. **Plant Systematics and Evolution**, n. 33, p. 309 – 325, 2023.

Disponível em: <https://journals.ashs.org/jashs/view/journals/jashs/130/4/article-p569.xml>. Acesso em: 30 jun. 2025.

DON, George. **A general system of gardening and botany**. London: J.G. & F. Rivington, 1827.

EGEA, I. *et al.* Genetic diversity and structure of garlic accessions using DArTseq. **Plant Genetic Resources**, v. 15, p. 300–309, 2017.

EKŞİ, G. *et al.* Medicinal value of *Allium sativum* L. **Journal of Pharmaceutical Research International**, v. 32, n. 24, p. 1–11, 2020.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação climática para o cultivo de alho**. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2011.

ENGELAND, R. L. **Growing great garlic: the definitive guide for organic gardeners and small farmers**. Okanogan: Filaree Productions, 1991. 213 p.

ESAU, K. **Plant Anatomy**. 2. ed. New York: Wiley, 1965.

ETOH, Takashi; KOJIMA, T.; MATSUZOE, N. Fertile garlic clones collected in Caucasia. In: Hanelt P., Hammer K., Knupffer H. (eds), **the genus Allium, taxonomic problems and genetic resources**. Gatersleben, Germany, p. 49–54, 1991.

ETOH, Takashi. An attempt to obtain binucleate pollen of garlic, *Allium sativum* L. **Memoirs of the Faculty of Agriculture**, Kagoshima University, v. 16, p. 65–73, 1980.

ETOH, Takashi. *et al.* Fertile garlic clones by bulbil removal. **Scientia Horticulturae**, v. 35, p. 293–304, 1988.

ETOH, Takashi. Germination of seeds obtained from a clone garlic (*Allium sativum* L.). **Proceedings of the Japan Academy**, Series B, v. 59, n. 4, p. 83–86, 1983.

ETOH, Takashi. Male-fertile garlic and its breeding potential. **Japanese Journal of Breeding**, v. 36, p. 295–303, 1986.

ETOH, Takashi. Studies on the sterility in garlic, **Allium sativum L. Memoirs of the Faculty of Agriculture**, Kagoshima University, v. 21, p. 1–96, 1985.

ETOH, Takashi. TRUE SEEDS IN GARLIC. **Acta Horticulturae**, n. 433, p. 247–256, 1997. DOI: 10.17660/ActaHortic.1997.433.24.

ETOH, Takashi. Variation of chromosome pairings in various clones of garlic, **Allium sativum L. Memoirs of the Faculty of Agriculture**, Kagoshima University, v. 15, p. 63–72, 1979.

ETOH, Takashi.; OGURA, H. Peroxidase isozymes in the leaves of various clones of garlic, **Allium sativum L. Memoirs of the Faculty of Agriculture**, Kagoshima University, v. 17, p. 71–77, 1981.

FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAOSTAT: **Crops and livestock products**. Roma: FAO, [2025]. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>. Acesso em: 30 jun. 2025.

FASOULA, D. A.; FASOULA, V. A. Honeycomb breeding: Principles and applications. **Plant Breeding Reviews**, v. 18, p. 177–250, 2000.

GARCIA-LAMPASONA, S. et al. Epigenetic variation in garlic: implications for conservation. **Plant Cell Reports**, v. 31, p. 2085–2095, 2012.

GIMÉNEZ, M. et al. DNA methylation variability in *Allium sativum*. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 129, p. 905–915, 2016.

GIMÉNEZ, M.; LAMPASONA, S. Epigenetic variation and redundancy in garlic germplasm collections. **Genetic Resources and Crop Evolution**, v. 65, p. 991–1003, 2018.

GORI, P.; FERRI, M. Osservazioni sulla fioritura dell'aglio (*Allium sativum* L.). **Informatore Fitopatologico**, v. 32, n. 11, p. 45–48, 1982.

GOUVEIA, A. M. G. et al. Efeito da vernalização em alho (*Allium sativum* L.). **Anais da Mostra de Iniciação Científica da UNICENTRO**, Guarapuava, 2008. Disponível em: <https://www.unicentro.br/pesquisa/anais/proic/2008/pdf/resumo_455.doc>. Acesso em: 21 jul. 2025.

GOUVEIA, J. P. G.; SOUZA, R. J.; MACEDO, F. S. Caracterização morfológica de genótipos de alho cultivados em Curitiba, SC. **Horticultura Brasileira**, v. 26, n. 2, p. 268–273, 2008.

GREEN, L. L.; POLYDORIS, N. **Garlic: Nature's powerful healer**. New York: Avery Publishing Group, 1993.

GUEVARA-FIGUEROA, T. *et al.* Conditioning Garlic “Seed” Cloves at Low Temperature Modifies Plant Growth, Sugar, Fructan Content, and Sucrose Sucrose Fructosyl Transferase (1-SST) Expression. **Sci. Hortic.** 2015, 189, 150–158

GUIMARÃES RIBEIRO, A. D. **Vernalização de alho com temperaturas negativas**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. Disponível em:

<[https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/37873/1/Vernaliza%>. Acesso em: 21 jul. 2025.](https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/37873/1/Vernaliza%c3%a7%c3%a3oAlhoTemperatura.pdf)

HABUŠ JERČIĆ, I.; BOŠNJAK MIHOVILOVIĆ, A.; STANKOVIĆ, A. M.; LAZAREVIĆ, B.; BAN, S. G.; BAN, D. Garlic ecotypes utilise different morphological, physiological and

biochemical mechanisms to cope with drought stress. **Plants**, v. 12, n. 9, 2023. DOI: 10.3390/plants12091723.

HONG, C.-J.; ETOH, T. Fertile clones of garlic (*Allium sativum* L.) abundant around the Tien Shan mountains. **Breeding Science**, v. 46, p. 349–353, 1996.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Produção agropecuária: alho em Santa Catarina**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/alho/sc>. Acesso em: 29 jun. 2025.

INABA, T. *et al.* Seed production in garlic (*Allium sativum* L.) by removal of topsets. **Japanese Journal of Breeding**, v. 45, p. 371–377, 1995.

IPEK, M. *et al.* Development and validation of new SSR markers from expressed regions in the garlic genome. **Scientia Agricola**, v. 72, n. 3, p. 244–250, 2015. Disponível em: <<https://revistas.usp.br/sa/article/view/100165/98832>>. Acesso em: 29 jun. 2025.

IPÊK, M. *et al.* Molecular mapping and QTL studies in garlic. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 121, p. 173–183, 2005.

IPEK, M.; IPEK, A.; SIMON, P. W. Rapid characterization of garlic clones with locus-specific DNA markers. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, v. 32, n. 5, p. 357–362, 2008.

JANG, E. J.; BAASANMUNKH, S.; NYAMGEREL, N.; OH, S.; SONG, J.; YUSUPOV Z.; TOJIBAEV, K.; CHOI, H. Flower morphology of *Allium* (Amaryllidaceae) and its systematic significance. **Plant Diversity**, 46, n.1, p.3-27, 2024.

JENDEREK, M. M.; ZEWDIE, Y. The first genetic linkages among expressed regions of the garlic genome. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v. 130, n. 4, p. 569–574, 2005.

JENDEREK, Maria M. Development of S1 families in garlic. **Acta Horticulturae**, n. 637, p. 203–206, 2004.

JENDEREK, Maria M. Flowering and seed production in garlic (*Allium sativum* L.). **HortScience**, v. 33, p. 758, 1998. (Suplemento de resumos da ASHS Annual Conference).

JENDEREK, Maria M.; HANNAN, Joe. Garlic flowering and seed production: progress and challenges. **Allium Improvement Newsletter**, v. 10, p. 1–3, 2000.

JENDEREK, Maria M.; SIMON, Philipp W. Flowering, seed production and the genesis of garlic breeding. **Plant Breeding**, v. 32, p. 211–244, 2003.

JO, S. H. *et al.* Comparative transcriptomics of garlic bulbs stored at different temperatures. **Plant Cell Reports**, v. 31, p. 1591–1604, 2012.

JONES, H. A.; EMSWELLER, S. L. A male sterile onion. **Proceedings of the American Society for Horticultural Science**, v. 34, p. 582–585, 1936.

KAHN, F. **The healing power of garlic**. Rochester: Healing Arts Press, 1996.

KAMENETSKY Rina; RABINOWITCH H. D. Florogenesis. In: Rabinowitch H. D., Currah L. (eds) *Allium crop sciences: recent advances*. **CAB International**, Wallingford, pp 31–58, 2002.

- KAMENETSKY Rina. Inflorescence of *Allium* species (subgenus *Melanocrommyum*): structure and development. **Acta Hortic** 430: 141–146, 1997.
- KAMENETSKY, R. *et al.* Floral development and sterility in garlic. **Plant Cell Reports**, v. 23, p. 744–751, 2004.
- KAMENETSKY, R. *et al.* Integrated transcriptome catalogue and organ-specific profiling of gene expression in fertile garlic (*Allium sativum* L.). **BMC Genomics**, v. 16, n. 12, p. 1–16, 2015. DOI: 10.1186/s12864-015-1212-0.
- KAMENETSKY, R. Garlic breeding system innovations. **Medicinal and Aromatic Plant Science and Biotechnology**, v. 1, n. 1, p. 6–15, 2007.
- KAMENETSKY, R.; RABINOWITCH, H. D. Floral development in fertile and sterile garlic. **Sexual Plant Reproduction**, v. 14, p. 19–28, 2001.
- KATAYAMA, T. Cytological studies on the genus *Allium*. **Japanese Journal of Genetics**, v. 12, p. 1–20, 1936.
- KAUR, H.; DHALL, R. K. Flowering and seed set in fertile garlic under subtropical plains. **Vegetable Science**, v. 44, p. 81–88, 2017.
- KONVICKA, O. Die Ursachen der Sterilität von *Allium sativum* L. **Biologia Plantarum**, v. 15, p. 144–149, 1973.
- KONVICKA, O. Generative Reproduktion von Knoblauch (*Allium sativum*). **Allium Newsletter**, v. 1, p. 28–37, 1984.
- KOTLINSKA, T. *et al.* Fertile garlic clones in Central Asia. In: RABINOWITCH, H. D.; CURRAH, L. (ed.). **Allium Crop Science: Recent Advances**. Wallingford: CABI, 1991. p. 101–111.
- KOUL, A. K.; GOHIL, R. N. Causes averting sexual reproduction in *Allium sativum* Linn. **Cytologia**, v. 35, p. 197–202, 1970.
- KRONTAL, Y.; KAMENETSKY, R.; RABINOWITCH, H. D. Flowering behavior and inflorescence structure in short-day shallot (*Allium cepa* var. *aggregatum*). **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v. 123, n. 3, p. 368–372, 1998.
- KUMARI, Manisha *et al.* Genotypic response of garlic (*Allium sativum* L.) to different dates of sowing under ecology of Bihar. **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, v. 9, n. 10, p. 3495–3504, 2020. Disponível em: <https://ijcmas.com/9-10-2020/Manisha%20Kumari,%20et%20al.pdf>. DOI: <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2020.910.403>.
- LAWSON, L. D. The composition and chemistry of garlic cloves and processed garlic. In: KOPEC, M.; LAWSON, L. (ed.). **Garlic: The science and therapeutic application of *Allium sativum* L. and related species**. Baltimore: Williams & Wilkins, 1998. p. 37–108.
- LEE, Y. H. *et al.* Evaluation of genetic diversity using SSR markers in garlic. **Horticulture Environment and Biotechnology**, v. 52, p. 503–509, 2011.
- LIAO, Y. C. *et al.* Repetitive DNA in *Allium* species. **Chromosome Research**, v. 11, p. 231–243, 2003.
- LINNAEUS, Carl. **Species plantarum**. 2. ed. Stockholm: Laurentii Salvii, 1753.

LUCINE, Marco Antônio. Alho roxo no Brasil: um pouco da história dos números desse nobre. **Nosso Alho**, ANAPA, ano 1, n. 1, p. 38, 2008.

MA, K. *et al.* Development of EST-SSR markers and their application in genetic diversity evaluation of garlic (*Allium sativum* L.). **Scientia Horticulturae**, v. 122, p. 440–447, 2009.

MAAB, H.; KLAAS, M. Genetic diversity in *Allium sativum*. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 91, p. 1248–1255, 1995.

MANN, Louis K. **Anatomy of the garlic bulb and factors affecting bulb development**. Berkeley: University of California, 1952. 57 p.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Portaria nº 242, de 17 de setembro de 1992. **Agrupa oficialmente o alho brasileiro em Alho Branco e Alho Roxo**. Brasília: MAPA, 1992.

MARTINS, Natália; PETROPOULOS, Spyridon A.; FERREIRA, Isabel C. F. R. Chemical composition and bioactive compounds of garlic (*Allium sativum* L.) as affected by pre- and post-harvest conditions: a review. **Food Chemistry**, v. 211, p. 41–50, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.05.029>. Acesso em: 29 jun. 2025.

MATHEW, Brian. **A review of Allium sect. Allium**. Kew: Royal Botanic Gardens, 1996. 176 p.

MATHEW, Deepu *et al.* Effect of long photoperiod on the reproductive and bulbing processes in garlic (*Allium sativum* L.) genotypes. **Environmental and Experimental Botany**, v. 71, n. 3, p. 372–378, 2011.

MAZZUCO, V. **Seleção clonal individual de alho roxo nobre no Planalto Catarinense**. 2023. 65 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Genéticos Vegetais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Curitibanos, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/249842>. Acesso em: 06 jul. 2025.

MEREDITH, C. O. Flowering potential and propagation of garlic. **American Journal of Botany**, v. 95, p. 620–630, 2008.

MOYERS, S. **Garlic in health, history and world cuisine**. Lake Worth: Suncoast Press, 1996.

NOVAK, F. J. Cytogenetic studies in garlic (*Allium sativum* L.). **Biologia Plantarum**, v. 14, n. 5, p. 336–343, 1972.

PARREÑO, L. *et al.* Advances in garlic (*Allium sativum* L.) molecular and reproductive biology: towards fertility recovery and hybrid breeding. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, 2023. DOI: 10.3389/fpls.2023.1193268.

PETROVSKA, B. B.; CEKOVSKA, S. Historical review of medicinal plants' usage. **Pharmacognosy Reviews**, v. 4, n. 7, p. 1–5, 2010.

POOLER, M. R. Genetic diversity and fertility in garlic. **Allium Improvement Newsletter**, v. 3, p. 12–15, 1991.

POOLER, M. R.; SIMON, P. W. Characterization and classification of isozyme and morphological variation in a diverse collection of garlic clones. **Euphytica**, v. 68, p. 121–130, 1993.

POOLER, M. R.; SIMON, P. W. True seed production in garlic. **Sexual Plant Reproduction**, v. 7, p. 282–286, 1994. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF00227710>. Acesso em: 29 jun. 2025.

REBELATO, Renan Carlos. **Escala fenológica do alho**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Campus de Curitibanos, Curitibanos. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/171753/TCC_Escala_fenol%C3%B3gica_do_Alho_Renan_Carlos_Rebelato.pdf.

REGEL, Eduard A. von. *Allium longicuspis* and the origin of garlic. **Trudy Imperatorskago S. Peterburgskago Botanicheskago Sada**, v. 10, p. 1–12, 1887.

REGHIN, M. Y.; KIMOTO, T. Dormência, vernalização e produção de alho após diferentes tratamentos de frigorificação de bulbilhos-semente. **Horticultura Brasileira**, v. 16, n. 1, p. 73–79, 1998.

RESENDE, F. V. Desafios da produção e inovações tecnológicas para a cultura do alho no Brasil. **Hortaliças: Revista da Embrapa Hortaliças**, ed. 25, p. 16–17, 2018. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1100347/1/revistahortalicased25p1617.pdf>. Acesso em: 30 jun. 2025.

RESENDE, F. V.; MELO, W. F. de; GUIDUCCI FILHO, E.; DUSI, A. N. Produção de alho-semente livre de vírus em pequenas propriedades. Brasília, DF: **Embrapa-CNPH**, 2011. 12p. (Circular técnica, 99).

RESENDE, Francisco Vilela et al. Sistema de produção de alho. [S.l.]: **Embrapa**, s.d. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/hortalicas/alho/cultivares>. Acesso em: 30 jun. 2025.

RESENDE, Francisco Vilela; HABER, Lenita Lima; PINHEIRO, Jadir Borges; LOURENÇO JUNIOR, Valdir; LIMA, Mirtes Freitas; MICHEREFF FILHO, Miguel; MALDONADE, Iriani Rodrigues. **Sistema de produção de alho**. Brasília, DF: Embrapa Hortaliças, 2021. 127 p. (Sistemas de Produção, 4). Disponível em: <https://www.embrapa.br/hortalicas/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1134204/sistema-de-producao-de-alho>. Acesso em: 30 jun. 2025.

RIED, Karin; FAKLER, Peter. Potential of garlic (*Allium sativum*) in lowering high blood pressure: mechanisms of action and clinical relevance. **Integrated Blood Pressure Control**, v. 7, p. 71–82, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.2147/IBPC.S51434>. Acesso em: 30 jun. 2025.

RIVLIN, R. S. Historical perspective on the use of garlic. **The Journal of Nutrition**, v. 131, p. 951S–954S, 2001.

ROHKIN SHALOM, S. et al. Storage temperature controls the timing of garlic bulb formation via shoot apical meristem termination. **Planta**, v. 242, p. 951–962, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00425-015-2334-0>. Acesso em: 30 jun. 2025.

ROTEM, N., SHEMESH, Einat, PERETZ, Y., AKAD, F., EDELBAUM, O., RABINOWITCH, H. D., SELA, I., KAMENETSKY, Rina. Reproductive development and phenotypic differences in garlic are associated with expression and splicing of leafy homologue gaLFY. **Journal of Experimental Botany** 58, 1133–114, 2007.

ROTEM, Neta; SHEMESH E.; PERETZ Y.; AKAD F.; EDELBAUM O.; RABINOWITCH H. D.; SELA I.; KAMENETSKY, Rina. Reproductive development and phenotypic

differences in garlic are associated with expression and splicing of LEAFY homologue *gaLFY*. **Exp. Bot.** 58:1133–114, 2007.

ROTEM, Neta. *et al.* Flower development in garlic: the ups and downs of *gaLFY* expression. **Planta**, v. 233, p. 1063–1072, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00425-011-1361-8>. Acesso em: 29 jun. 2025.

SCOTT, R. **The influence of garlic on eastern medicinal practices**. London: Medical Heritage Society, 1827.

SHEMESH, Einat *et al.* Unlocking variability: inherent variation and developmental traits of garlic plants originated from sexual reproduction. **Planta**, v. 227, p. 1013–1024, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00425-007-0675-z>. Acesso em: 30 jun. 2025.

SHEMESH-MAYER, Einat *et al.* Reproductive biology and molecular tools in garlic (*Allium sativum*): potential for fertility restoration and breeding. **Horticulture Research**, v. 2, p. 15036, 2015. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/hortres201536>. Acesso em: 30 jun. 2025.

SHEMESH-MAYER, Einat; FAIGENBOIM, A.; SHERMAN, A.; GAO, S.; ZENG, Z.; LIU, T.; KAMENETSKY-GOLDSTEIN, Rina. Deprivation of sexual reproduction during garlic domestication and crop evolution. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 24, n. 23, p. 16777, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms242316777>.

SHEMESH-MAYER, Einat; KAMENETSKY-GOLDSTEIN, Rina. Tradicional and Novel Approaches in Garlic (*Allium sativum* L.) Breeding. In: AL-KHAYRI, J.; MOHAN JAIN, S.; JOHNSON, D.V. **Advances in Plant Breeding Strategies: Vegetable Crops**. Springer Nature Switzerland, v. 8, 2021.

SHEMESH-MAYER, Einat; KAMENETSKY-GOLDSTEIN, Rina. Recent advances in sexual propagation and breeding of garlic. In: WARRINGTON, Ian (ed.). **Horticultural Reviews**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2018. v. 46, p. 1–38. DOI: 10.1002/9781119616750.ch1. Acesso em: 29 jun. 2025.

SHEMESH-MAYER, Einat; WINIARCZYK, Krystyna; BŁASZCZYK, Lidia; KOSMALA, Arkadiusz; RABINOWITCH, Haim D.; KAMENETSKY-GOLDSTEIN, Rina. Male gametogenesis and sterility in garlic (*Allium sativum* L.): barriers on the way to fertilization and seed production. **Planta**, v. 237, p. 103–120, 2013. DOI: 10.1007/s00425-012-1748-1. Acesso em: 01 jul. 2025.

SIMON, P. W.; MANN, L. K.; LEWIS, D. A. Anatomy of the garlic bulb and factors affecting bulb development. **Hilgardia**, v. 21, p. 195–251, 1956.

SO, Sushma Bagde Bhatwalkar *et al.* Antibacterial properties of organosulfur compounds of garlic (*Allium sativum*). **Frontiers in Microbiology**, v. 12, p. 613077, 2021. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmicb.2021.613077/full>. Acesso em: 01 jul. 2025.

SÖNMEZ, İ.; SARP KAYA, K. Phenolic, organic acid and sugar content of garlic (*Allium sativum* L.) genotypes grown in different regions of Türkiye. **Horticultural Studies**, v. 42, n. 1, p. 1–8, 2025. DOI: 10.16882/hortis.1606297.

SOUZA, R. J.; MACÊDO, C. E. A. Alterações fisiológicas e produtivas do alho vernalizado no semiárido. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 27, n. 2, p. 247–251, 2009. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/hb/a/P5hNM9xcfqTppyX54M4n83b/>>. Acesso em: 21 jul. 2025.

SUN, X. *et al.* The garlic genome sequence reveals the expansion of disease resistance genes. **Nature Communications**, v. 11, p. 1–13, 2020. DOI: 10.1038/s41467-020-15221-0.

SUN, X. *et al.* Transcriptome analysis of garlic (*Allium sativum* L.) bulbs: insights into the regulatory network of bolting and flowering. **Molecular Breeding**, v. 30, p. 1599–1612, 2012. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11032-012-9740-6>. Acesso em: 01 jul. 2025.

TAKAGI, H. Garlic (*Allium sativum* L.). In: RABINOWITCH, H. D.; BREWSTER, J. L. (ed.). **Onions and allied crops**. v. 3. Boca Raton: CRC Press, 1990. p. 109–146.

TAKENAKA, Y. Studies on the sterility of garlic. **Journal of the Faculty of Agriculture**, Hokkaido Imperial University, v. 33, p. 1–43, 1931.

TCHÓRZEWSKA, D. *et al.* Antibacterial properties of *Allium sativum* L. against the most emerging multidrug-resistant bacteria and its synergy with antibiotics. **Archives of Microbiology**, v. 203, p. 2257–2268, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00203-021-02248-z>. Acesso em: 29 jun. 2025.

TCHÓRZEWSKA, D. *et al.* Comparative studies of nutritional and health-enhancing properties in the “garlic-like” plant *Allium ampeloprasum* var. *ampeloprasum* and *A. sativum*. **Scientia Horticulturae**, v. 201, p. 247–255, 2015.

THOMPSON, Collin. **Organic garlic production**. Michigan State University Extension Bulletin E3371, 2018. Disponível em: https://www.canr.msu.edu/uploads/resources/pdfs/e3371_wcag_2.08.pdf. Acesso em: 29 jun. 2025.

TUCAKOV, J. **Lečenje biljem (Herbal Medicine)**. Beograd: Rad, 1971.

VANJKEVIC, T. Allium history and expansion in Europe. **European Botany Review**, v. 8, n. 2, p. 45–52, 2002.

VAVILOV, N. I. **The origin, variation, immunity and breeding of cultivated plants**. Translated by K. Starr Chester. Waltham: Chronica Botanica, 1951. 366 p.

VIEIRA, Renato Luís. **Aspectos fisiológicos e fitossanitários na micropropagação para a obtenção de alho-semente livres de vírus**. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina; 2012.

VIEIRA, Renato Luís; NODARI, Rubens Onofre. Diversidade genética de cultivares de alho avaliada por marcadores RAPD. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 1, p. 51–57, jan./fev. 2007. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/270493826>>. DOI: 10.1590/S0103-84782007000100009.

WANG, Y. *et al.* Genomic analysis of bolting and fertility traits in cultivated garlic (*Allium sativum* L.). **Horticulture Research**, v. 10, 2022. DOI: 10.1093/hr/uhad040.

WINIARCZYK, K. *et al.* Male gametogenesis and sterility in garlic (*Allium sativum* L.): barriers on the way to fertilization and seed production. **Planta**, v. 236, p. 1413–1424, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00425-012-1748-1>. Acesso em: 30 jun. 2025.

WINIARCZYK, K.; GÉBURA, J. Comparative studies of nutritional and health-enhancing properties in the “garlic-like” plant *Allium ampeloprasum* var. *ampeloprasum* and *A. sativum*. **Scientia Horticulturae**, v. 201, p. 247–255, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2016.01.044>. Acesso em: 30 jun. 2025.

WINIARCZYK, K.; KOSMALA, A. Development of the female gametophyte in the sterile ecotype of the bolting *Allium sativum* L. **Scientia Horticulturae**, v. 121, n. 3, p. 353–360, 2009.

WOODWARD, Penny. **Garlic: an organic guide to knowing, growing and using garlic**. Melbourne: Hyland House Publishing, 2014. 224 p.

WU, Cuinan *et al.* Response of garlic (*Allium sativum* L.) bolting and bulbing to temperature and photoperiod treatments. **Biology Open**, v. 5, n. 4, p. 507–518, 2015.

YANG, Q. *et al.* Physiological and transcriptome analysis of changes in endogenous hormone contents and related synthesis and signaling genes during heat stress in garlic (*Allium sativum* L.). **BMC Plant Biology**, v. 25, p. 464, 2025.

ZAITSCHKE, E. Ancient garlic residues from prehistoric settlements in Israel. **Antiquity**, v. 35, n. 138, p. 142–145, 1961.

ZEWDIE, Y. *et al.* The first genetic linkages among expressed regions of the garlic genome. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, v. 130, n. 4, p. 569–574, 2005.

ZHAO, Y. *et al.* Genetic diversity and population structure of garlic (*Allium sativum* L.) revealed by AFLP markers. **Scientia Horticulturae**, v. 128, p. 593–597, 2011.

ZHOU, Fang *et al.* The garlic allelochemical diallyl disulfide affects tomato root growth by influencing cell division, phytohormone balance and expansin gene expression. **Frontiers in Plant Science**, v. 7, art. 1199, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01199>. Acesso em: 30 jun. 2025.