

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**

**Desuniformidade de maturação e ambiente de produção no potencial fisiológico de sementes de linhagens elite de soja**

Laura Carvalho Silva  
*Magister Scientiae*

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2026**

**LAURA CARVALHO SILVA**

**Desuniformidade de maturação e ambiente de produção no potencial fisiológico de sementes de linhagens elite de soja**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Felipe Lopes da Silva

Coorientador: Laercio Junio da Silva

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S586d  
2026  
Silva, Laura Carvalho, 1999-  
Desuniformidade de maturação e ambiente de produção no  
potencial fisiológico de sementes de linhagens elite de soja /  
Laura Carvalho Silva. – Viçosa, MG, 2026.  
1 dissertação eletrônica (126 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndices.

Orientador: Felipe Lopes da Silva.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,  
Departamento de Agronomia, 2026.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2026.353>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Soja - Melhoramento genético. 2. Soja - Semente -  
Fisiologia. 3. Soja - Semente - Qualidade. I. Silva, Felipe Lopes  
da, 1981-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de  
Agronomia. Programa de Pós-Graduação em Genética e  
Melhoramento. III. Título.

CDD 22. ed. 633.3423

**LAURA CARVALHO SILVA**

**Desuniformidade de maturação e ambiente de produção no potencial fisiológico de sementes de linhagens elite de soja**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 2 de março de 2026.

Assentimento:

---

Laura Carvalho Silva  
Autora

---

Felipe Lopes da Silva  
Orientador

Essa dissertação foi assinada digitalmente pela autora em 10/06/2026 às 14:35:14 e pelo orientador em 10/06/2026 às 14:38:03. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **X5W1.G4TH.7PN1** e clique no botão 'Validar documento'.

À minha mãe, pelo incentivo, pelas renúncias e pelas orações ao longo do caminho.  
Com amor e coragem, tornou meus sonhos possíveis.

Dedico

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus por me acompanhar ao longo desta jornada, iluminando meus caminhos e me dando força nos momentos mais difíceis.

À minha mãe Marta Helena e às minhas irmãs, Luany e Josiane, serei eternamente grata pelo apoio incondicional, pelos conselhos, pela paciência, pelas orações e por sempre acreditarem nas minhas escolhas.

Ao meu namorado, Leonardo, pelo companheirismo, compreensão e incentivo durante toda essa caminhada. Obrigada por estar ao meu lado em todos os momentos, tornando os dias mais leves e felizes.

Aos meus sogros, Ângela e Ronaldo, e a toda a família, pelo acolhimento, carinho e por me fazerem sentir em casa, mesmo longe da minha família.

À minha amiga Elisa, que sempre me aplaudiu tão alto que eu nunca percebi quem não aplaudiu. Aos meus amigos Luan, Igor, Mylliana, Vitor e Augusto, pelos momentos de descontração, apoio e amizade ao longo dessa trajetória.

Ao meu orientador, Felipe Lopes da Silva, e ao meu coorientador, Laércio Junio Silva, pela confiança, disponibilidade, ensinamentos e contribuição essencial para o desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Programa de Pós-Graduação em Genética e Melhoramento, pela oportunidade de concluir mais uma etapa fundamental da minha trajetória acadêmica em uma instituição de excelência.

Aos pós-graduandos e estagiários do Programa de Melhoramento Genético de Soja, assim como aos técnicos e integrantes do Laboratório de Sementes, pelo apoio, colaboração e auxílio na condução dos experimentos e análises.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

## RESUMO

SILVA, Laura Carvalho, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2026. **Desuniformidade de maturação e ambiente de produção no potencial fisiológico de sementes de linhagens elite de soja.** Orientador: Felipe Lopes da Silva. Coorientador: Laercio Junio da Silva.

A qualidade fisiológica das sementes de soja é determinada por processos que se iniciam no ambiente de produção e se estendem ao período pós-colheita, sendo influenciada pela interação entre genótipo, ambiente e condições de armazenamento. Em cultivares de hábito de crescimento indeterminado, a sobreposição das fases vegetativa e reprodutiva promove assincronia no desenvolvimento das estruturas reprodutivas ao longo do dossel, podendo resultar em desuniformidade da qualidade das sementes entre os estratos própria planta. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo investigar a variação da qualidade fisiológica das sementes ao longo do dossel, a influência de ambientes contrastantes sobre o desempenho e a uniformidade das sementes, bem como a armazenabilidade de linhagens elite de soja de crescimento indeterminado. No primeiro estudo, avaliou-se a desuniformidade da qualidade fisiológica entre os terços da planta em 14 linhagens elite, produzidas em Capinópolis, Minas Gerais, na safra 2024/2025. Foram analisados grau de umidade, peso de 100 sementes, germinação, viabilidade e vigor por meio do teste de tetrazólio e frequência de danos mecânicos, por umidade por percevejo. As análises de correlação, componentes principais (PCA) e agrupamento k-means evidenciaram ampla variabilidade multivariada entre os genótipos e associação negativa entre desempenho fisiológico e danos severos. Observou-se variação da qualidade das sementes entre os terços do dossel, com magnitude dependente do genótipo. A uniformidade foi quantificada pela distância de Mahalanobis ( $D^2$ ), e a seleção multicaracterística pelo índice FAI-BLUP identificou genótipos com desempenho médio superior independentemente da posição no dossel, embora nem sempre associados à maior uniformidade interna. No segundo estudo, as seis linhagens selecionadas foram cultivadas em dois ambientes (Capinópolis e Viçosa), para avaliar a sensibilidade ambiental e a uniformidade da qualidade das sementes ao longo do dossel. O ambiente foi caracterizado por covariáveis climáticas obtidas da base NASA POWER e integradas em um índice ambiental. Viçosa apresentou melhores médias fisiológicas e menor divergência entre os terços, enquanto Capinópolis apresentou desempenho inferior e maior diferenciação entre estratos. A sensibilidade ambiental variou entre genótipos, evidenciando perfis responsivos e

conservadores. A divergência entre os terços dependeu do genótipo e, na maioria dos materiais, foi reduzida no ambiente mais favorável, embora alguns genótipos tenham apresentado maior desuniformidade sob condições menos restritivas. No terceiro estudo, investigou-se a armazenabilidade das sementes produzidas nos dois ambientes e armazenadas por seis meses sob condições controladas e não controladas. O armazenamento sem controle higrotérmico esteve associado à redução da germinação e do vigor e ao aumento da frequência de danos severos. O ambiente de produção influenciou de forma consistente a qualidade fisiológica ao longo do armazenamento. A posição da semente na planta esteve associada a diferenças nos níveis médios de qualidade inicial, mas não foi observada alterações na taxa de deterioração entre os estratos no período avaliado. A divergência multivariada entre os terços variou conforme genótipo e condições ambientais, estando mais relacionada à distribuição da frequência de danos do que às variáveis fisiológicas isoladamente. Os resultados demonstram que a qualidade fisiológica das sementes de soja de hábito de crescimento indeterminado é resultado da interação entre ambiente de produção, sensibilidade genotípica, posição no dossel e condição de armazenamento. O desempenho médio das características, a uniformidade da qualidade fisiológica das sementes ao longo da planta e a estabilidade durante o armazenamento constituem dimensões complementares da qualidade de sementes, contribuindo para estratégias de seleção de linhagens com alto potencial fisiológico, uniformidade e armazenabilidade.

Palavras-chave: *Glycine max* (L.) Merr.; vigor de sementes; armazenabilidade; distância de Mahalanobis; índice FAI-BLUP

## ABSTRACT

SILVA, Laura Carvalho, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March, 2026. **Non-uniformity of maturation and production environment in the physiological potential of elite soybean lines seeds.** Adviser: Felipe Lopes da Silva. Co-adviser: Laercio Junio da Silva.

The physiological quality of soybean seeds is determined by processes that begin in the production environment and extend into the post-harvest period, being influenced by the interaction among genotype, environment, and storage conditions. In cultivars with an indeterminate growth habit, the overlap between vegetative and reproductive phases promotes asynchrony in the development of reproductive structures throughout the canopy, potentially resulting in non-uniform seed quality among plant strata. In this context, this study aimed to investigate the variation in seed physiological quality along the canopy, the influence of contrasting environments on seed performance and uniformity, as well as the storability of elite soybean lines with indeterminate growth habit. In the first study, the non-uniformity of physiological quality among plant thirds was evaluated in 14 elite lines produced in Capinópolis, Minas Gerais, during the 2024/2025 growing season. Moisture content, 100-seed weight, germination, viability and vigor by the tetrazolium test, and the frequency of mechanical, moisture, and stink bug damage were evaluated. Correlation, principal component (PCA), and k-means clustering analyses revealed broad multivariate variability among genotypes and a negative association between physiological performance and severe damage. Variation in seed quality among canopy thirds was observed, with magnitude dependent on genotype. Uniformity was quantified using Mahalanobis distance ( $D^2$ ), and multi-trait selection using the FAI-BLUP index identified genotypes with superior mean performance regardless of canopy position, although not always associated with greater internal uniformity. In the second study, the six selected lines were cultivated in two environments (Capinópolis and Viçosa) to evaluate environmental sensitivity and seed quality uniformity along the canopy. The environment was characterized using climatic covariates obtained from the NASA POWER database and integrated into an environmental index. Viçosa showed better physiological means and lower divergence among canopy thirds, whereas Capinópolis showed lower performance and greater differentiation among strata. Environmental sensitivity varied among genotypes, revealing responsive and conservative profiles. Divergence among canopy thirds depended on genotype and, for most materials, was reduced in the more favorable environment, although some genotypes

showed greater non-uniformity under less restrictive conditions. In the third study, the storability of seeds produced in both environments and stored for six months under controlled and uncontrolled conditions was investigated. Storage without hygrothermal control was associated with reduced germination and vigor and increased frequency of severe damage. The production environment consistently influenced physiological quality throughout storage. Seed position on the plant was associated with differences in mean initial quality levels, but no changes in deterioration rate among strata were observed during the evaluated period. Multivariate divergence among canopy thirds varied according to genotype and environmental conditions and was more related to damage frequency distribution than to isolated physiological variables. The results demonstrate that the physiological quality of soybean seeds with indeterminate growth habit results from the interaction among production environment, genotypic sensitivity, canopy position, and storage conditions. Mean trait performance, uniformity of seed physiological quality along the plant, and stability during storage constitute complementary dimensions of seed quality, contributing to strategies for selecting lines with high physiological potential, uniformity, and storability.

Keywords: Glycine max (L.) Merr.; germination; ; seed vigor; storability; Mahalanobis distance; FAI-BLUP index

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	<b>11</b>
<b>2. REFERÊNCIAS</b> .....	<b>12</b>
<b>Capítulo I. Desuniformidade de maturação e desempenho de sementes de genótipos de soja de hábito de crescimento indeterminado.</b> .....	<b>14</b>
<b>3. RESUMO</b> .....	<b>14</b>
<b>Chapter I. Maturation non-uniformity and seed performance of soybean genotypes with indeterminate growth habit.</b> .....	<b>16</b>
<b>4. ABSTRACT</b> .....	<b>16</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
<b>2. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>19</b>
2.1. Material vegetal e caracterização do ambiente de produção .....	19
2.2. Colheita .....	20
2.3. Avaliação da qualidade fisiológica das sementes .....	21
2.4. Análises estatísticas.....	22
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>25</b>
<b>4. CONCLUSÃO</b> .....	<b>40</b>
<b>5. REFERÊNCIAS</b> .....	<b>40</b>
<b>Emirates Journal of Food and Agriculture, 2020.</b> .....	<b>43</b>
<b>5. APÊNDICE A – ANÁLISES COMPLEMENTARES DA PCA E VALIDAÇÃO DE CLUSTERS</b> .....	<b>44</b>
<b>6. APÊNDICE B – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA E INTEGRIDADE DAS SEMENTES.</b> .....	<b>45</b>
<b>Capítulo II. Influência do ambiente de produção sobre o desempenho fisiológico e a uniformidade da qualidade das sementes ao longo do dossel em plantas de soja de hábito de crescimento indeterminado.</b> .....	<b>53</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>53</b>
<b>Chapter II. Influence of the production environment on physiological performance and vertical uniformity of seed quality along the canopy in soybean plants with indeterminate growth habit.</b> .....	<b>55</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>55</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>57</b>
<b>2. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>58</b>
2.1. Material vegetal .....	58

2.2.	Caracterização dos ambientes de produção .....	59
2.3.	Colheita .....	60
2.4.	Avaliação da qualidade fisiológica das sementes .....	60
2.5.	Obtenção e processamento ecofisiológico dos dados climáticos.....	61
2.6.	Análises estatísticas.....	64
<b>3.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>65</b>
<b>4.</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>81</b>
<b>5.</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>81</b>
	<b>Capítulo III. Armazenabilidade de sementes de linhagens de soja de hábito de crescimento indeterminado.....</b>	<b>91</b>
	<b>RESUMO.....</b>	<b>91</b>
	<b>Chapter III. Storability of soybean lines with indeterminate growth habit .....</b>	<b>92</b>
	<b>ABSTRACT .....</b>	<b>92</b>
<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>93</b>
<b>2.</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>94</b>
2.1.	Material vegetal .....	94
2.2.	Ambientes de produção das sementes: .....	95
2.3.	Colheita .....	95
2.4.	Armazenamento .....	96
2.5.	Avaliação da qualidade fisiológica das sementes .....	97
2.6.	Análises estatísticas.....	98
<b>3.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>101</b>
<b>4.</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>123</b>
<b>5.</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>123</b>
	<b>CONCLUSÃO GERAL .....</b>	<b>126</b>

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

A soja ocupa posição central nos sistemas agrícolas contemporâneos, sendo amplamente cultivada em diferentes regiões do mundo e desempenhando papel estratégico na produção de proteína e óleo vegetal. No Brasil, a expansão da área cultivada e os elevados volumes de produção reforçam a importância da utilização de sementes de alta qualidade fisiológica como fundamento para a manutenção da alta produtividade e da estabilidade dos sistemas produtivos (CONAB, 2025).

A qualidade fisiológica das sementes resulta de processos que se iniciam ainda no campo e se estendem até o período pós-colheita. Fatores associados ao ambiente de produção, às características genéticas dos materiais e às condições de armazenamento interagem de forma dinâmica, influenciando o desempenho fisiológico das sementes (Krzyzanowski et al., 2020). Nesse contexto, a compreensão integrada desses componentes torna-se particularmente relevante em cultivares de soja de hábito de crescimento indeterminado.

Em genótipos com esse padrão de crescimento, a sobreposição entre fases vegetativas e reprodutivas promove assincronia no desenvolvimento das estruturas reprodutivas. Como consequência, estabelecem-se gradientes microambientais ao longo do dossel, caracterizados por variações na interceptação de radiação, temperatura e umidade relativa do ar, que podem influenciar na formação e no enchimento das sementes (Carrera; Savin; Slafer, 2024). Essa desuniformidade entre os estratos da planta pode resultar em diferenças na qualidade física e fisiológica das sementes produzidas em diferentes terços do dossel, afetando a uniformidade dos lotes.

Além das variações associadas à posição no dossel, o ambiente de produção também exerce influência decisiva sobre o potencial fisiológico das sementes. Fatores climáticos como temperatura, precipitação e radiação podem afetar tanto o nível médio de germinação, vigor e viabilidade quanto a incidência de danos mecânicos, por umidade e por percevejos (Fan et al., 2019; Gao et al., 2023). A interação entre genótipo e ambiente ( $G \times A$ ) pode modificar a magnitude dessas respostas (Allard; Bradshaw, 1964), promovendo alterações tanto no desempenho médio quanto na estabilidade relativa dos materiais entre ambientes contrastantes.

Nesse cenário, a análise da sensibilidade ambiental dos genótipos e da uniformidade da qualidade das sementes ao longo do dossel constitui abordagem complementar à avaliação tradicional do desempenho médio. A integração dessas dimensões permite ampliar a compreensão da resposta fenotípica, considerando não apenas o nível de expressão das características, mas também sua consistência entre os terços da planta e sua estabilidade frente a diferentes condições de produção.

Após a colheita, as sementes permanecem sujeitas a processos de deterioração, cuja intensidade depende da qualidade inicial e das condições de armazenamento. A deterioração fisiológica está associada, entre outros fatores, à peroxidação lipídica e à perda de integridade de membranas, processos que comprometem progressivamente a germinação e o vigor (Mahmood; Basra, 2009). Em sementes de soja, o tegumento relativamente fino confere maior suscetibilidade a danos mecânicos e por umidade (Tripathi; Khare, 2016), e lesões previamente estabelecidas no campo podem ter sua severidade intensificada durante o armazenamento, especialmente sob condições com maior oscilação térmica e higrométrica.

Em cultivares de hábito de crescimento indeterminado, diferenças iniciais entre sementes formadas em diferentes terços da planta podem refletir-se também no comportamento durante o armazenamento. Assim, a armazenabilidade pode ser influenciada tanto pelas condições pós-colheita e climáticas do ambiente de produção das sementes, mas também pela posição da semente no dossel da planta.

Nesse contexto, torna-se necessária uma abordagem integrada que considere: (i) a variação da qualidade fisiológica das sementes ao longo do dossel; (ii) a influência do ambiente de produção e da interação genótipo × ambiente sobre o desempenho e a uniformidade; e (iii) a dinâmica de deterioração durante o armazenamento. A análise conjunta desses componentes permite descrever diferentes dimensões da qualidade de sementes, a sensibilidade ambiental, a qualidade fisiológica média e a uniformidade dessa qualidade ao longo dos terços do dossel da planta, contribuindo para estratégias de seleção de genótipos de soja destinados à produção de sementes de alta qualidade.

## 2. REFERÊNCIAS

ALLARD, R. W.; BRADSHAW, A. D. Implications of Genotype-Environmental Interactions in Applied Plant Breeding<sup>1</sup>. **Crop Science**, v. 4, n. 5, p. 503–508, set. 1964.

CARRERA, Constanza S.; SAVIN, Roxana; SLAFER, Gustavo A. Critical period for yield determination across grain crops. **Trends in Plant Science**, v. 29, n. 3, p. 329–342, 1 mar. 2024.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: safra 2024/25 – 12º levantamento**. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento, set. 2025. Disponível em: <[https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safra/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos/12o-levantamento-safra-2024-25/e-book\\_boletim-de-safra-12o-levantamento\\_2025.pdf](https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safra/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos/12o-levantamento-safra-2024-25/e-book_boletim-de-safra-12o-levantamento_2025.pdf)>. Acesso em: 12 jan. 2026.

FAN, Yuanfang et al. Soybean (*Glycine max* L. Merr.) seedlings response to shading: leaf structure, photosynthesis and proteomic analysis. **BMC Plant Biology**, v. 19, n. 1, p. 34, dez. 2019.

GAO, Jing et al. Functional consequences of light intensity on soybean leaf hydraulic conductance: Coordinated variations in leaf venation architecture and mesophyll structure. **Environmental and Experimental Botany**, v. 210, p. 105301, jun. 2023.

KRZYZANOWSKI, Francisco Carlos *et al.* (ORGS.). **Vigor de sementes: conceitos e testes**. 2. ed. Londrina: Abrates, 2020.

MAHMOOD, Tariq; BASRA, S. M. Invigoration of low vigor sunflower hybrids by seed priming. **Int. J. Agric. Biol**, v. 11, p. 521–528, 2009.

TRIPATHI, Niraj; KHARE, Dharendra. Molecular approaches for genetic improvement of seed quality and characterization of genetic diversity in soybean: a critical review. **Biotechnology Letters**, v. 38, n. 10, p. 1645–1654, 1 out. 2016.

## Capítulo I. Desuniformidade de maturação e desempenho de sementes de genótipos de soja de hábito de crescimento indeterminado.

### 3. RESUMO

SILVA, Laura Carvalho, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2026. **Desuniformidade de maturação e desempenho de sementes de genótipos de soja de hábito de crescimento indeterminado.** Orientador: Felipe Lopes da Silva. Coorientador: Laércio Junio Silva.

A obtenção de lotes de sementes de alta qualidade é fundamental para a sustentabilidade dos sistemas produtivos, especialmente em cultivares de soja com hábito de crescimento indeterminado, nas quais a sobreposição de fases reprodutivas pode resultar em heterogeneidade de desenvolvimento ao longo do dossel. Nessas cultivares, a posição das vagens na planta pode influenciar a qualidade das sementes, comprometendo a uniformidade dos lotes. Este estudo teve como objetivo investigar a variação da qualidade fisiológica das sementes entre os terços da planta, bem como identificar genótipos com desempenho genético médio superior independentemente da posição de coleta das sementes e quantificar a uniformidade da qualidade fisiológica das sementes dentro de cada genótipo. Foram avaliadas 14 linhagens elite provenientes do Programa de Melhoramento de Soja da Universidade Federal de Viçosa, com sementes produzidas na safra 2024/2025 no município de Capinópolis, Minas Gerais. As sementes foram obtidas da planta inteira e dos terços superior, médio e inferior do dossel, sendo avaliados o grau de umidade, o peso de 100 sementes, a germinação, a viabilidade, o vigor, e diferentes tipos de danos por meio do teste de tetrazólio. Com o objetivo de caracterizar as associações entre variáveis, sintetizar a variação conjunta e comparar o desempenho multivariado dos genótipos, foram realizadas análises de correlação de Pearson, análise de componentes principais (PCA) e agrupamento pelo método *k-means*. A uniformidade da qualidade das sementes entre os terços foi quantificada por meio da distância de Mahalanobis, e a seleção multicaracterística foi conduzida pelo índice FAI-BLUP, com base em valores genotípicos preditos ajustados para o efeito da posição no dossel. As análises evidenciaram associação positiva entre variáveis relacionadas ao desempenho fisiológico e associação negativa entre essas variáveis e danos severos. A PCA revelou ampla variabilidade multivariada entre os genótipos e permitiu a identificação de padrões fisiológicos contrastantes. Observou-se variação consistente da qualidade fisiológica das sementes entre os terços do dossel, cuja magnitude diferiu entre os genótipos avaliados. A distância de Mahalanobis permitiu quantificar o grau de desuniformidade ao longo da planta, evidenciando diferenças expressivas entre os materiais. O índice FAI-BLUP identificou genótipos com desempenho genético médio superior

independentemente da posição no dossel, embora nem sempre associados à maior uniformidade interna. Conclui-se que, no conjunto avaliado, a qualidade fisiológica das sementes variou ao longo do dossel e que os genótipos diferiram quanto à magnitude dessa variação. Desempenho genético médio elevado e uniformidade da qualidade das sementes ao longo do dossel da planta constituíram dimensões complementares do comportamento multivariado dos genótipos analisados.

Palavras-chave: *Glycine max* (L.) Merrill, vigor de sementes, análise de componentes principais, índice FAI-BLUP, uniformidade, posição no dossel.

## **Chapter I. Maturation non-uniformity and seed performance of soybean genotypes with indeterminate growth habit.**

### **4. ABSTRACT**

The production of high-quality seed lots is essential for the sustainability of cropping systems, especially in soybean cultivars with an indeterminate growth habit, in which the overlap of reproductive stages may result in heterogeneous development along the canopy. In these cultivars, pod position on the plant can influence seed quality, potentially compromising lot uniformity. This study aimed to investigate the variation in physiological seed quality among plant thirds, as well as to identify genotypes with superior average genetic performance regardless of seed sampling position and to quantify the vertical uniformity of physiological quality within each genotype. Fourteen elite lines from the Soybean Breeding Program of the Federal University of Viçosa were evaluated, with seeds produced during the 2024/2025 growing season in Capinópolis, Minas Gerais, Brazil. Seeds were collected from the whole plant and from the upper, middle, and lower thirds of the canopy. The following traits were assessed: seed moisture content, 100-seed weight, germination, viability, vigor, and different types of damage determined by the tetrazolium test. To characterize associations among variables, synthesize joint variation, and compare the multivariate performance of genotypes, Pearson correlation analysis, principal component analysis (PCA), and k-means clustering were performed. Vertical uniformity of seed quality was quantified using Mahalanobis distance, and multi-trait selection was conducted using the FAI-BLUP index based on predicted genotypic values adjusted for canopy position effects. The analyses indicated positive associations among variables related to physiological performance and negative associations between these variables and severe damage. PCA revealed substantial multivariate variability among genotypes and enabled the identification of contrasting physiological patterns. Consistent variation in physiological seed quality among canopy thirds was observed, with magnitude differing among genotypes. Mahalanobis distance allowed quantification of the degree of vertical non-uniformity, highlighting expressive differences among materials. The FAI-BLUP index identified genotypes with superior average genetic performance regardless of canopy position, although not always associated with greater internal uniformity. It is concluded that, within the evaluated set, physiological seed quality varied along the canopy and that genotypes differed in the magnitude of this variation. High average genetic performance and vertical uniformity of seed quality represented complementary dimensions of the multivariate behavior of the analyzed genotypes.

Keywords: *Glycine max* (L.) Merr., seed vigor, principal component analysis, FAI-BLUP index, uniformity, canopy position.

## 1. INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* (L.) Merr.) é uma das principais culturas agrícolas mundiais, desempenhando papel crucial na segurança alimentar e na economia global. O Brasil destaca-se no cenário agrícola internacional, com uma produção recorde na safra 2024/25, estimada em mais de 171,5 milhões de toneladas, e área cultivada superior a 47 milhões de hectares, com crescimento de 2,7% em relação à safra anterior (CONAB, 2025). A alta demanda pela commodity, associada à expansão da área plantada, impulsiona a demanda por sementes de alta qualidade, essenciais para sustentar os elevados níveis produtivos.

A semente de alta qualidade configura-se como um insumo essencial para a sustentabilidade da produção, uma vez que apresenta atributos de qualidade reconhecidos mundialmente como fundamentais desde a década de 1960 (Marcos Filho, 2015). Diversos fatores podem influenciar a qualidade das sementes, incluindo luz, temperatura e umidade relativa do ar (Fan et al., 2019; Gao et al., 2023). Esses fatores têm potencial para acelerar o processo de deterioração das sementes, em decorrência de danos por umidade, danos causados por percevejo e danos mecânicos (Golijan Pantovic et al., 2024).

A qualidade fisiológica das sementes é classificada com base em atributos relacionados à germinação e ao vigor, os quais expressam o potencial de desempenho das sementes desde a emergência até o estabelecimento da lavoura (Krzyzanowski et al., 2020). Enquanto a germinação está associada à capacidade da semente originar plântulas normais sob condições favoráveis e controladas de laboratório, o vigor reflete o desempenho das sementes sob condições ambientais desfavoráveis ou de estresse, sendo um indicador mais sensível das diferenças de qualidade entre lotes e genótipos (Krzyzanowski; França-Neto; Henning, 2018).

Existem múltiplos indicadores disponíveis para avaliar o vigor da semente de soja, característica de natureza multifatorial (Ding et al., 2025). Dessa forma, a avaliação desses atributos sob uma abordagem multivariada torna-se fundamental para uma compreensão mais abrangente do desempenho dos lotes/genótipos. Análises multivariadas permitem avaliar de forma simultânea diferentes variáveis de germinação e vigor, possibilitando a identificação de relações, padrões de similaridade e diferenças entre genótipos que não seriam evidentes em análises univariadas (Pinheiro et al., 2022). Essa abordagem torna-se particularmente relevante em cultivares de soja com hábito de crescimento indeterminado, nas quais a desuniformidade de maturação ao longo do dossel tende a ser acentuada (Souza et al., 2020).

Atualmente, grande parte das cultivares de soja plantadas no Brasil apresenta hábito de crescimento indeterminado, principalmente nas regiões Centro e Sul do país, onde se concentra a maior parte das lavouras. Na classificação proposta por Thseng & Hosokawa (1972) para o hábito de crescimento da soja, o número de nós no caule das plantas de

crescimento indeterminado ao final do ciclo é superior ao observado no início do florescimento. Cultivares desse tipo possuem maior período reprodutivo em comparação às do tipo determinado, o que contribui para menor perda produtiva quando expostas a estresses abióticos, como déficit hídrico (Thomas, 2025). Além disso, nas cultivares indeterminadas, o florescimento ocorre primeiro na parte inferior do dossel, progredindo em direção ao topo, o que faz com que as sementes das vagens localizadas na parte inferior da planta permaneçam por mais tempo no campo quando comparadas às vagens da porção superior (Huber et al., 2016). Entretanto, a desuniformidade de maturação apresentada por essas cultivares pode comprometer a qualidade fisiológica das sementes formadas em diferentes terços da planta, uma vez que aquelas que atingem a maturidade primeiro permanecem mais tempo expostas às condições ambientais, enquanto parte das sementes ainda está em desenvolvimento.

Estudos como o de Rambo et al. (2004) evidenciaram que os terços da planta de soja contribuem de maneira distinta para a produtividade. Além disso, Souza et al. (2020) verificaram que, tanto em cultivares de crescimento determinado quanto indeterminado, a maior qualidade de sementes ocorre nos terços superior e médio da planta. De forma complementar, Oliveira et al. (2025) concluíram que a posição das vagens na planta influencia a qualidade fisiológica das sementes, devendo essa característica ser considerada em programas de melhoramento. Apesar desses avanços, ainda há lacunas quanto à compreensão do efeito da desuniformidade de maturação na qualidade das sementes ao longo do dossel, especialmente em cultivares de crescimento indeterminado. Nesse contexto, torna-se relevante avaliar, em linhagens de soja com esse tipo de crescimento, o grau de uniformidade da qualidade das sementes entre os diferentes terços do dossel e entre genótipos.

A compreensão dos padrões de qualidade e, sobretudo, da uniformidade fisiológica das sementes ao longo do dossel é fundamental tanto para a produção de sementes quanto para o melhoramento genético da soja. Na produção de sementes, a desuniformidade fisiológica dentro de lotes pode resultar na presença simultânea de sementes com alto e baixo vigor, dificultando a formação de lotes homogêneos e comprometendo o estabelecimento inicial e o vigor médio das plantas. No contexto do melhoramento genético, a avaliação da uniformidade ao longo da planta permite a identificação de linhagens com maior capacidade de produzir sementes de alta qualidade fisiológica de forma consistente, contribuindo para a seleção de genótipos que aliem elevado desempenho produtivo à estabilidade e à uniformidade da qualidade das sementes.

Neste contexto, o objetivo do trabalho foi investigar a influência da posição da semente no dossel sobre a qualidade fisiológica, identificar genótipos com desempenho genético médio superior independentemente da posição de coleta das sementes e quantificar a uniformidade da qualidade fisiológica das sementes dentro de cada genótipo.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Material vegetal e caracterização do ambiente de produção

Para a condução deste estudo, foram utilizadas 14 linhagens elite com hábito de crescimento indeterminado, provenientes do Programa de Melhoramento de Soja da Universidade Federal de Viçosa (UFV). Os genótipos avaliados apresentaram valores de Grupo de Maturidade Relativa (GMR) estimado variando de 4,8 a 6,1 (Tabela 1). As sementes foram produzidas na safra 2024/25 no município de Capinópolis, Minas Gerais, e o experimento foi conduzido na Central de Experimentação, Pesquisa e Extensão do Triângulo Mineiro (CEPET-UFV), pertencente à UFV, localizado a 18.72105° S, 49.55327° W.

Os dados climáticos diários foram obtidos, visando caracterizar as condições ambientais às quais as plantas estiveram submetidas em campo. Essas informações foram extraídas da base NASA POWER, com o auxílio do pacote *EnvRtype* (Costa-Neto et al., 2021), no ambiente R (R Core Team, 2025). Foram coletadas informações de temperatura média, máxima e mínima do ar e precipitação (Figura 1).

**Tabela 1** – Linhagens e seus respectivos valores de Grupo de Maturidade Relativa (GMR) estimado

Genótipo	GMR estimado
G1	4,8
G2	5,3
G3	5,4
G4	5,5
G5	5,6
G6	5,6
G7	5,9
G8	5,9
G9	5,9
G10	6,0
G11	6,0
G12	6,1
G13	6,1
G14	6,1

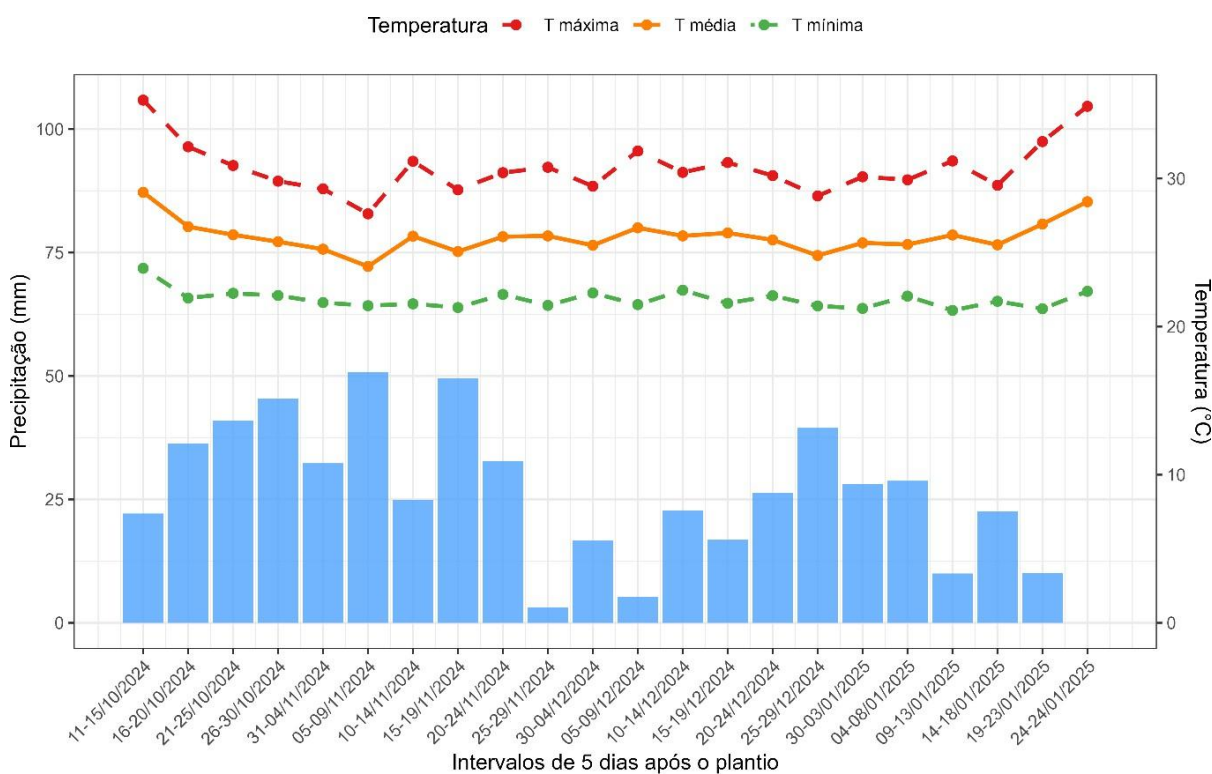


Figura 1 – Precipitação acumulada e temperaturas do ar máxima, média e mínima em intervalos consecutivos de cinco dias, no período de condução do experimento na Central de Experimentação, Pesquisa e Extensão do Triângulo Mineiro (CEPET-UFV), localizada no município de Capinópolis, no estado de Minas Gerais. As barras representam a precipitação total acumulada em cada intervalo, enquanto as linhas e pontos indicam as temperaturas máxima, média e mínima, expressas como médias do período.

## 2.2. Colheita

A colheita das linhagens em Capinópolis foi realizada em um único dia, enquanto em Viçosa ocorreu em um intervalo de sete dias. A colheita das plantas foi realizada manualmente. Para cada linhagem, o feixe de plantas foi dividido em quatro grupos para posterior realização da trilha mecânica. Um quarto do feixe foi trilhado integralmente, conforme o procedimento convencional, constituindo o tratamento denominado Planta Inteira (PI). Os três quartos restantes foram submetidos ao corte individual das plantas, com o objetivo de separar os terços superior, médio e inferior. Para essa separação, realizou-se a contagem do número total de nós de cada planta, dividindo-se esse valor por três, de modo a garantir que cada terço apresentasse, o mais próximo possível, o mesmo número de nós. As porções correspondentes a cada terço foram agrupadas e trilhadas separadamente, originando os tratamentos Terço Superior (TS), Terço Médio (TM) e Terço Inferior (TI), conforme ilustrado na Figura 2.

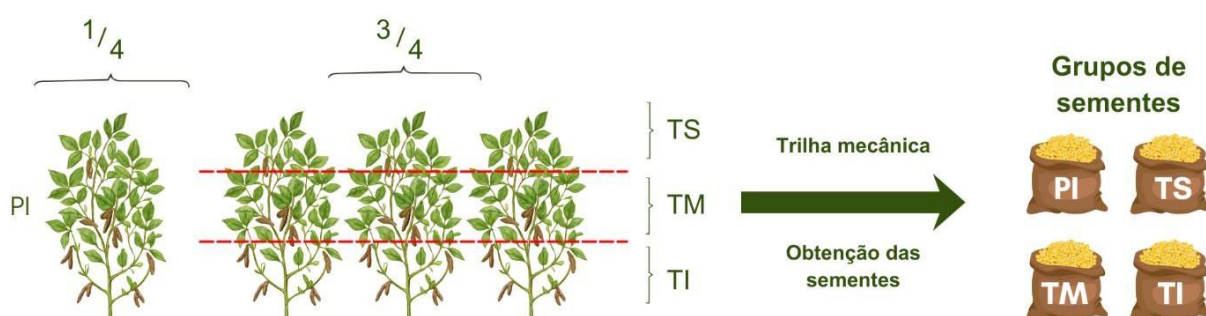


Figura 2 – Representação esquemática da obtenção dos quatro grupos de sementes: planta inteira (PI) e os diferentes terços do dossel, terço superior (TS), terço médio (TM) e terço inferior (TI).

### 2.3. Avaliação da qualidade fisiológica das sementes

#### 2.3.1. Grau de umidade e Peso de 100 sementes

O grau de umidade das sementes foi determinado por meio de leituras diretas utilizando o medidor de umidade de grãos John Deere Moisture Meter, com precisão de  $\pm 0,5\%$  na faixa usual de umidade para grãos armazenados. As medições foram expressas em porcentagem (%).

Em seguida, foi determinado o peso de 100 sementes, utilizando-se uma repetição de 100 sementes, tomada aleatoriamente no volume total das sementes de cada porção, contadas manualmente e pesadas em balança de precisão.

#### 2.3.2. Teste de Germinação

O teste de germinação foi conduzido com quatro repetições de 50 sementes, distribuídas em rolos de papel para germinação umedecidos com um volume de água destilada equivalente a 2,5 vezes o peso do papel seco. Os rolos foram mantidos em germinador a 25 °C. As avaliações foram efetuadas no quinto e no oitavo dia após a montagem do teste, de acordo com a metodologia descrita nas Regras para Análises de Sementes (Brasil, 2025). Os resultados foram expressos em porcentagem de plântulas normais, sendo os valores obtidos no quinto dia referentes à primeira contagem de germinação (PCG) e os do oitavo dia à germinação (Germ).

#### 2.3.3. Teste de Tetrazólio

O teste de tetrazólio foi realizado conforme a metodologia descrita por França-Neto e Krzyzanowski (2018), utilizando-se duas repetições de 50 sementes. Inicialmente, as sementes foram submetidas ao pré-condicionamento em rolos de papel para germinação umedecidos com volume de água destilada equivalente a 2,5 vezes o peso do papel seco. Os rolos foram mantidos em germinador a 25 °C, por 16 horas.

Posteriormente, as sementes foram submersas em solução de tetrazólio (2-3-5, cloreto de trifênil tetrazólio) a 0,075%, acondicionadas em béqueres plásticos e mantidas em câmara

BOD, no escuro, a 38°C por aproximadamente 120 minutos. Após a coloração, as sementes foram lavadas com água corrente e mantidas submersas em água até o momento da avaliação.

Cada semente foi avaliada individualmente, sendo seccionada longitudinalmente ao longo do eixo embrionário com o auxílio de estilete. Foram observadas as superfícies externa e interna dos cotilédones e do eixo embrionário, considerando a coloração dos tecidos, a presença, tipo e a localização dos danos. A partir dessa avaliação, cada semente foi classificada em uma das oito classes, conforme a metodologia descrita por França-Neto e Krzyzanowski (2018).

As variáveis fisiológicas foram expressas em porcentagem de sementes (%). O vigor foi determinado pela proporção de sementes classificadas nas classes 1 a 3, enquanto a viabilidade (Viab) correspondeu à proporção de sementes das classes 1 a 5. Os danos mecânicos, danos por umidade e danos por percevejo foram avaliados considerando-se duas abordagens: danos de amplo espectro e danos severos. Os danos de amplo espectro corresponderam à presença de danos nas sementes das classes 1 a 8, enquanto os danos severos incluíram apenas as sementes das classes 6 a 8. Essas variáveis foram expressas, respectivamente, como DM18, DU18 e DP18, para danos amplos; e DM68, DU68 e DP68 para danos severos, conforme a metodologia descrita por França-Neto e Krzyzanowski (2018).

#### 2.4. Análises estatísticas

Os dados foram organizados e analisados por meio da linguagem de programação R (R Core Team, 2025), utilizando-se os pacotes *tidyverse* (Wickham et al., 2019) para manipulação dos dados, *FactoMineR* (Lê; Josse; Husson, 2008) e *factoextra* (Kassambara; Mundt, 2020) para análises multivariadas, *emmeans* (Lenth; Piaskowski, 2025) para obtenção de médias ajustadas em modelos lineares, *corrplot* (Wei; Simko, 2021) para análise de correlação, *lme4* (Bates et al., 2015) para ajuste de modelos lineares mistos e obtenção dos valores genotípicos preditos (BLUPs), *MASS* (Venables; Ripley, 2002) para operações matriciais, *heatmap* (Kolde, 2019) para construção de mapas de calor.

Os dados foram organizados por genótipo e por posição da semente na planta, considerando planta inteira (PI) e os terços superior (TS), médio (TM) e inferior (TI) do dossel. Para fins descritivos, foram determinados os valores mínimo, máximo e média geral das variáveis avaliadas, bem como o coeficiente de variação (CV) entre os terços (TS, TM e TI), com o objetivo de caracterizar a amplitude e a variabilidade dos dados ao longo do dossel.

As variáveis de qualidade fisiológica e o peso de 100 sementes foram submetidas à análise de variância considerando delineamento em blocos completos, em que os terços da planta (TS, TM e TI) foram considerados como tratamentos e os genótipos como blocos. Foi

adotado modelo linear aditivo, incluindo os efeitos de Terço e Genótipo, com uma observação por combinação tratamento  $\times$  bloco. As médias dos terços foram obtidas a partir do modelo por meio de estimativas de médias ajustadas (*estimated marginal means*), utilizando o pacote *emmeans* no ambiente R. Quando detectadas diferenças entre tratamentos, as médias ajustadas foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. A normalidade dos resíduos foi verificada pelo teste de Shapiro–Wilk.

Para as variáveis relacionadas aos danos mecânicos, danos por umidade e danos por percevejo, devido à elevada variabilidade e à distribuição assimétrica dos dados, optou-se por abordagem descritiva. Foram apresentadas as médias por terço obtidas a partir dos valores observados nos diferentes genótipos, com a finalidade de caracterizar a distribuição dos danos ao longo do dossel. Para essas variáveis, não foram realizadas comparações estatísticas entre os terços.

Para a caracterização do desempenho médio dos genótipos, foram calculadas médias descritivas das variáveis avaliadas, considerando os valores observados nos diferentes terços da planta (PI, TS, TM e TI) para cada genótipo. Adicionalmente, foi determinado o coeficiente de variação (CV) das variáveis entre os terços da planta, calculado individualmente para cada genótipo com base nos valores observados nos terços TS, TM e TI, a fim de estimar a magnitude da variação ao longo do dossel.

A associação entre as variáveis avaliadas foi investigada por meio de análise de correlação de Pearson. Para essa etapa, foi adotada a mesma estrutura de modelo linear aditivo utilizada na análise de variância, incluindo os efeitos de Terço e Genótipo para cada variável, com o objetivo de remover a influência da posição da semente na planta. A partir desses modelos, foram estimadas médias ajustadas por genótipo (*estimated marginal means*), utilizando o pacote *emmeans*. As correlações foram então calculadas com base nessas médias ajustadas, considerando os genótipos como unidades amostrais. A significância das correlações foi avaliada pelo teste t associado ao coeficiente de Pearson ( $p \leq 0,05$ ). A matriz de correlação foi representada graficamente com o pacote *corrplot*.

Com o objetivo de reduzir a dimensionalidade do conjunto de variáveis e subsidiar a identificação de grupos de genótipos com padrões semelhantes, foi realizada a análise de componentes principais (PCA), utilizando-se a função PCA do pacote *FactoMineR*. A análise foi conduzida com base na matriz de médias das variáveis por genótipo. Os dados foram previamente padronizados (média zero e variância unitária), de modo que a PCA foi realizada a partir da matriz de correlação. A decomposição foi efetuada por meio de autovalores e autovetores. O número de componentes principais considerados foi avaliado com base nos autovalores e na proporção da variância explicada por cada componente. As representações gráficas foram elaboradas com o auxílio do pacote *factoextra*.

A análise de agrupamento foi realizada pelo método *k-means*, aplicado aos escores

padronizados dos componentes principais selecionados. O número ótimo de grupos foi definido por meio do método da silhueta (*Silhouette Score*), que avalia simultaneamente a coesão interna e a separação entre *clusters*, sendo valores mais elevados indicativos de melhor qualidade do agrupamento (Kaufman; Rousseeuw, 2009; Rousseeuw, 1987). Os resultados foram visualizados por meio da projeção dos dois primeiros componentes principais, com inclusão das elipses representando os agrupamentos.

Adicionalmente, visando comparar a distribuição relativa das variáveis entre os terços do dossel e os grupos formados, foi construído um *heatmap* facetado por grupo. Os valores foram padronizados por variável (z-score), considerando todas as combinações grupo × terço, de modo que as cores representam desvios relativos em relação à média global da variável. Essa abordagem permite comparar simultaneamente diferenças entre grupos e variações ao longo dos terços do dossel.

A distância de Mahalanobis (De Maesschalck; Jouan-Rimbaud; Massart, 2000) foi utilizada para quantificar a uniformidade multivariada entre os terços da planta dentro de cada genótipo. Para cada genótipo, foi definido o centróide multivariado a partir das variáveis avaliadas. A distância de cada terço da planta (TS, TM e TI) foi estimada em relação a esse centro, utilizando matriz de covariância global calculada com base no conjunto total de observações. A média das distâncias foi utilizada como índice de desuniformidade da qualidade das sementes ao longo da planta, sendo valores menores indicativos de maior homogeneidade entre os terços. A distância foi calculada conforme:

$$D^2 = (x - \mu)^T \Sigma^{-1} (x - \mu)$$

em que  $x$  representa o vetor de médias das variáveis avaliadas para cada terço da planta,  $\mu$  corresponde ao centróide multivariado do genótipo, e  $\Sigma^{-1}$  é a inversa da matriz de covariância global estimada a partir do conjunto total de observações.

A seleção multicaracterística dos genótipos foi realizada por meio do índice FAI-BLUP (*Factor Analysis and Ideotype-based Best Linear Unbiased Prediction*), conforme proposto por Rocha, Machado e Carneiro (2018). Inicialmente, para cada característica, foram ajustados modelos lineares mistos considerando a posição no dossel (PI, TS, TM e TI) como efeito fixo e o genótipo como efeito aleatório, utilizando a função *lmer* do pacote *lme4*. A partir desses modelos, foram obtidos os valores genotípicos preditos (BLUPs), que foram organizados em uma matriz genótipo × características e utilizados como entrada para o índice. O FAI-BLUP combina análise fatorial com cálculo da distância ao ideótipo. Foram retidos fatores com autovalores  $\geq 1$  (Kaiser, 1960), com aplicação de rotação varimax para melhor interpretação da estrutura fatorial. A partir dos escores fatoriais, foi calculada a distância entre cada genótipo

e o ideótipo previamente definido. O ideótipo foi estabelecido priorizando a maximização das características relacionadas à germinação, primeira contagem de germinação, vigor, viabilidade e peso de 100 sementes, e a minimização das variáveis associadas a danos mecânicos, por umidade e por percevejo. A seleção final considerou os seis genótipos mais próximos do ideótipo estabelecido.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados descritivos da qualidade fisiológica das sementes utilizados como base para as análises multivariadas, incluindo os valores médios das variáveis avaliadas por genótipo e por terço, as médias gerais e os coeficientes de variação entre os terços da planta, encontram-se apresentados no Apêndice B.

O grau de umidade das sementes variou de 12,8 até 16,3% no momento da colheita, sendo que as sementes foram secas naturalmente até a umidade de equilíbrio em ambiente de laboratório.

A análise descritiva apresentada na Tabela 2 indica que as médias gerais de germinação e de primeira contagem de germinação (PCG) foram inferiores ao valor mínimo de 80% exigido para a comercialização de sementes de soja no Brasil (Brasil, 2013). Em contraste, a viabilidade média foi elevada e associada a um baixo coeficiente de variação entre os terços da planta, indicando menor variação ao longo do dossel. Os valores de viabilidade apresentaram menor amplitude do que os valores de germinação. De acordo com Oliveira et al. (2005), essa diferença pode estar relacionada à limitação do teste de tetrazólio em detectar a presença de microrganismos, os quais podem reduzir o desempenho das sementes no teste de germinação. Ainda que haja uma superestimação da viabilidade, o teste de tetrazólio é uma ferramenta importante para a identificação de danos que afetam a qualidade fisiológica das sementes (Veiga; Hennipman; De Carvalho, 2020).

De forma semelhante à viabilidade, o peso de 100 sementes (P100) apresentou baixo coeficiente de variação entre os terços, refletindo uma distribuição mais uniforme dessa característica na planta. O valor mínimo observado foi de 11,64 g e o máximo de 19,91 g, evidenciando amplitude de variação no peso de 100 sementes.

De modo geral, a posição da semente no dossel mostrou-se associada principalmente ao desempenho fisiológico e à ocorrência de danos severos, os quais apresentaram coeficientes de variação elevados, indicando ocorrência irregular e desuniforme. Por outro lado, os danos classificados como amplos apresentaram médias elevadas e coeficientes de variação mais reduzidos em comparação aos danos severos, sugerindo maior uniformidade de ocorrência. Esse comportamento pode estar relacionado às condições climáticas do ambiente de produção das sementes. De acordo com Costa et al. (2005), o clima ideal para a

produção de sementes de alta qualidade é caracterizado por temperaturas amenas e baixa precipitação no período entre a maturação e a colheita, condições que não foram observadas durante a produção das sementes em Capinópolis, onde ocorreram temperaturas elevadas e precipitações até os últimos dias do ciclo da cultura (Figura 1).

**Tabela 2** – Valores mínimo, máximo, média geral e coeficiente de variação (CV) de dados de germinação, vigor e presença de danos em sementes obtidas dos diferentes terços das plantas.

Variável	Mínimo	Máximo	Média geral	CV entre terços (%)
Germ (%)	28,50	91,00	61,11	19,01
PCG (%)	21,5	81,00	52,45	21,57
Vigor (%)	37,00	78,00	56,73	13,77
Viab (%)	57,00	99,00	83,71	7,64
DM18 (%)	23,00	82,00	54,29	17,19
DM68 (%)	0,00	21,00	8,71	48,47
DU18 (%)	21,00	88,00	62,66	25,32
DU68 (%)	0,00	22,00	9,03	53,16
DP18 (%)	4,00	57,00	20,57	35,24
DP68 (%)	0,00	20,00	4,92	70,49
P100 (g)	11,64	19,91	15,78	4,42
U (%)	12,80	16,30	13,98	4,31

Nota: Germ = germinação; PCG = primeira contagem de germinação; Vigor = vigor avaliado por meio do teste de tetrazólio; Viab = viabilidade avaliada por meio do teste de tetrazólio; DM18 e DM68 = danos mecânicos classificados nas classes de 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente; DU18 e DU68 = danos por umidade classificados nas classes de 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente; DP18 e DP68 = danos por percevejo classificados nas classes de 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente; P100 = peso de 100 sementes; U = grau de umidade.

A comparação das médias ajustadas (Tabela 3) indicou que o terço superior do dossel apresentou maiores valores de germinação e PCG em relação aos terços médio e inferior, os quais não diferiram entre si. A variável vigor não apresentou diferença entre os terços. Para viabilidade, observou-se diferença entre o terço superior e o inferior, enquanto o terço médio apresentou comportamento intermediário. O peso de 100 sementes também diferiu entre os terços, com valor superior no terço médio e inferior no terço superior.

**Tabela 3** – Médias ajustadas das variáveis de qualidade fisiológica e peso de 100 sementes em função do terço da planta.

Variável	Terço superior (TS)	Terço Médio (TM)	Terço Inferior (TI)
Germ (%)	70,89 a	57,50 b	52,32 b
PCG (%)	62,14 a	48,75 b	44,86 b
Vigor (%)	59,29 a	54,07 a	54,07 a
Viab (%)	87,86 a	83,64 ab	79,14 b
P100 (g)	15,10 b	16,00 a	15,70 ab

Nota: Médias ajustadas (*emmeans*) seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). Germ = germinação; PCG = primeira contagem de germinação; Vigor = vigor avaliado por meio do teste de tetrazólio; Viab = viabilidade avaliada por meio do teste de tetrazólio; P100 = peso de 100 sementes.

As variáveis relacionadas aos danos apresentaram distribuição assimétrica e elevados coeficientes de variação. As médias descritivas da Tabela 4 indicaram maior ocorrência de danos mecânicos e de danos por percevejo nos terços médio e inferior, enquanto os danos por umidade foram mais frequentes no terço superior do dossel, sugerindo padrões distintos de distribuição dos diferentes tipos de dano ao longo da planta.

**Tabela 4** – Médias descritivas da frequência de danos mecânicos, por umidade e por percevejo em sementes, em função do terço da planta.

Variável	Terço superior (TS)	Terço Médio (TM)	Terço Inferior (TI)
DM18 (%)	46,64	56,21	58,71
DM68 (%)	6,79	8,64	10,50
DU18 (%)	74,93	64,36	49,57
DU68 (%)	7,64	9,57	9,71
DP18 (%)	14,50	23,29	26,43
DP68 (%)	2,43	5,29	8,43

Nota: As médias apresentadas correspondem às médias observadas por terço, calculadas a partir dos valores obtidos nos diferentes genótipos, sendo utilizadas exclusivamente para descrição da distribuição dos danos ao longo do dossel. Não foram realizadas comparações estatísticas entre os terços. DM18 e DM68 = danos mecânicos classificados nas classes de 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente; DU18 e DU68 = danos por umidade classificados nas classes de 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente; DP18 e DP68 = danos por percevejo classificados nas classes de 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente.

Além das variações associadas à posição da semente na planta, observaram-se diferenças nos valores médios entre os genótipos (Tabela B4), evidenciando variação no desempenho fisiológico das sementes, na ocorrência de danos e no peso de 100 sementes. O genótipo G4 destacou-se pelo melhor desempenho global, apresentando os maiores valores médios de germinação, PCG, vigor e viabilidade, associados a baixos percentuais de danos severos, especialmente danos por umidade e por percevejos. Em contraste, os genótipos G6, G7, G13 e G14 apresentaram menores médias de germinação e PCG, além de maiores frequências de danos mecânicos e por percevejo, indicando qualidade física e fisiológica inferior. Genótipos como G2, G3, G5, G8 e G9 apresentaram valores moderados de germinação e vigor, porém com elevada ocorrência de danos amplos por umidade.

O peso de 100 sementes (P100) variou entre os genótipos avaliados, porém essa variação não acompanhou diretamente o desempenho fisiológico, sugerindo que o tamanho da semente, isoladamente, não foi determinante da qualidade observada. Considerando os valores de P100 no tratamento correspondente ao terço planta inteira (PI), que representa o manejo convencional de colheita de sementes de soja, observou-se ampla variação entre os materiais (Tabela B2). Os genótipos G2 e G6 apresentaram os maiores valores, ambos superiores a 19 g, enquanto G1, G4, G7 e G8 registraram os menores pesos, inferiores a 14g. Os demais genótipos situaram-se em uma faixa intermediária, com valores entre 14 e 19 g.

No que se refere especificamente à germinação, apenas o genótipo G4 apresentou valor médio superior a 80% (Tabela B4), mínimo exigido para a comercialização de sementes (Brasil, 2013). Os genótipos G3, G8 e G2 apresentaram percentuais entre 70 e 76%, enquanto os demais genótipos apresentaram valores inferiores a 70%.

A análise descritiva da variabilidade entre os terços da planta (Tabela B5) indicou diferenças nos coeficientes de variação entre genótipos. Genótipos como G4, G12 e G14 apresentaram menores coeficientes de variação para germinação, vigor e viabilidade, indicando menor dispersão dos valores dessas variáveis ao longo do dossel. Por outro lado, genótipos como G1, G6, G7, G10 e G13 apresentaram coeficientes de variação mais elevados para essas variáveis, indicando maior variação entre os terços da planta. Para as variáveis relacionadas aos danos, observaram-se coeficientes de variação elevados para a maioria dos genótipos, especialmente para os danos severos (classes 6 a 8), sugerindo ocorrência irregular e comportamento distinto entre genótipos. Em conjunto, os resultados descritivos indicam que os genótipos diferem quanto aos valores médios das variáveis analisadas e quanto à magnitude da variação ao longo do dossel.

Complementarmente à análise da variabilidade, a matriz de correlação de Pearson foi utilizada para investigar as associações entre as variáveis avaliadas (Figura 3). As variáveis relacionadas à qualidade fisiológica das sementes (germinação, PCG, vigor e viabilidade) apresentaram correlações positivas entre si, indicando consistência entre os testes utilizados.

As variáveis de danos de amplo espectro não apresentaram correlação significativa com as variáveis de qualidade fisiológica, sugerindo que a intensidade geral dos danos não está diretamente associada à redução da viabilidade das sementes. Em contraste, de modo geral, os danos severos apresentaram, em sua maioria, correlação negativa e significativa com as variáveis fisiológicas, indicando que o aumento da severidade dos danos está relacionado à redução do vigor, da viabilidade, da PCG e da germinação.

Conforme observado na Tabela 3, de modo geral, as sementes apresentaram médias elevadas de danos mecânicos e danos por umidade. A semente de soja possui um tegumento relativamente fino, o que confere proteção limitada às estruturas internas do embrião, principalmente a radícula, tornando-a mais suscetível à ocorrência de danos mecânicos em regiões vitais. Dessa forma, mesmo danos mecânicos de pequena magnitude podem ser suficientes para reduzir a germinação em lotes de sementes em 1 a 2 pontos percentuais (Costa et al., 2005). Os danos por umidade também interferem negativamente no potencial fisiológico das sementes, sendo a intensidade desse efeito dependente da extensão e da localização do dano no tecido embrionário (Forti et al., 2013). Embora os danos por percevejo tenham apresentado médias inferiores às observadas para os danos mecânicos e por umidade, sua ocorrência não deve ser negligenciada, uma vez que a lesão provocada pela picada do inseto, dependendo do local e da intensidade, pode tornar a semente incapaz de germinar, especialmente quando atinge a região do eixo embrionário (França-Neto; Krzyzanowski; Costa, 1998). Além disso, a correlação positiva entre DP18 e DP68 (Figura 3) indica que a ocorrência de ataques por percevejos está relacionada ao aumento da severidade dos danos, com potencial comprometimento da viabilidade das sementes.

Observou-se ainda, na matriz de correlação de Pearson, correlação negativa entre DM18 e DU18 (Figura 3), indicando que, de forma geral, maiores níveis de dano mecânico amplo estiveram associados a menores níveis de dano por umidade amplo, o que pode estar relacionado ao maior tamanho das sementes nos terços médio e inferior e, conseqüentemente, maior suscetibilidade aos danos mecânicos (Bianchi et al., 2022). Esse resultado contrasta com o observado por França Neto e Henning (1984), que relataram aumento da incidência de danos mecânicos em sementes deterioradas por umidade, em função da maior fragilidade estrutural dessas sementes e de sua maior suscetibilidade aos impactos mecânicos. Por outro lado, DM68 apresentou correlação positiva com DU68 e DP68, indicando que danos mecânicos de maior severidade tendem a ocorrer associados também a outros tipos de danos severos.

Por fim, o P100 não apresentou correlação significativa com as demais variáveis avaliadas, indicando que o peso da semente não esteve associado ao aumento da ocorrência de danos nem ao desempenho fisiológico. Resultados semelhantes foram observados por Wang et al. (2025) que não verificaram diferenças significativas na germinação entre

sementes de diferentes tamanhos. Em contraste, Bianchi et al. (2022) relataram melhor desempenho fisiológico em sementes de maior tamanho. Essas diferenças entre estudos podem estar relacionadas às condições ambientais de produção, uma vez que sementes maiores tendem a apresentar maior acúmulo de reservas e podem apresentar vantagem adaptativa após a emergência (Abu Seif et al., 2016), sem que isso necessariamente se traduza em diferenças na germinação ou no vigor avaliados em condições controladas.

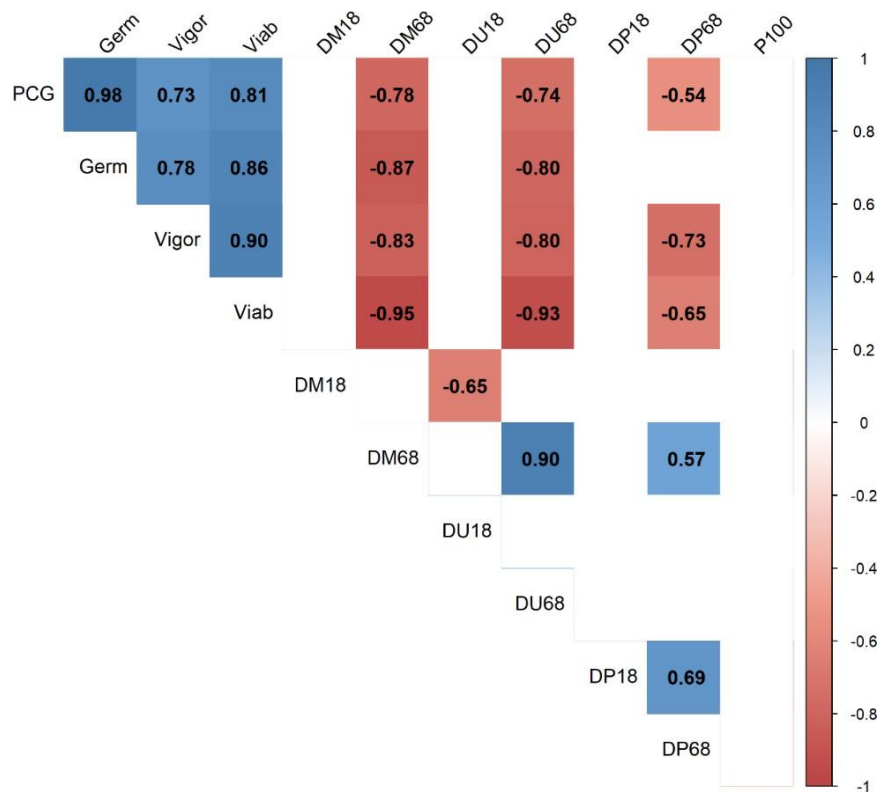


Figura 3 – Matriz dos coeficientes de correlação de Pearson entre variáveis de qualidade fisiológica e de danos em sementes. Os valores apresentados correspondem aos coeficientes de correlação linear ( $r$ ), variando de  $-1$  a  $1$ , sendo as correlações positivas representadas em tons de azul e as negativas em tons de vermelho. Foram apresentados apenas os coeficientes de correlação significativos pelo teste  $t$  ( $p \leq 0,05$ ). Germ = germinação; PCG = primeira contagem de germinação; Vigor = vigor avaliado por meio do teste de tetrazólio; Viab = viabilidade avaliada por meio do teste de tetrazólio; DM18 e DM68 = danos mecânicos classificados nas classes de 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente; DU18 e DU68 = danos por umidade classificados nas classes de 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente; DP18 e DP68 = danos por percevejo classificados nas classes de 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente; P100 = peso de 100 sementes.

A presença de correlações entre as variáveis indica interdependência estatística,

justificando o emprego da análise de componentes principais, técnica que permite a redução de dimensionalidade e síntese da variação conjunta (Dormann et al., 2013). Os oito primeiros componentes apresentaram autovalores superiores a 1, atendendo ao critério de Kaiser (Kaiser, 1960) (Tabela A1). Os autovalores, bem como a variância explicada e acumulada de cada componente, estão apresentados no Apêndice A (Tabela A1). Entretanto, a interpretação foi concentrada nos dois primeiros componentes, por reunirem a maior parcela da variância total (54,2%) e permitirem a visualização gráfica e análise dos padrões multivariados entre os genótipos.

A projeção dos genótipos no plano formado pelos dois primeiros componentes principais (Figura 4A) revelou ampla variabilidade multivariada dos materiais avaliados. Considerando o conjunto de variáveis analisadas, quanto maior a proximidade dos genótipos, maior a semelhança de seus perfis, enquanto maiores distâncias indicam maior divergência multivariada. Os pontos foram coloridos de acordo com o valor de  $\cos^2$ , que representa a qualidade de representação dos genótipos no plano PC1 x PC2, indicando que a maior parte dos genótipos foi bem representada. A estrutura observada na PCA sugere a existência de grupos com perfis multivariados distintos, explorados a seguir.

A análise do biplot (Figura 4B) evidenciou que o primeiro componente principal (Dim1) representa um gradiente associado à qualidade fisiológica das sementes. Os vetores correspondentes às variáveis de germinação, primeira contagem, vigor e viabilidade, especialmente nos terços médio e inferior, apresentaram maior projeção no sentido positivo de Dim1. Nesse contexto, genótipos posicionados à direita do gráfico, como G4, mostraram associação positiva com essas variáveis, indicando perfil multivariado caracterizado por maior desempenho fisiológico.

Em contraste, variáveis relacionadas aos danos mecânicos, por umidade e por percevejo apresentaram vetores orientados predominantemente no sentido oposto ou com maior projeção vertical, contribuindo para a definição do segundo componente principal (Dim2). Genótipos como G7 e G8, posicionados em regiões próximas a esses vetores, evidenciaram associação com maiores valores relativos dessas variáveis, caracterizando perfil multivariado distinto daquele observado para os genótipos associados à qualidade fisiológica.

A disposição dos genótipos no plano PC1 x PC2 indica, portanto, a existência de um gradiente multivariado que contrapõe desempenho fisiológico e intensidade de danos, sendo que a maior parte dos materiais se concentra em região intermediária, enquanto poucos genótipos apresentam padrões mais divergentes.

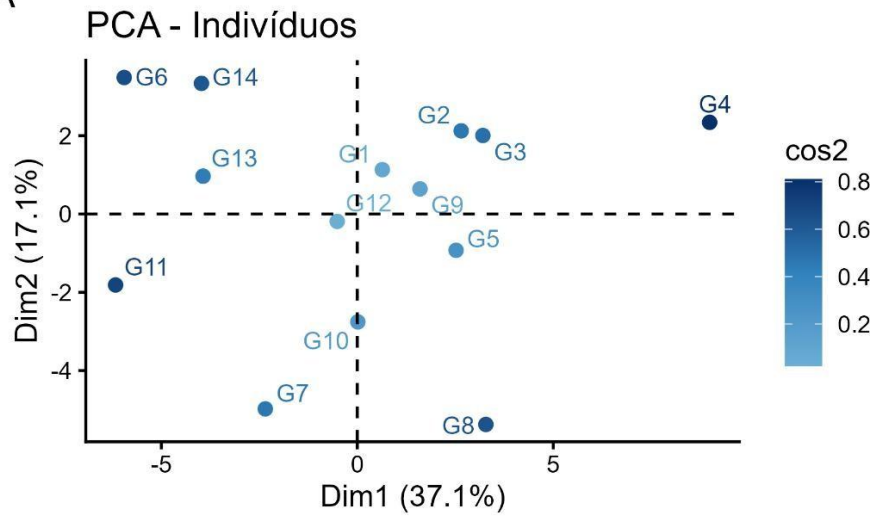
A análise de agrupamento pelo método *k-means*, aplicada aos escores dos componentes principais, resultou na formação de três grupos distintos de genótipos (Figura 4C), reforçando a existência de perfis fisiológicos distintos e corroborando com a estrutura

observada na análise de componentes principais. O número ótimo de grupos foi definido com base no método da silhueta, que indicou  $k=3$  como a solução mais adequada, conforme apresentado no Apêndice A (Figura A1).

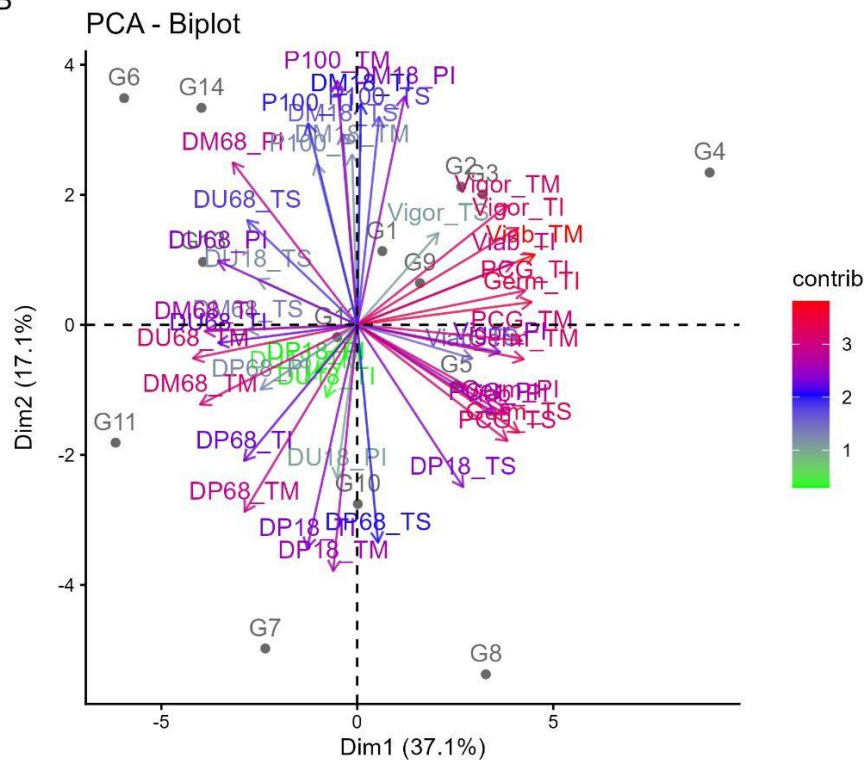
A distribuição dos genótipos entre os três grupos formados revelou uma distribuição assimétrica, com a maior parte dos materiais concentrada em um único grupo e poucos genótipos formando agrupamentos isolados. Essa configuração sugere que a variabilidade multivariada entre os genótipos avaliados não é uniforme, estando associada principalmente a materiais com perfis mais extremos no espaço dos componentes principais. O grupo majoritário reúne genótipos com posicionamento intermediário no gradiente definido por Dim1, caracterizado por equilíbrio entre variáveis de qualidade fisiológica e intensidade de danos. A posição de G6 no quadrante associado a menores valores relativos de variáveis de qualidade fisiológica e maior proximidade com vetores relacionados a danos indica perfil contrastante em relação aos genótipos concentrados no grupo principal. Genótipos como G7 e G8 apresentaram maior proximidade com vetores associados a danos mecânicos, por umidade e por percevejos, indicando padrão multivariado caracterizado por maior intensidade relativa dessas variáveis.

A formação dos grupos reflete diretamente a orientação e a contribuição dos vetores no biplot, indicando que os agrupamentos resultam das combinações específicas das variáveis que definem os componentes principais. Assim, os grupos representam padrões multivariados distintos entre os genótipos. Esses padrões são descritos a seguir, por meio da análise do perfil médio das variáveis ao longo dos terços do dossel em cada grupo.

A



B



C

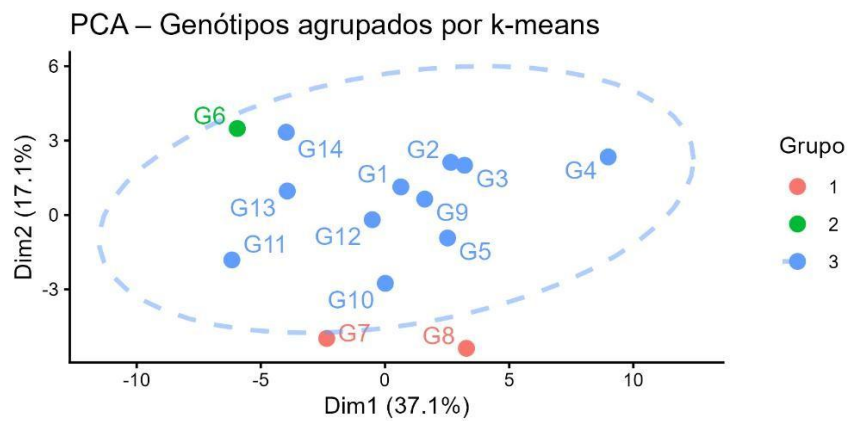


Figura 4 – Análise de componentes principais (PCA). (A) Gráfico dos indivíduos projetados no plano formado pelos dois primeiros componentes principais (PC1 e PC2). (B) Biplot da PCA, mostrando simultaneamente a projeção dos genótipos e das variáveis no plano formado pelas dimensões Dim1 e Dim2. As setas representam as variáveis originais, cuja direção e comprimento indicam a contribuição e a associação com as dimensões, sendo a escala de cores proporcional à contribuição das variáveis (contrib). (C) Projeção dos genótipos no plano Dim1 × Dim2, com agrupamento realizado pelo método *k-means*, sendo o número ótimo de grupos definido pelo método da silhueta, resultando em três grupos.

O *heatmap* facetado (Figura 5) apresenta as médias padronizadas por variável (z-score), calculadas considerando todas as combinações grupo × terço. Dessa forma, as cores representam o desvio relativo em relação à média global de cada variável. Essa padronização permite comparar simultaneamente diferenças entre os grupos formados pelo *k-means* e padrões de distribuição das variáveis ao longo dos terços do dossel.

Em relação ao peso de 100 sementes (P100), observou-se que o Grupo 1 apresentou valores relativos inferiores tanto na planta inteira quanto nos diferentes terços, quando comparado aos demais grupos, enquanto o Grupo 2 apresentou os maiores valores relativos para essa variável. Entretanto, dentro de cada grupo, a variação entre os terços foi pouco acentuada, indicando distribuição relativamente uniforme ao longo do dossel. Era esperado que sementes provenientes de vagens localizadas no terço superior de linhagens com hábito de crescimento indeterminado apresentassem menor tamanho, em função do menor tempo disponível para o enchimento das sementes (Carrão-Panizzi et al., 2020). De fato, observou-se que o terço superior apresentou sementes ligeiramente menores (Tabela 4). De acordo com Kato et al. (2018), apesar da maior duração do florescimento em plantas de crescimento indeterminado, as sementes oriundas de flores tardias, localizadas nos estratos superiores, conseguem atingir pesos semelhantes aos das sementes formadas precocemente no terço inferior, em razão de um enchimento compensatório. Assim, a proporção de sementes pequenas é reduzida em relação ao total de sementes colhidas.

Comportamento semelhante foi observado para as variáveis relacionadas a danos mecânicos (DM18 e DM68), que apresentaram variação relativa mais moderada entre os terços dentro de cada grupo. Considerando que os danos mecânicos estão associados principalmente a impactos físicos durante a debulha (França-Neto; Krzyzanowski, 2018), a menor variação entre os estratos da planta pode estar relacionada à relativa uniformidade no tamanho das sementes ao longo do dossel.

Em contraste, as variáveis DU18, DP68 e DU68 exibiram variações mais acentuadas entre os terços, evidenciadas por mudanças mais intensas de coloração, indicando variação mais acentuada ao longo do dossel. O DU18 apresentou maiores valores relativos no terço superior, enquanto o DU68 foi mais elevado no terço médio. O dano por umidade resulta da

exposição das sementes a ciclos sucessivos de hidratação e desidratação, os quais promovem o enrugamento do tegumento das sementes de soja em razão da ruptura das camadas de células do parênquima, expondo os tecidos do embrião (Pinheiro et al., 2022). Nesse sentido, uma possível explicação para o menor efeito desse dano no terço inferior é o maior grau de proteção proporcionado pelo dossel, fazendo com que as vagens desse terço se desenvolvam sob condições de temperatura, umidade e qualidade da luz diferentes daquelas observadas nos demais estratos do dossel (Huber et al., 2016). Para a variável DP68, observaram-se maiores médias no terço inferior, indicando que os danos severos causados por percevejos foram mais expressivos nesse estrato, embora Roggia (2009) tenha relatado maior permanência dos percevejos no terço médio das plantas ao longo do dia.

De forma geral, o *heatmap* evidencia que os grupos formados pelo *k-means* diferem quanto ao perfil relativo das variáveis avaliadas e que, dentro de cada grupo, determinadas variáveis apresentam distribuição heterogênea ao longo dos terços do dossel. Esses padrões são coerentes com a estrutura multivariada identificada na PCA, reforçando que a qualidade fisiológica e a ocorrência de danos variam tanto entre genótipos quanto entre estratos da planta.

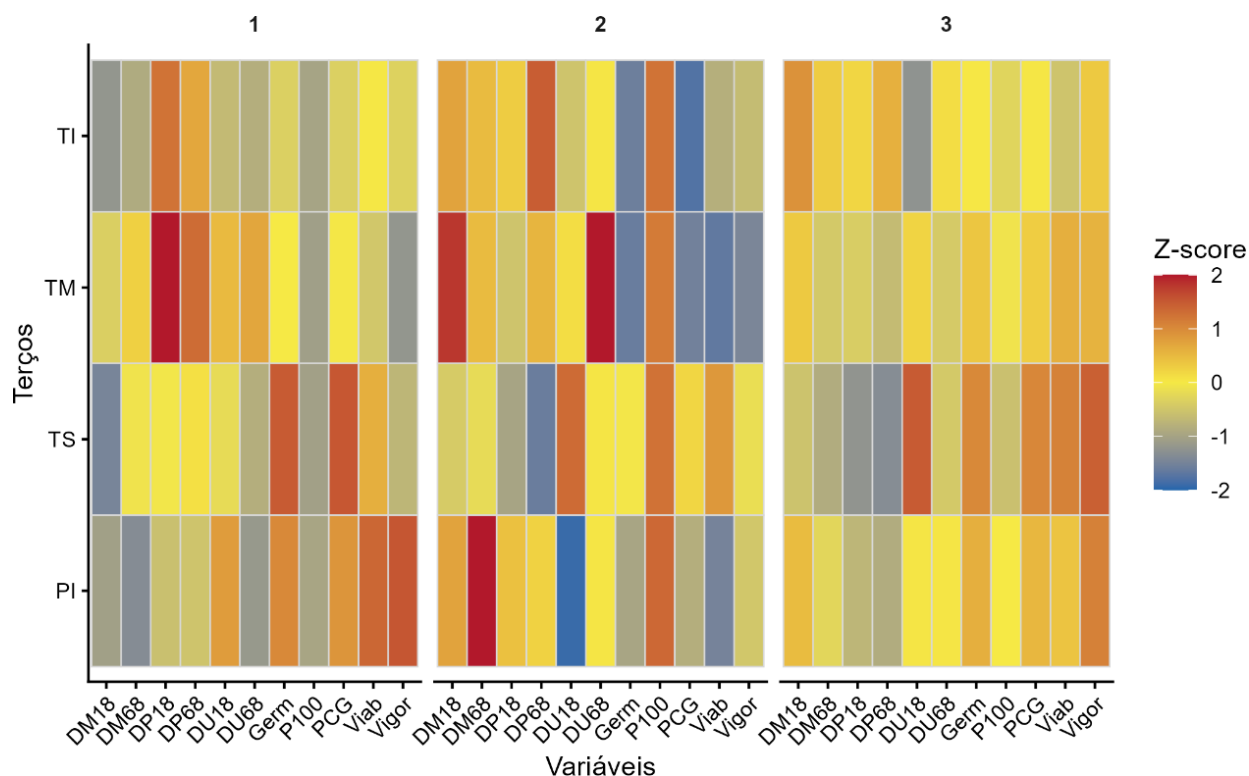


Figura 5 – *Heatmap* facetado do perfil médio das variáveis avaliadas por grupo, obtido a partir do agrupamento pelo método *k-means*. As colunas representam as variáveis e as linhas correspondem aos terços do dossel (TI = terço inferior; TM = terço médio; TS = terço superior; PI = planta inteira). Os painéis indicam os grupos formados ( $k = 3$ ). As cores representam os valores padronizados (Z-score), indicando desvios em relação à média geral de cada variável. Germ = germinação; PCG = primeira contagem de germinação; Vigor = vigor; Viab = viabilidade; DM18 = danos mecânicos de amplo espectro; DM68 = danos mecânicos severos; DU18 = danos por umidade de amplo espectro; DU68 = danos por umidade severos; DP18 = danos causados por percevejo de amplo espectro; DP68 = danos causados por percevejo severos; P100 = peso de 100 sementes.

A distância de Mahalanobis ( $D^2$ ) é uma medida multivariada que quantifica o afastamento de uma observação em relação a um centro multivariado, levando em consideração a estrutura de covariância entre as variáveis. Diferentemente da distância Euclidiana, essa métrica penaliza desvios em direções de baixa variância e corrige a redundância causada por correlações entre variáveis, sendo utilizada para quantificar dispersão multivariada considerando a estrutura de covariância entre as variáveis (De Maesschalck; Jouan-Rimbaud; Massart, 2000). No presente estudo, a distância foi calculada para cada terço da planta em relação ao perfil multivariado médio do próprio genótipo, e a média dessas distâncias foi utilizada como índice de desuniformidade vertical. Assim, valores menores indicam maior uniformidade da qualidade das sementes entre os terços, enquanto

valores maiores refletem maior desuniformidade ao longo do dossel.

Conforme apresentado na Figura 6, os genótipos G14, G13, G3 e G12 apresentaram as menores distâncias médias de Mahalanobis, indicando maior uniformidade multivariada da qualidade das sementes entre os terços do dossel. Em contraste, os genótipos G7, G8, G11 e G9 exibiram as maiores distâncias médias, evidenciando maior desuniformidade.

Além da quantificação global da uniformidade, a análise permite identificar os terços responsáveis pelo aumento da heterogeneidade dentro de cada genótipo. No genótipo G7, por exemplo, o terço médio apresentou distância de Mahalanobis substancialmente superior às dos demais terços, indicando maior afastamento multivariado em relação ao perfil médio do genótipo. Esse padrão reflete diferenças mais acentuadas no conjunto das variáveis avaliadas entre o terço médio e os demais estratos. Para o genótipo G8, observou-se padrão contrastante, com maior distância no terço superior e menor no terço médio. Nesse caso, o terço superior apresentou valores multivariados mais distintos em relação ao centro do genótipo, configurando alta variação da qualidade nesse estrato. Esses comportamentos são coerentes com os padrões de distribuição previamente observados nas análises descritivas e no *heatmap*.

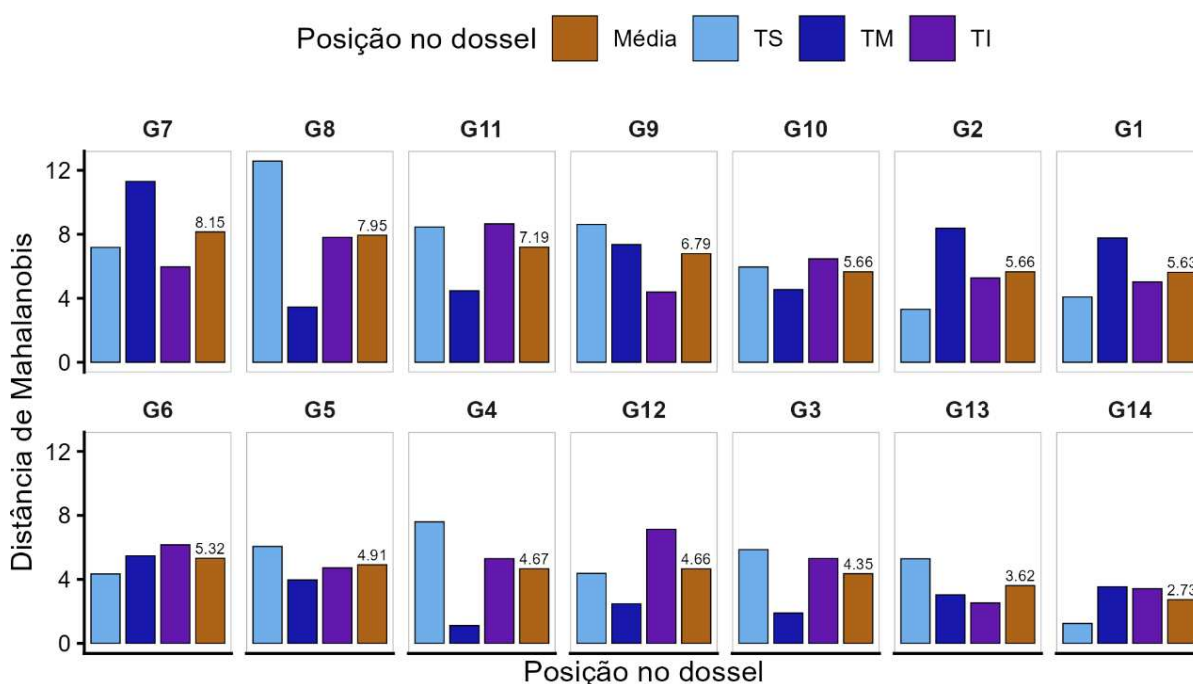


Figura 6 – Distância de Mahalanobis por genótipo em função da posição no dossel (TS = terço superior; TM = terço médio; TI = terço inferior) e da média geral. Valores mais elevados indicam maior divergência multivariada dos perfis avaliados.

A análise conjunta dos agrupamentos obtidos pelo método *k-means*, do *heatmap* das médias das variáveis por grupo ao longo dos terços do dossel e do índice de uniformidade baseado na distância de Mahalanobis evidencia que os diferentes métodos capturam

dimensões complementares da variabilidade entre genótipos. O grupo 1, composto pelos genótipos G7 e G8, apresentou, no *heatmap*, um contraste de uniformidade intermediário em relação aos demais grupos; entretanto, esses dois genótipos corresponderam aos maiores valores de distância de Mahalanobis média, indicando elevada desuniformidade multivariada entre os terços do dossel. Por sua vez, o grupo 2, formado exclusivamente pelo genótipo G6, apresentou forte contraste visual no *heatmap*, sugerindo elevada desuniformidade multivariada da qualidade das sementes entre os terços do dossel, embora sua posição no ranking de Mahalanobis tenha sido intermediária, ocupando a oitava colocação. Os demais genótipos, agrupados no grupo 3, apresentaram perfis mais homogêneos tanto no *heatmap* quanto em menores valores médios de distância de Mahalanobis. Esses resultados indicam que, enquanto o *heatmap* reflete contrastes relativos de perfil médio entre grupos, a distância de Mahalanobis quantifica de forma direta a desuniformidade multivariada entre os estratos de cada genótipo, explicando eventuais divergências entre as abordagens. Embora genótipos pertencentes ao mesmo grupo do *k-means* apresentem perfis multivariados semelhantes, a uniformidade da qualidade das sementes variou substancialmente dentro dos *clusters*, evidenciando que a desuniformidade entre os terços do dossel constitui uma dimensão adicional de variação, não capturada pelas análises de agrupamento.

A proximidade entre os genótipos G2 e G3 no plano da análise de componentes principais (Figura 4A) indica que ambos apresentam posicionamento multivariado semelhante quando consideradas conjuntamente as variáveis de qualidade de sementes. No entanto, a análise de uniformidade baseada na distância de Mahalanobis (Figura 6) revelou diferenças na consistência desses perfis ao longo do dossel, uma vez que G3 figura entre os genótipos mais uniformes, enquanto G2 apresenta posição intermediária no ranking de uniformidade. Esse contraste evidencia a distinção entre similaridade no padrão multivariado global e uniformidade interna entre os terços. Dessa forma, os genótipos podem ocupar posições próximas no espaço multivariado e, ainda assim, diferir quanto à uniformidade da qualidade das sementes ao longo do dossel. Assim, enquanto a PCA sintetizou a estrutura conjunta das variáveis e o posicionamento relativo entre genótipos, a distância de Mahalanobis permite quantificar a desuniformidade multivariada dentro de cada genótipo.

O índice FAI-BLUP (Rocha; Machado; Carneiro, 2018) foi utilizado para a seleção multicaracterística dos genótipos com base em valores genéticos preditos (BLUPs), obtidos após o ajuste do efeito da posição no dossel da planta (PI, TS, TM e TI), considerada como efeito fixo nos modelos mistos. Essa abordagem permitiu ajustar a variação associada à posição de coleta das sementes, possibilitando a identificação de genótipos com desempenho genético médio superior, independentemente do estrato do dossel.

A análise fatorial reteve três fatores, conforme critério de Kaiser (1960), os quais explicaram conjuntamente 87,23% da variância total. A comunalidade média observada foi de

0,87, indicando elevada representatividade das variáveis no espaço fatorial. Percentuais de variância explicada superiores a 60% são comumente considerados adequados para interpretação fatorial (Hair et al., 2019), o que reforça a consistência da estrutura utilizada na construção do índice.

O gráfico do índice FAI-BLUP (Figura 7) evidencia a variação do desempenho relativo dos genótipos em relação ao ideótipo estabelecido, destacando-se G2, G3, G9, G5, G1 e G4 como os seis genótipos superiores. Essas linhagens apresentaram maior probabilidade espacial de proximidade ao ideótipo, refletindo um equilíbrio favorável entre características associadas à qualidade fisiológica das sementes e à redução de danos e deterioração.

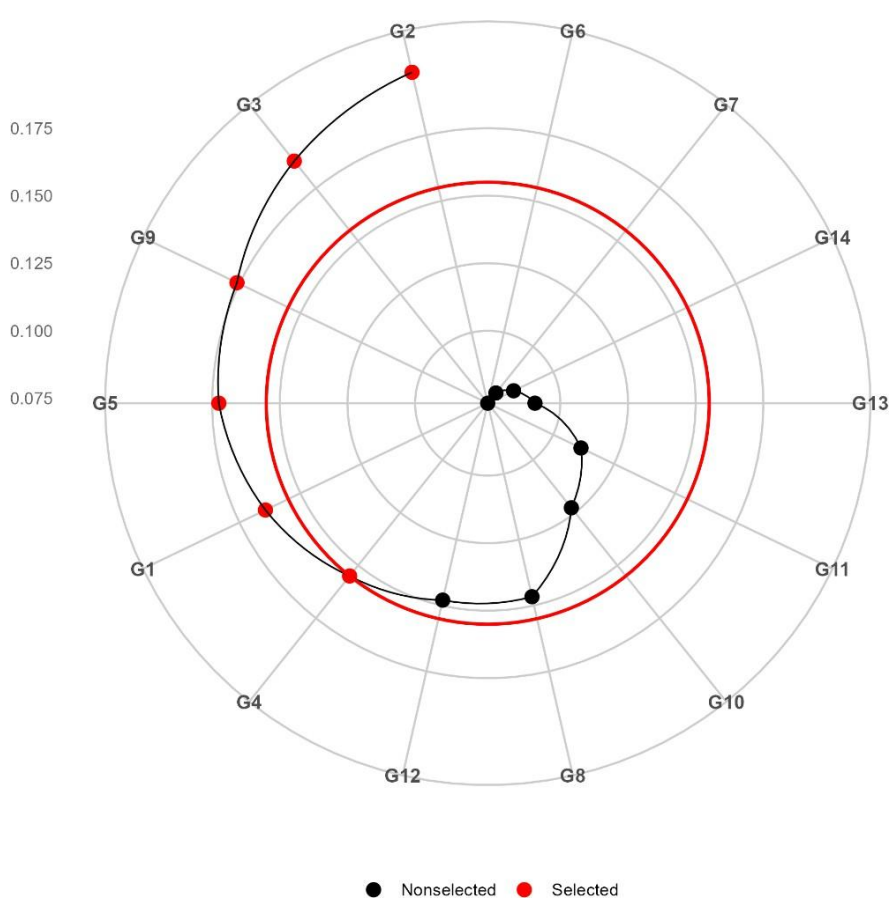


Figura 7 – Representação polar do índice FAI-BLUP dos genótipos. Os pontos vermelhos indicam os genótipos selecionados com base no limiar de intensidade de seleção (linha circular), enquanto os pontos pretos representam os genótipos não selecionados. O eixo radial corresponde aos valores do índice FAI-BLUP. Genótipos com valores superiores ao ponto de corte foram selecionados como os mais próximos do ideótipo estabelecido.

Os genótipos selecionados pelo índice FAI-BLUP, portanto, corresponderam àqueles com melhor desempenho genético multivariado médio. Por outro lado, a análise baseada na distância de Mahalanobis (Figura 6) classificou os genótipos G14 e G13 como os mais uniformes, por apresentarem as menores distâncias médias entre os terços do dossel. Esses

resultados evidenciam que genótipos com maior desempenho genético geral não necessariamente apresentam maior uniformidade da qualidade das sementes ao longo do dossel. Assim, desempenho genético global e uniformidade vertical representam dimensões distintas da qualidade das sementes. Entre os genótipos selecionados pelo FAI-BLUP, apenas três apresentaram também baixos valores de distância de Mahalanobis, sendo eles G3, G4 e G5.

A divergência entre os critérios de classificação decorre das diferenças conceituais entre as abordagens. O índice FAI-BLUP sintetiza o desempenho multivariado médio das características avaliadas, enquanto a distância de Mahalanobis, quantifica a desuniformidade da qualidade das sementes ao longo do dossel dentro de cada genótipo. Assim, cada método captura componentes complementares da variabilidade fenotípica, permitindo distinguir genótipos superiores em desempenho global daqueles que apresentam maior consistência da qualidade das sementes ao longo do dossel.

Nesse contexto, o melhoramento de plantas não deve se restringir ao aumento da produtividade e da resistência, mas também buscar a mitigação de fatores que comprometem o desempenho agrônomo, como a baixa qualidade e a desuniformidade fisiológica das sementes (Batista et al., 2022). Assim, integração dessas métricas amplia a compreensão da expressão fenotípica em cultivares de soja com hábito de crescimento indeterminado, nas quais a variação entre estratos da planta constitui componente relevante da qualidade fisiológica das sementes.

#### 4. CONCLUSÃO

A posição da semente no dossel influenciou a qualidade fisiológica das sementes, com magnitude de variação distinta entre os genótipos avaliados. Foram identificados genótipos com desempenho genético médio superior independentemente da posição de coleta das sementes. Além disso, observou-se variabilidade quanto à uniformidade da qualidade fisiológica dentro de cada genótipo, evidenciando que desempenho médio e uniformidade planta constituem características distintas.

#### 5. REFERÊNCIAS

- ABU SEIF, Yehia I. et al. Response of snap bean growth and seed yield to seed size, plant density and foliar application with algae extract. **Annals of Agricultural Sciences**, v. 61, n. 2, p. 187–199, dez. 2016.
- BATISTA, Elaine Cristina et al. Physiological quality of soybean seeds and the influence of maturity group. **Journal of Seed Science**, v. 44, p. e202244026, 2022.
- BATES, Douglas et al. Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. **Journal of Statistical Software**, v. 67, n. 1, p. 1–48, 2015.

BIANCHI, Mariane Cristina et al. Soybean seed size: how does it affect crop development and physiological seed quality? **Journal of Seed Science**, v. 44, p. e202244010, 2022.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº 45, de 17 de setembro de 2013**. Disponível em: <http://sistemasweb.agricultura.gov.br/sislegis>.

BRASIL. **Regras para Análise de Sementes (RAS)**. Disponível em: [https://wikisda.agricultura.gov.br/pt-br/Laborat%C3%B3rios/Metodologia/Sementes/RAS\\_2025/cap\\_4\\_Germinacao\\_rev\\_1](https://wikisda.agricultura.gov.br/pt-br/Laborat%C3%B3rios/Metodologia/Sementes/RAS_2025/cap_4_Germinacao_rev_1).> Acesso em: 18 dez. 2025.

CARRÃO-PANIZZI, Mercedes Concórdia et al. **Distribuição vertical da composição química e da uniformidade no tamanho de grãos em plantas de soja de tipo de crescimento determinado e indeterminado**. Londrina, PR: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa Soja), 2020.

CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: safra 2024/25 – 12º levantamento**. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento, set. 2025. Disponível em: [https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos/12o-levantamento-safra-2024-25/e-book\\_boletim-de-safras-12o-levantamento\\_2025.pdf](https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos/12o-levantamento-safra-2024-25/e-book_boletim-de-safras-12o-levantamento_2025.pdf).> Acesso em: 12 jan. 2026.

COSTA, Nilton Pereira Da et al. Perfil dos aspectos físicos, fisiológicos e químicos de sementes de soja produzidas em seis regiões do Brasil. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 27, n. 2, p. 172–181, dez. 2005.

COSTA-NETO, Germano et al. *EnvRtype*: a software to interplay enviromics and quantitative genomics in agriculture. **G3: Genes, Genomes, Genetics**, v. 11, n. 4, 15 abr. 2021.

DE MAESSCHALCK, R.; JOUAN-RIMBAUD, D.; MASSART, D. L. The Mahalanobis distance. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 50, n. 1, p. 1–18, jan. 2000.

DING, Wentao et al. Development of a comprehensive evaluation system and models to determine soybean seed vigor. **Industrial Crops and Products**, v. 224, p. 120329, fev. 2025.

DORMANN, Carsten F. et al. Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. **Ecography**, v. 36, n. 1, p. 27–46, jan. 2013.

FAN, Yuanfang et al. Soybean (*Glycine max* L. Merr.) seedlings response to shading: leaf structure, photosynthesis and proteomic analysis. **BMC Plant Biology**, v. 19, n. 1, p. 34, dez. 2019.

FORTI, Victor Augusto et al. Weathering Damage in Soybean Seeds: Assessment, Seed Anatomy and Seed Physiological Potential. **Seed Technology**, v. 35, n. 2, p. 213–224, 2013.

FRANÇA NETO, José de Barros; HENNING, Ademir Assis. **Qualidade fisiológica da semente: Circular Técnica**. Londrina, PR: Embrapa-CNPSo, 1984.

FRANÇA-NETO, José de Barros; KRZYZANOWSKI, Francisco Carlos. **Metodologia do teste de tetrazólio em sementes de soja**. 2018.

FRANÇA-NETO, José de Barros; KRZYZANOWSKI, Francisco Carlos; COSTA, Nilton Pereira Da. **O teste de tetrazólio em sementes de soja: Documentos**. Londrina, PR: Embrapa Soja, 1998.

GAO, Jing et al. Functional consequences of light intensity on soybean leaf hydraulic conductance. **Environmental and Experimental Botany**, v. 210, p. 105301, jun. 2023.

GOLIJAN PANTOVIC, Jelena et al. FACTORS AFFECTING SEED VIGOUR. **The Journal "Agriculture and Forestry"**, v. 70, n. 3, 2024.

HAIR, Joseph F. *et al.* **Multivariate data analysis**. Eighth edition ed. Andover, Hampshire: Cengage, 2019.

HUBER, Steven C. *et al.* Canopy position has a profound effect on soybean seed composition. **PeerJ**, v. 4, p. e2452, 13 set. 2016.

KAISER, H. F. The application of electronic computers to factor analysis. **Educational and Psychological Measurement**, v. 20, p. 141–151, 1960.

KASSAMBARA, Alboukadel; MUNDT, Fabian. **factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses**. 2020. Disponível em: <https://cran.r-project.org/web/packages/factoextra/index.html>. Acesso em: 27 jan. 2026.

KATO, Shin et al. The effect of stem growth habit on single seed weight and seed uniformity in soybean. **Breeding Science**, v. 68, n. 3, p. 352–359, 2018.

KAUFMAN, Leonard; ROUSSEEUW, Peter J. **Finding Groups in Data: An Introduction to Cluster Analysis**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009.

KOLDE, Raivo. Pheatmap: pretty heatmaps. **R package version**, v. 1, n. 2, p. 726, 2019.

KRZYZANOWSKI, Francisco Carlos et al. (orgs.). **Vigor de sementes: conceitos e testes**. 2. ed. Londrina: Abrates, 2020.

KRZYZANOWSKI, Francisco Carlos; FRANÇA-NETO, José de Barros; HENNING, Ademir Assis. **A alta qualidade da semente de soja: fator importante para a produção da cultura: Circular Técnica**. Londrina, PR: Embrapa Soja, 2018.

LÊ, Sébastien; JOSSE, Julie; HUSSON, François. FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. **Journal of Statistical Software**, v. 25, n. 1, 2008.

LENTH, Russell V.; PIASKOWSKI, Julia. **emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means**. , 2025. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>. Acesso em: 12 fev. 2026

MARCOS FILHO, Julio. Seed vigor testing: an overview of the past, present and future perspective. **Scientia Agricola**, v. 72, n. 4, p. 363–374, ago. 2015.

OLIVEIRA, Izabela Cristina De et al. New Proposal to Increase Soybean Seed Vigor: Collection Based on Pod Position. **Agronomy**, v. 15, n. 11, p. 2563, 6 nov. 2025.

OLIVEIRA, Luciana Magda de; CARVALHO, Maria Laene Moreira de; DAVIDE, Antonio Cláudio. Teste de tetrazólio para avaliação da qualidade de sementes de *Peltophorum dubium* (Sprengel) Taubert – Leguminosae Caesalpinioideae. **CERNE**, v. 11, n. 2, p. 159–166, 2005.

PINHEIRO, Daniel Teixeira *et al.* Assessment of the tolerance of soybean seeds to weathering deterioration in the pre-harvest phase by multivariate analysis. **Journal of Seed Science**, v. 44, p. e202244035, 2022.

R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2025.

RAMBO, Lisandro et al. Estimativa do potencial de rendimento por estrato do dossel da soja. **Ciência Rural**, v. 34, n. 1, p. 33–40, 2004.

ROCHA, João Romero Do Amaral Santos De Carvalho; MACHADO, Juarez Campolina; CARNEIRO, Pedro Crescêncio Souza. Multitrait index based on factor analysis and ideotype-design: proposal and application on elephant grass breeding for bioenergy. **GCB Bioenergy**, v. 10, n. 1, p. 52–60, jan. 2018.

ROGGIA, Rejane Cristina Roppa Kuss. **Distribuição espacial e temporal de percevejos da soja e comportamento de *Piezodorus guildinii* (Westwood, 1837) (Hemiptera: Pentatomidae) na soja (*Glycine max* (L.) Merrill) ao longo do dia**. Doutorado—Santa Maria, RS: Universidade Federal de Santa Maria, 2009.

ROUSSEEUW, Peter J. Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis. **Journal of Computational and Applied Mathematics**, v. 20, p. 53–65, nov. 1987.

SOUZA, Tiago Rodrigues et al. Physiological quality of conventional soybean cultivars. **Emirates Journal of Food and Agriculture**, 2020.

THOMAS, André Luis. Tipos de crescimento da planta de soja. **Boletim Agrônômico – Projeto Agro Extensão**, v. 3, n. 1, p. 11–15, 2025.

TSENG, Fu-Sheng; HOSOKAWA, Sadaji. Significance of Growth Habit in Soybean Breeding. **Japanese Journal of Breeding**, v. 22, n. 5, p. 261–268, 1972.

VEIGA, Juliana Scarpim Bueno; HENNIPMAN, Pamela Siqueira; DE CARVALHO, Tereza Cristina. Comparison of viability and vigor tests in soybean seeds (*Glycine max* (L.) Merrill.). **On line**, 2020.

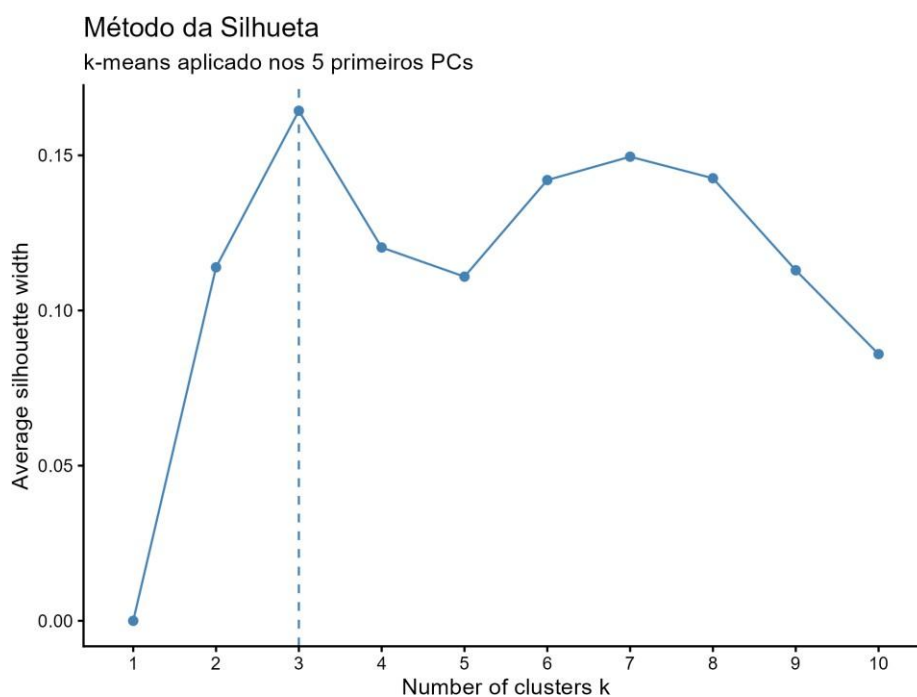
VENABLES, William N.; RIPLEY, Brian D. **Modern Applied Statistics with S**. 4. ed. New York: Springer, 2002.

WANG, Xiyue et al. Effects of seed size on soybean performance. **BMC Plant Biology**, v. 25, n. 1, p. 219, 2025.

WEI, Taiyun; SIMKO, Viliam. **corrplot: Visualization of a Correlation Matrix**. [S.l.]: R Foundation for Statistical Computing, 2021.

WICKHAM, Hadley et al. Welcome to the Tidyverse. **Journal of Open Source Software**, v. 4, n. 43, p. 1686, 2019.

## 5. APÊNDICE A – Análises complementares da PCA e validação de *clusters*



**Figura A1** – Gráfico de silhueta para validação do número de *clusters*

**Tabela A1** – Autovalores, variância explicada e variância acumulada dos componentes principais

Componente	Autovalor	Variância explicada (%)	Variância acumulada (%)
CP1	16,33	37,12	37,12
CP2	7,53	17,11	54,22
CP3	4,93	11,21	65,43
CP4	3,67	8,35	73,79
CP5	2,97	6,74	80,53
CP6	2,33	5,29	85,82
CP7	1,92	4,37	90,19
CP8	1,49	3,39	93,59
CP9	0,88	2,01	95,59

Componente	Autovalor	Variância explicada (%)	Variância acumulada (%)
CP10	0,81	1,83	97,43
CP11	0,44	1,00	98,43
CP12	0,36	0,82	99,25
CP13	0,33	0,75	100,00

Nota: CP = componente principal.

## 6. APÊNDICE B – Caracterização física e integridade das sementes.

**Tabela B1** – Germinação (Germ, %), primeira contagem de germinação (PCG, %), vigor (%) e viabilidade (Viab, %) de sementes de linhagens elite de soja, em função do tratamento: planta inteira (PI) e terços superior (TS), médio (TM) e inferior (TI) do dossel.

Genótipo	Grupo	Germ (%)	PCG (%)	Vigor (%)	Viab (%)
G1	PI	55	43,5	58	80
G1	TS	68,5	59,5	63	87
G1	TM	52,5	45	50	83
G1	TI	60,5	50,5	57	83
G2	PI	69	56,5	67	86
G2	TS	82	67,5	72	92
G2	TM	70,5	54	58	91
G2	TI	59,5	51,5	57	79
G3	PI	73	57,5	55	85
G3	TS	81,5	71,5	66	89
G3	TM	69,5	63	62	91
G3	TI	61,5	56,5	72	95
G4	PI	88	75	78	94
G4	TS	86	73	78	95
G4	TM	83,5	74,5	75	99
G4	TI	78	71	72	96
G5	PI	54,5	44	64	90
G5	TS	79,5	69,5	66	96
G5	TM	63,5	45,5	62	90
G5	TI	63,5	45	64	84
G6	PI	39	35	50	73
G6	TS	54	50	52	87

<b>Genótipo</b>	<b>Grupo</b>	<b>Germ (%)</b>	<b>PCG (%)</b>	<b>Vigor (%)</b>	<b>Viab (%)</b>
G6	TM	29	25	44	72
G6	TI	29,5	21,5	49	77
G7	PI	57,5	47	66	92
G7	TS	66	57	57	82
G7	TM	41,5	35,5	39	71
G7	TI	37	30	41	77
G8	PI	84,5	73	59	88
G8	TS	91	81	40	89
G8	TM	68	58	52	87
G8	TI	61	54	61	87
G9	PI	75,5	63,5	66	90
G9	TS	69	58	40	83
G9	TM	63	59	70	91
G9	TI	56,5	47	52	87
G10	PI	70,5	59,5	63	84
G10	TS	75	62,5	72	98
G10	TM	63,5	51	45	84
G10	TI	52,5	44	49	71
G11	PI	56	50,5	42	71
G11	TS	62	56	52	86
G11	TM	56,5	46	46	73
G11	TI	33,5	27,5	37	57
G12	PI	61	55	55	84
G12	TS	67	63,5	58	87
G12	TM	58,5	53	56	82
G12	TI	63	60	48	73
G13	PI	62,5	55	63	83
G13	TS	64,5	59	60	79
G13	TM	46,5	40	47	77
G13	TI	28,5	26,5	46	66
G14	PI	46	41,5	47	79
G14	TS	46,5	42	54	80
G14	TM	39	33	51	80

Genótipo	Grupo	Germ (%)	PCG (%)	Vigor (%)	Viab (%)	
G14	TI		48	43	52	76

**Tabela B2** – Peso de 100 sementes (P100, g) e grau de umidade (%) de sementes de linhagens elite de soja, em função do tratamento: planta inteira (PI) e terços superior (TS), médio (TM) e inferior (TI) do dossel.

Genótipo	Tratamento	P100 (g)	Umidade (%)
G1	PI	13,79	14,3
G1	TS	13,87	13,8
G1	TM	15,52	15,6
G1	TI	13,87	13,8
G2	PI	19,91	13,4
G2	TS	17,75	14,2
G2	TM	17,96	13,2
G2	TI	18,00	13,0
G3	PI	17,67	14,6
G3	TS	18,04	12,8
G3	TM	17,88	13,6
G3	TI	15,94	13,3
G4	PI	13,81	14,2
G4	TS	15,89	13,6
G4	TM	15,91	13,5
G4	TI	15,80	14,1
G5	PI	16,00	13,0
G5	TS	13,89	13,7
G5	TM	15,93	13,4
G5	TI	13,97	13,2
G6	PI	19,72	14,2
G6	TS	19,47	15,3
G6	TM	19,24	16,3
G6	TI	19,45	15,4
G7	PI	13,92	13,5
G7	TS	13,84	14,0
G7	TM	13,66	15,1

Genótipo	Tratamento	P100 (g)	Umidade (%)
G7	TI	13,95	13,3
G8	PI	14,00	13,0
G8	TS	13,76	14,5
G8	TM	13,86	13,9
G8	TI	13,89	13,7
G9	PI	17,81	13,9
G9	TS	13,97	13,2
G9	TM	15,91	13,5
G9	TI	15,83	13,9
G10	PI	15,91	13,5
G10	TS	13,90	13,6
G10	TM	15,49	15,8
G10	TI	15,85	13,8
G11	PI	15,71	14,6
G11	TS	11,64	15,6
G11	TM	15,89	13,6
G11	TI	15,63	15,0
G12	PI	17,81	13,9
G12	TS	15,94	13,3
G12	TM	15,85	13,8
G12	TI	15,94	13,3
G13	PI	15,89	13,6
G13	TS	13,82	14,1
G13	TM	15,82	14,0
G13	TI	15,71	14,6
G14	PI	15,78	14,2
G14	TS	15,87	13,7
G14	TM	15,72	14,5
G14	TI	15,89	13,6

**Tabela B3** – Frequência de danos mecânicos (DM), danos por umidade (DU) e danos por percevejos (DP) (%) classificados como danos amplos (classes de 1 a 8) e danos severos (classes de 6 a 8) em sementes de linhagens elite de soja, em função do tratamento: planta inteira (PI) e terços superior (TS), médio (TM) e inferior (TI) do dossel.

Genótipo	Tratamento	DM18 (%)	DM68 (%)	DU18 (%)	DU68 (%)	DP18 (%)	DP68 (%)
G1	PI	74	10	46	8	12	3
G1	TS	51	3	73	6	7	2
G1	TM	47	5	56	4	24	1
G1	TI	65	7	63	12	25	6
G2	PI	62	8	59	7	10	1
G2	TS	43	3	74	6	15	2
G2	TM	60	6	73	4	12	3
G2	TI	58	8	48	10	26	6
G3	PI	55	10	64	9	17	2
G3	TS	43	4	86	11	12	4
G3	TM	58	7	75	8	16	1
G3	TI	62	3	56	4	21	1
G4	PI	73	5	41	2	16	1
G4	TS	57	3	41	1	25	1
G4	TM	82	1	24	0	19	0
G4	TI	78	0	21	0	21	4
G5	PI	60	6	71	6	14	3
G5	TS	44	3	81	2	17	1
G5	TM	28	3	81	4	24	6
G5	TI	53	7	63	8	22	10
G6	PI	60	21	41	10	27	7
G6	TS	49	9	76	10	15	1
G6	TM	70	12	63	22	19	8
G6	TI	60	12	56	10	26	11
G7	PI	53	3	65	5	12	2
G7	TS	42	10	61	7	23	7
G7	TM	60	18	57	16	57	16
G7	TI	60	10	32	7	41	12
G8	PI	33	5	76	4	25	7
G8	TS	36	9	58	5	23	6
G8	TM	39	4	77	10	29	5
G8	TI	23	2	77	5	27	5
G9	PI	59	5	78	10	18	2

Genótipo	Tratamento	DM18 (%)	DM68 (%)	DU18 (%)	DU68 (%)	DP18 (%)	DP68 (%)
G9	TS	56	9	88	13	15	3
G9	TM	61	4	71	6	19	4
G9	TI	59	8	52	5	22	6
G10	PI	40	5	60	8	27	7
G10	TS	35	1	82	1	18	1
G10	TM	48	10	52	7	30	6
G10	TI	55	19	38	14	40	16
G11	PI	45	16	77	22	17	6
G11	TS	44	7	87	10	11	2
G11	TM	52	16	74	16	22	9
G11	TI	48	19	65	22	30	20
G12	PI	49	10	65	11	23	3
G12	TS	33	10	84	6	13	2
G12	TM	49	11	78	9	20	6
G12	TI	59	17	38	7	26	7
G13	PI	49	9	50	10	18	2
G13	TS	62	11	83	17	5	2
G13	TM	72	15	53	17	22	5
G13	TI	72	18	48	22	27	10
G14	PI	66	12	72	17	17	7
G14	TS	58	13	75	12	4	0
G14	TM	61	9	67	11	13	4
G14	TI	70	17	37	10	16	4

**Tabela B4** – Médias descritivas das variáveis avaliadas por genótipo, obtidas a partir dos diferentes terços da planta.

Genótipo	Germ (%)	PCG (%)	Vigor (%)	Viab (%)	DM18 (%)	DM68 (%)	DU18 (%)	DU68 (%)	DP18 (%)	DP68 (%)	P100 (g)	U (%)
G1	59,13	49,63	57,00	83,25	59,25	6,25	59,50	7,50	17,00	3,00	14,26	14,38
G2	70,25	57,38	63,50	87,00	55,75	6,25	63,50	6,75	15,75	3,00	18,40	13,45
G3	71,38	62,13	63,75	90,00	54,50	6,00	70,25	8,00	16,50	2,00	17,38	13,58
G4	83,88	73,38	75,75	96,00	72,50	2,25	31,75	0,75	20,25	1,50	15,35	13,85
G5	65,25	51,00	64,00	90,00	46,25	4,75	74,00	5,00	19,25	5,00	14,95	13,33

Genótipo	Germ (%)	PCG (%)	Vigor (%)	Viab (%)	DM18 (%)	DM68 (%)	DU18 (%)	DU68 (%)	DP18 (%)	DP68 (%)	P100 (g)	U (%)
G6	37,88	32,88	48,75	77,25	59,75	13,50	59,00	13,00	21,75	6,75	19,47	15,30
G7	50,50	42,38	50,75	80,50	53,75	10,25	53,75	8,75	33,25	9,25	13,84	13,98
G8	76,13	66,50	53,00	87,75	32,75	5,00	72,00	6,00	26,00	5,75	13,88	13,78
G9	66,00	56,88	57,00	87,75	58,75	6,50	72,25	8,50	18,50	3,75	15,88	13,63
G10	65,38	54,25	57,25	84,25	44,50	8,75	58,00	7,50	28,75	7,50	15,29	14,18
G11	52,00	45,00	44,25	71,75	47,25	14,50	75,75	17,50	20,00	9,25	14,72	14,70
G12	62,38	57,88	54,25	81,50	47,50	12,00	66,25	8,25	20,50	4,50	16,39	13,58
G13	50,50	45,13	54,00	76,25	63,75	13,25	58,50	16,50	18,00	4,75	15,31	14,08
G14	44,88	39,88	51,00	78,75	63,75	12,75	62,75	12,50	12,50	3,75	15,82	14,00

Nota: Germ = germinação; PCG = primeira contagem de germinação; Vigor = vigor avaliado por tetrazólio; Viab = viabilidade avaliada por tetrazólio; DM18 e DM68 = danos mecânicos classificados nas classes 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente; DU18 e DU68 = danos por umidade classificados nas classes 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente; DP18 e DP68 = danos por percevejo classificados nas classes 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente; P100 = peso de 100 sementes; U = grau de umidade.

**Tabela B5** – Coeficientes de variação (%) das variáveis avaliadas entre os terços da planta (TS, TM e TI), por genótipo.

Genótipo	Germ (%)	PCG (%)	Vigor (%)	Viab (%)	DM18 (%)	DM68 (%)	DU18 (%)	DU68 (%)	DP18 (%)	DP68 (%)	P100 (g)	U (%)
G1	13,22	14,17	11,48	2,74	17,40	40,00	13,35	56,77	54,19	88,19	6,61	7,22
G2	15,92	14,93	13,45	8,28	17,31	44,41	22,66	45,83	41,72	56,77	0,74	4,77
G3	12,94	12,69	11,02	6,95	13,15	45,02	22,91	32,16	28,91	77,43	5,05	5,24
G4	4,96	2,41	4,00	2,15	18,57	114,56	37,62	173,21	14,10	124,90	0,37	2,34
G5	13,42	26,26	3,13	6,67	30,39	53,29	13,86	65,47	17,17	79,57	7,91	1,87
G6	38,11	48,32	8,36	9,71	17,60	15,75	15,61	49,49	27,84	76,97	0,65	3,52
G7	32,40	34,94	21,60	7,18	19,25	36,46	31,43	51,96	42,17	38,65	1,06	6,42
G8	21,40	22,65	20,66	1,32	26,04	72,11	15,52	43,30	11,60	10,83	0,48	2,97
G9	9,95	12,18	27,96	4,60	4,29	37,80	25,61	54,49	18,81	35,25	7,22	2,59
G10	17,67	17,79	26,33	16,01	22,06	90,00	39,21	88,72	37,55	99,62	6,87	8,45
G11	29,84	33,50	16,78	20,17	8,33	44,61	14,68	37,50	45,43	87,81	16,56	6,97
G12	6,77	9,09	9,80	8,79	27,90	29,89	37,51	20,83	33,08	52,92	0,33	2,14
G13	38,71	39,03	15,31	9,46	8,41	23,94	30,86	15,46	64,07	71,32	7,41	2,26
G14	10,84	14,00	2,92	2,94	9,91	30,77	33,58	9,09	56,77	86,60	0,57	3,54

Nota: Germ = germinação; PCG = primeira contagem de germinação; Vigor = vigor avaliado por tetrazólio; Viab = viabilidade avaliada por tetrazólio; DM18 e DM68 = danos mecânicos classificados nas classes 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente; DU18 e DU68 = danos por umidade classificados nas classes 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente; DP18 e DP68 = danos por percevejo classificados nas classes 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente; P100 = peso de 100 sementes; U = grau de umidade.

## Capítulo II. Influência do ambiente de produção sobre o desempenho fisiológico e a uniformidade da qualidade das sementes ao longo do dossel em plantas de soja de hábito de crescimento indeterminado.

### RESUMO

A qualidade fisiológica das sementes de soja é influenciada pelas condições ambientais de produção e pela interação entre genótipo e ambiente, especialmente em cultivares de hábito de crescimento indeterminado, nas quais a sobreposição das fases vegetativa e reprodutiva pode resultar em diferenças na qualidade das sementes produzidas por uma mesma planta. Nesse contexto, a análise integrada das condições climáticas do ambiente de produção, do desempenho médio das variáveis de qualidade física e fisiológica, da sensibilidade dos genótipos a variações nas condições ambientais e da uniformidade da qualidade das sementes ao longo do dossel da planta pode constituir uma abordagem promissora para compreender a complexidade da resposta fenotípica na produção de sementes. Este estudo teve como objetivo investigar como ambientes contrastantes modulam a qualidade fisiológica das sementes, a sensibilidade ambiental dos genótipos e a uniformidade da qualidade das sementes ao longo do dossel das plantas de soja. Para isso, foram cultivadas seis linhagens elite de soja de hábito de crescimento indeterminado, na safra 2024/25 em dois ambientes do estado de Minas Gerais: Capinópolis e Viçosa. As sementes foram colhidas separadamente nos terços superior, médio e inferior do dossel. Foram avaliados o peso de 100 sementes, a germinação, a primeira contagem de germinação e o teste tetrazólio, sendo determinados o vigor, a viabilidade e danos mecânicos, danos por umidade e danos por percevejos. O ambiente foi caracterizado a partir de covariáveis climáticas obtidas da base NASA POWER e processadas com o pacote *EnvRtype*, sendo integradas em um índice ambiental. A sensibilidade ambiental foi avaliada por meio de representações gráficas da resposta fenotípica ajustada dos genótipos nos dois ambientes e quantificada pela diferença absoluta entre valores genotípicos ajustados nos dois ambientes ( $\Delta$ ). A uniformidade do potencial fisiológico das sementes ao longo do dossel foi estimada pela distância de Mahalanobis ( $D^2$ ) entre os terços da planta. O ambiente de Viçosa apresentou IA positivo e esteve associado a maiores médias de germinação, vigor e viabilidade, além de menor divergência multivariada das características avaliadas entre os terços da planta. Capinópolis apresentou IA negativo, menores médias das variáveis fisiológicas e maior diferenciação das características entre os terços. A sensibilidade ambiental variou entre genótipos, com materiais apresentando perfis mais responsivos e outros mais conservadores. A divergência multivariada da qualidade das sementes entre os terços também foi dependente do genótipo, sendo reduzida no ambiente mais favorável para a maioria dos materiais, embora os genótipos G1 e G4 tenham

apresentado intensificação da desuniformidade vertical sob condições menos limitantes. Os resultados demonstram que a sensibilidade ambiental, o desempenho médio das variáveis de qualidade física e fisiológica e a uniformidade dessas características ao longo do dossel representam dimensões complementares da resposta fenotípica dos genótipos aos ambientes de produção. A integração dessas métricas amplia a compreensão da interação genótipo × ambiente na qualidade de sementes e contribui para estratégias de seleção de genótipos de soja destinados à produção de sementes de alta qualidade.

Palavras-chave: *Glycine max* (L.) Merrill, interação genótipo × ambiente, *EnvRtype*, sensibilidade ambiental, posição no dossel.

**Chapter II. Influence of the production environment on physiological performance and vertical uniformity of seed quality along the canopy in soybean plants with indeterminate growth habit.**

**ABSTRACT**

The physiological quality of soybean seeds is influenced by environmental production conditions and by genotype  $\times$  environment interaction, especially in cultivars with an indeterminate growth habit, in which the overlap of vegetative and reproductive stages may result in differences in seed quality within the same plant. In this context, the integrated analysis of climatic conditions in the production environment, the average performance of physical and physiological quality traits, genotype sensitivity to environmental variation, and the uniformity of seed quality along the plant canopy may provide a promising approach to understanding the complexity of phenotypic responses in seed production. This study aimed to investigate how contrasting environments modulate physiological seed quality, genotype environmental sensitivity, and the uniformity of seed quality along the soybean canopy. Six elite soybean lines with indeterminate growth habit were grown during the 2024/2025 season in two environments in the state of Minas Gerais, Brazil: Capinópolis and Viçosa. Seeds were harvested separately from the upper, middle, and lower thirds of the canopy. The following traits were evaluated: 100-seed weight, germination, first germination count, and tetrazolium test, from which vigor, viability, mechanical damage, moisture damage, and stink bug damage were determined. The environment was characterized using climatic covariates obtained from the NASA POWER database and processed with the EnvRtype package, which were integrated into an environmental index (EI). Environmental sensitivity was assessed through graphical representations of adjusted phenotypic responses of genotypes across the two environments and quantified by the absolute difference between adjusted genotypic values in both environments ( $\Delta$ ). The uniformity of seed physiological potential along the canopy was estimated using Mahalanobis distance ( $D^2$ ) among plant thirds. The Viçosa environment presented a positive EI and was associated with higher mean values for germination, vigor, and viability, as well as lower multivariate divergence among canopy thirds. Capinópolis showed a negative EI, lower mean physiological performance, and greater differentiation of traits among thirds. Environmental sensitivity varied among genotypes, with some materials exhibiting more responsive profiles and others more conservative behavior. Multivariate divergence in seed quality among plant thirds was also genotype-dependent and was reduced in the more favorable environment for most materials. However, genotypes G1 and G4 showed increased vertical non-uniformity under less limiting conditions. The results demonstrate that environmental sensitivity, average performance of physical and physiological quality traits, and their uniformity along the canopy represent complementary dimensions of genotype

phenotypic responses to production environments. The integration of these metrics enhances the understanding of genotype × environment interaction in seed quality and contributes to selection strategies for soybean genotypes aimed at high-quality seed production.

Keywords: *Glycine max* (L.) Merr., genotype × environment interaction, EnvRtype, environmental sensitivity, canopy position.

## 1. INTRODUÇÃO

A qualidade fisiológica das sementes de soja é fortemente influenciada pelas condições ambientais ao longo do ciclo da cultura, especialmente durante os estádios de formação, enchimento e maturação das sementes. Nesses períodos, os processos fisiológicos e bioquímicos apresentam elevada susceptibilidade às variações ambientais, de modo que condições adversas podem comprometer tanto o rendimento quanto a qualidade final das sementes, tornando a caracterização do ambiente de produção um elemento central para a compreensão dos padrões de qualidade observados (Vasconcelos et al., 2009; Thien Nguyen et al., 2016; Monteiro et al., 2021).

A obtenção de sementes de alta qualidade está associada à ocorrência de temperaturas amenas e condições climáticas predominantemente secas durante o final da maturação e a colheita. Embora essas condições sejam menos frequentes em regiões tropicais, elas podem ser parcialmente alcançadas em áreas de maior altitude ou por meio do ajuste da época de semeadura destinada à produção de sementes (França-Neto et al., 2016). Eventos climáticos adversos podem reduzir a produtividade de sementes de soja em até 30%, evidenciando a elevada sensibilidade da cultura a estresses ambientais, como variações extremas de temperatura, fotoperíodo e disponibilidade hídrica inadequada, uma vez que seu controle é limitado e as possibilidades de compensação são restritas (Farias; Nepomuceno; Neumaier, 2007; Staniak; Szpunar-Krok; Kocira, 2023). Nesse sentido, abordagens que permitam sintetizar múltiplos fatores ambientais em indicadores integrados podem favorecer uma interpretação mais consistente da resposta das sementes às condições de produção.

Além do ambiente, a resposta às condições de produção é diferencial entre os genótipos, o que reforça a importância da interação genótipos  $\times$  ambientes ( $G \times A$ ), especialmente no contexto atual de mudanças climáticas (Schneider et al., 2025). Essa interação tem sido amplamente relatada em estudos sobre a qualidade de sementes de soja (Castro et al., 2017; Zambiazzi et al., 2017) e pode se manifestar tanto por alterações no desempenho médio quanto por mudanças no padrão de resposta dos genótipos frente a ambientes contrastantes. Assim, a análise conjunta do desempenho médio e do padrão de resposta fenotípica torna-se essencial para compreender a magnitude e a direção da interação  $G \times A$  na qualidade fisiológica das sementes. Genótipos com desempenho semelhante em um determinado ambiente podem apresentar respostas divergentes quando submetidos a diferentes condições ambientais, evidenciando a complexidade e a instabilidade da qualidade das sementes (Allard; Bradshaw, 1964).

Nesse contexto, a identificação de genótipos que conciliem alto desempenho e comportamento consistente em diferentes ambientes torna-se estratégica para sistemas de produção mais resilientes (Waters et al., 2023). A sensibilidade ambiental emerge como um conceito relevante para descrever a magnitude e a direção da resposta fenotípica dos

genótipos frente a ambientes contrastantes. Diferentemente da definição clássica de estabilidade fenotípica, que pressupõe constância do desempenho entre ambientes, a sensibilidade ambiental permite discriminar genótipos mais responsivos ou mais conservadores, fornecendo uma interpretação mais dinâmica da interação G×A (Finlay; Wilkinson, 1963), especialmente quando aplicada à avaliação da qualidade fisiológica de sementes sob condições ambientais contrastantes.

Em genótipos de soja de hábito de crescimento indeterminado, a organização do dossel intensifica ainda mais a complexidade dessa resposta. A sobreposição entre as fases vegetativa e reprodutiva, associada ao grau de assincronia no desenvolvimento reprodutivo, resulta na formação de gradientes microambientais ao longo da planta, caracterizados por diferenças na interceptação de luz, na temperatura e na umidade (Carrera; Savin; Slafer, 2024). Essas variações podem ocorrer mesmo em genótipos com desempenho médio elevado, de modo que, além da estabilidade e da sensibilidade ambiental dos genótipos, a uniformidade da qualidade das sementes ao longo do dossel da planta, avaliada por meio da similaridade dos atributos fisiológicos entre os terços da planta, constitui uma característica desejável para a produção de sementes, embora ainda pouco explorada de forma quantitativa. Dessa forma, a integração entre a caracterização ambiental, a resposta fenotípica média dos genótipos e a uniformidade vertical da qualidade das sementes representa uma abordagem promissora para compreender os efeitos combinados do ambiente e do genótipo na produção de sementes de soja. Assim, o presente estudo teve como objetivo investigar como ambientes contrastantes modulam a qualidade fisiológica das sementes, a sensibilidade ambiental dos genótipos e a uniformidade da qualidade das sementes ao longo do dossel das plantas de soja.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1. Material vegetal**

Foram utilizadas seis linhagens elite com hábito de crescimento indeterminado (G1, G2, G3, G4, G5 e G9), provenientes do Programa de Melhoramento de Soja da Universidade Federal de Viçosa (UFV). Esses genótipos foram previamente selecionados por meio do índice FAI-BLUP, por apresentarem desempenho genético médio superior, independentemente do estrato do dossel (Capítulo 1). Os genótipos avaliados apresentaram valores de Grupo de Maturidade Relativa (GMR) estimado variando de 4,8 a 5,9 (Tabela 1).

**Tabela 1** – Linhagens e seus respectivos valores de Grupo de Maturidade Relativa (GMR) estimado.

<b>Genótipo</b>	<b>GMR estimado</b>
G1	4,8
G2	5,3
G3	5,4
G4	5,5
G5	5,6
G9	5,9

## 2.2. Caracterização dos ambientes de produção

A produção das sementes ocorreu na safra 2024/25, em dois municípios do estado de Minas Gerais: Capinópolis e Viçosa. Em Capinópolis, o experimento foi instalado na Central de Experimentação, Pesquisa e Extensão do Triângulo Mineiro (Cepet) (18°43'22" S; 49°33'36" O), com semeadura em 11 de outubro de 2024 e colheita em 24 de janeiro de 2025. Em Viçosa, o experimento foi conduzido na Unidade de Ensino, Pesquisa e Extensão – Horta Nova (UEPE–Horta Nova) (20°45'45" S; 42°49'27" O), com semeadura em 25 de outubro de 2024 e colheita em 27 de fevereiro de 2025.

O município de Capinópolis localiza-se na mesorregião do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba e apresenta clima classificado como Aw (tropical sazonal). O município se situa a 543,89 m de altitude, com temperatura média anual de 22,6 °C e precipitação média anual de 1.533 mm, caracterizando-se por verões quentes e chuvosos e invernos secos, apresentando forte sazonalidade hídrica (INMET, [S.d.]; Köppen Brasil, [S.d.]). De acordo com o zoneamento agroclimático para a produção de sementes de soja no estado de Minas Gerais proposto por Pádua et al. (2014), Capinópolis é classificada como área medianamente favorável, associada a temperaturas de maturação consideradas intermediárias para a obtenção de sementes de elevada qualidade fisiológica.

Viçosa, situada na Zona da Mata mineira, apresenta clima classificado como Cwa (tropical de altitude, com inverno seco e verão chuvoso). O município se situa a 720,75 m de altitude, com temperatura média anual de 19,5 °C e precipitação média anual de 1.361,3 mm. Em comparação a Capinópolis, Viçosa apresenta temperaturas mais amenas, em função da maior altitude, e menor intensidade de déficit hídrico durante o período de inverno (INMET, [S.d.]; Köppen Brasil, [S.d.]). De acordo com o zoneamento agroclimático de Pádua et al. (2014), a região da Zona da Mata mineira apresenta áreas favoráveis à produção de sementes de soja de alta qualidade.

### 2.3. Colheita

A colheita das linhagens em Capinópolis foi realizada em um único dia, enquanto em Viçosa ocorreu em um intervalo de sete dias. A colheita das plantas foi realizada manualmente. Para cada linhagem, o feixe de plantas foi dividido em quatro grupos para posterior realização da trilha mecânica. Um quarto do feixe foi trilhado integralmente, conforme o procedimento convencional, constituindo o tratamento denominado Planta Inteira (PI). Os três quartos restantes foram submetidos ao corte individual das plantas, com o objetivo de separar os terços superior, médio e inferior. Para essa separação, realizou-se a contagem do número total de nós de cada planta, dividindo-se esse valor por três, de modo a garantir que cada terço apresentasse, o mais próximo possível, o mesmo número de nós. As porções correspondentes a cada terço foram agrupadas e trilhadas separadamente, originando os tratamentos Terço Superior (TS), Terço Médio (TM) e Terço Inferior (TI), conforme ilustrado na Figura 1.

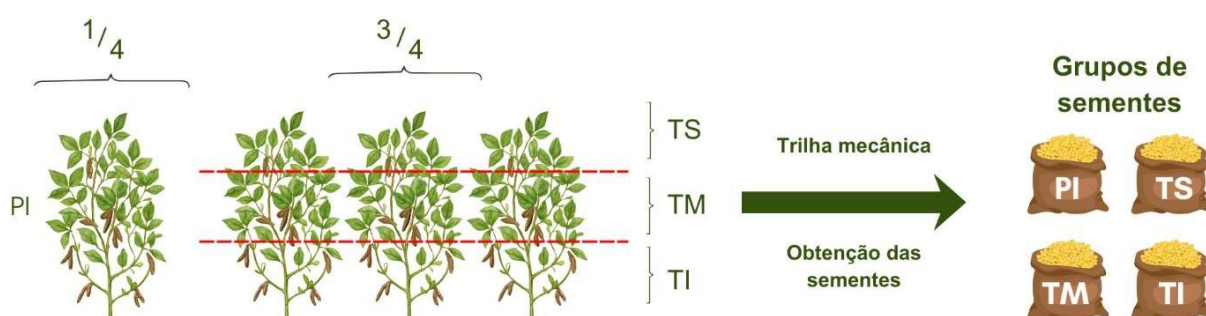


Figura 1 – Representação esquemática da obtenção dos quatro grupos de sementes: planta inteira (PI) e os diferentes terços do dossel, terço superior (TS), terço médio (TM) e terço inferior (TI).

## 2.4. Avaliação da qualidade fisiológica das sementes

### 2.4.1. Grau de umidade e Peso de 100 sementes

O grau de umidade das sementes foi determinado por meio de leituras diretas utilizando o medidor de umidade de grãos John Deere Moisture Meter, com precisão de  $\pm 0,5\%$  na faixa usual de umidade para grãos armazenados. As medições foram expressas em porcentagem (%).

Em seguida, foi determinado o peso de 100 sementes, utilizando-se uma repetição de 100 sementes, tomada aleatoriamente no volume total das sementes de cada porção, contadas manualmente e pesadas em balança de precisão.

### 2.4.2. Teste de Germinação

O teste de germinação foi conduzido com quatro repetições de 50 sementes, distribuídas em rolos de papel para germinação umedecidos com um volume de água destilada equivalente a 2,5 vezes o peso do papel seco. Os rolos foram mantidos em

germinador a 25 °C. As avaliações foram efetuadas no quinto e no oitavo dia após a montagem do teste, de acordo com a metodologia descrita nas Regras para Análises de Sementes (Brasil, 2025). Os resultados foram expressos em porcentagem de plântulas normais, sendo os valores obtidos no quinto dia referentes à primeira contagem de germinação (PCG) e os do oitavo dia à germinação (Germ).

#### 2.4.3. Teste de Tetrazólio

O teste de tetrazólio foi realizado conforme a metodologia descrita por França-Neto e Krzyzanowski (2018), utilizando-se duas repetições de 50 sementes. Inicialmente, as sementes foram submetidas ao pré-condicionamento em rolos de papel para germinação umedecidos com volume de água destilada equivalente a 2,5 vezes o peso do papel seco. Os rolos foram mantidos em germinador a 25 °C, por 16 horas.

Posteriormente, as sementes foram submersas em solução de tetrazólio (2-3-5, cloreto de trifênil tetrazólio) a 0,075%, acondicionadas em béqueres plásticos e mantidas em câmara BOD, no escuro, a 38°C por aproximadamente 120 minutos. Após a coloração, as sementes foram lavadas com água corrente e mantidas submersas em água até o momento da avaliação.

Cada semente foi avaliada individualmente, sendo seccionada longitudinalmente ao longo do eixo embrionário com o auxílio de estilete. Foram observadas as superfícies externa e interna dos cotilédones e do eixo embrionário, considerando a coloração dos tecidos, a presença, tipo e a localização dos danos. A partir dessa avaliação, cada semente foi classificada em uma das oito classes (1 a 8), conforme a metodologia descrita por França-Neto e Krzyzanowski (2018).

As variáveis fisiológicas foram expressas em porcentagem de sementes (%). O vigor foi determinado pela proporção de sementes classificadas nas classes 1 a 3, enquanto a viabilidade (Viab) correspondeu à proporção de sementes enquadradas nas classes 1 a 5.. Os danos mecânicos, por umidade e por percevejo foram avaliados considerando-se duas abordagens: danos de amplo espectro e danos severos. Os danos de amplo espectro corresponderam à presença de danos nas classes 1 a 8, enquanto os danos severos incluíram apenas as sementes das classes 6 a 8. Essas variáveis foram expressas, respectivamente, como DM18, DU18 e DP18 para danos amplos, e DM68, DU68 e DP68 para danos severos, conforme a metodologia descrita por França-Neto e Krzyzanowski (2018).

#### 2.5. Obtenção e processamento ecofisiológico dos dados climáticos

O pipeline do processo de obtenção e processamento dos dados climáticos está ilustrado na Figura 4. Para assegurar que os dados ambientais refletissem fielmente as condições enfrentadas pelas plantas durante a formação e maturação das sementes, as informações climáticas foram obtidas e processadas com o auxílio do pacote *EnvRtype*

(Costa-Neto et al., 2021), no ambiente R (R Core Team, 2025). Os dados climáticos diários foram obtidos a partir da base NASA POWER, considerando as coordenadas geográficas e o período de cultivo de cada ambiente experimental. Foram coletadas informações de temperatura média, máxima e mínima do ar, precipitação, umidade relativa e radiação solar incidente.

Os dados climáticos brutos foram processados de forma a estimar covariáveis ecofisiológicas derivadas, incluindo graus-dia acumulados (GDD), evapotranspiração potencial (ETP), evapotranspiração potencial padronizada (PETP) e amplitude térmica diária (Trange). Adicionalmente, foram mantidas covariáveis climáticas diretas, sendo elas temperatura média (Tmean), temperatura máxima (Tmax), temperatura mínima (Tmin), precipitação média diária (Prec) e radiação solar incidente (Rad). A altitude real de cada ambiente foi utilizada como parâmetro auxiliar no processamento, uma vez que influencia diretamente os cálculos de radiação e evapotranspiração. O processamento resultou em um conjunto de nove covariáveis ambientais integradas, capazes de representar de forma mais abrangente as condições climáticas atuantes ao longo do ciclo da cultura, contemplando as dimensões térmicas, hídricas e energéticas do ambiente (Tabela 2).

**Tabela 2** – Covariáveis ambientais utilizadas na caracterização ecofisiológica dos ambientes experimentais

Covariável	Descrição	Unidade	Conjunto
Tmean	Temperatura média diária do ar a 2 m de altura	°C	Térmico
Tmax	Temperatura máxima diária do ar a 2 m de altura	°C	Térmico
Tmin	Temperatura mínima diária do ar a 2 m de altura	°C	Térmico
Trange	Amplitude térmica diária (T2M_MAX – T2M_MIN)	°C	Térmico
Prec	Precipitação total diária	mm dia <sup>-1</sup>	Hídrico
ETP	Evapotranspiração potencial diária	mm dia <sup>-1</sup>	Hídrico
PETP	Evapotranspiração potencial padronizada diária	mm dia <sup>-1</sup>	Hídrico
Rad	Radiação solar incidente na superfície	MJ m <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup>	Energético
GDD	Graus-dia de desenvolvimento acumulados (Tb = 10 °C)	°C dia	Térmico

Essas covariáveis foram organizadas em uma matriz ambiental (matriz W), na qual cada linha representou um ambiente e cada coluna representou uma covariável ambiental resumida pela média ao longo do ciclo da cultura (Figura 4). As covariáveis foram centralizadas e escaladas, de modo que todas contribuíssem igualmente para a caracterização ambiental, evitando a influência de diferenças de escala. A precipitação foi considerada na forma de média diária ao longo do ciclo da cultura, de modo a permitir a

comparação entre ambientes com durações de ciclo distintas e manter coerência com as demais variáveis climáticas expressas como médias temporais. A precipitação acumulada no ciclo foi relatada de forma descritiva.

Para assegurar coerência biológica na interpretação do índice, o sinal das covariáveis associadas a maior intensidade de estresse térmico e atmosférico, temperatura média (Tmean), temperatura máxima (Tmax), temperatura mínima (Tmin), amplitude térmica (Trange), evapotranspiração potencial (ETP) e evapotranspiração potencial padronizada (PETP), foi invertido previamente à agregação, de modo que valores mais elevados do índice representassem condições relativamente mais favoráveis.

A partir da matriz ambiental padronizada, foi construído um índice ambiental (IA) com o objetivo de sintetizar, em uma única métrica, o conjunto de condições climáticas atuantes em cada ambiente ao longo do ciclo da cultura (Figura 4). O índice foi obtido pela soma dos valores padronizados das covariáveis ambientais, assumindo pesos iguais para todas elas. Dessa forma, o IA representa um gradiente climático integrado e relativo entre os ambientes avaliados, no qual valores mais elevados indicam ambientes relativamente mais favoráveis sob o conjunto de covariáveis consideradas, enquanto valores mais baixos indicam condições relativamente menos favoráveis.

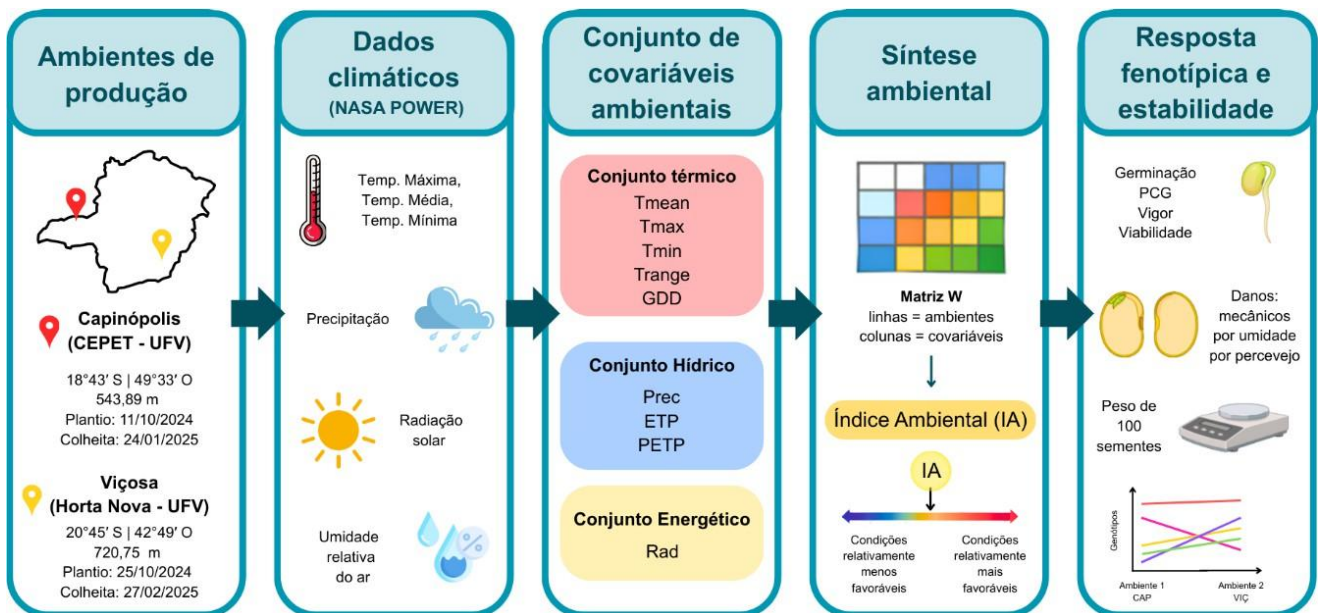


Figura 4 – Esquema conceitual da integração entre dados ambientais e qualidade fisiológica de sementes. Os ambientes de produção são caracterizados por dados climáticos diários, organizados em conjuntos de covariáveis ambientais que representam diferentes dimensões do ambiente (térmica, hídrica e energética). Essas covariáveis são sintetizadas em uma matriz ambiental (W) e posteriormente reduzidas a um índice ambiental contínuo, que expressa um gradiente climático integrado. O índice ambiental é então utilizado para avaliar a resposta fenotípica e a estabilidade dos

genótipos para variáveis de qualidade fisiológica das sementes.

## 2.6. Análises estatísticas

Os dados foram organizados e analisados por meio da linguagem de programação R (R Core Team, 2025), utilizando-se os pacotes *tidyverse* (Wickham et al., 2019), *emmeans* (Lenth; Piaskowski, 2025) para obtenção de médias ajustadas em modelos lineares e *lme4* (Bates et al., 2015) para ajuste de modelos lineares mistos e estimação dos valores genotípicos preditos.

Inicialmente, realizou-se a caracterização descritiva das variáveis avaliadas nos dois ambientes de produção, com o cálculo dos valores mínimo, máximo e média geral, bem como do coeficiente de variação (CV) entre os terços da planta (TS, TM e TI), a fim de descrever a amplitude dos dados e a variabilidade vertical da qualidade das sementes ao longo do dossel.

Para avaliar o efeito da posição no dossel, as variáveis de qualidade fisiológica das sementes e o peso de 100 sementes (P100) foram submetidos, separadamente em cada ambiente, à análise de variância considerando delineamento em blocos completos casualizados, em que os terços (TS, TM e TI) foram considerados como tratamentos e os genótipos como blocos, adotando-se modelo linear aditivo com uma observação por combinação tratamento × bloco. As médias dos terços foram obtidas por meio de estimativas de médias ajustadas (*estimated marginal means*) e, quando identificadas diferenças entre tratamentos, comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. A normalidade dos resíduos foi verificada pelo teste de Shapiro–Wilk.

Para as variáveis relacionadas aos danos mecânicos, danos por umidade e danos por percevejo, devido à elevada variabilidade e à distribuição assimétrica dos dados, optou-se por abordagem descritiva. Foram apresentadas as médias por terço obtidas a partir dos valores observados nos diferentes genótipos, com a finalidade de caracterizar a distribuição dos danos ao longo do dossel. Para essas variáveis, não foram realizadas comparações estatísticas entre os terços.

O desempenho médio dos genótipos foi caracterizado separadamente em cada ambiente por meio do cálculo de médias descritivas das variáveis avaliadas, considerando os valores observados nos diferentes terços da planta (PI, TS, TM e TI). Adicionalmente, foi determinado o coeficiente de variação (CV, %) das variáveis, calculado individualmente para cada genótipo e ambiente, com base nos valores observados nos terços TS, TM e TI, a fim de estimar a magnitude da variação ao longo do dossel dentro de cada material.

A sensibilidade ambiental dos genótipos foi avaliada com base em valores fenotípicos ajustados, estimados por meio de modelos lineares mistos ajustados pelo método da máxima verossimilhança restrita (REML). Para cada variável, foi ajustado modelo considerando como efeitos fixos o ambiente e a posição no dossel, e como efeitos aleatórios o genótipo e sua

interação com o ambiente. A partir dos modelos ajustados, foram obtidos os valores genotípicos preditos para cada combinação genótipo × ambiente. A sensibilidade ambiental foi então quantificada pela diferença absoluta entre os valores ajustados obtidos nos dois ambientes contrastantes ( $\Delta$ ), calculada individualmente para cada genótipo e variável. Nesse contexto,  $\Delta$  representa a magnitude da variação fenotípica entre ambientes, sendo valores menores indicativos de maior estabilidade fenotípica entre os ambientes avaliados. Adicionalmente, foram construídos gráficos de reação normativa com base nos valores ajustados padronizados por variável, permitindo a visualização do padrão de resposta relativa dos genótipos aos ambientes considerados.

Por fim, a uniformidade vertical da qualidade fisiológica das sementes foi avaliada por meio da distância de Mahalanobis (De Maesschalck; Jouan-Rimbaud; Massart, 2000). Para cada combinação genótipo × ambiente, foi calculado o vetor médio multivariado com base nas variáveis avaliadas nos terços superior, médio e inferior (TS, TM e TI). Para cada combinação genótipo × ambiente de produção, foi definido o centróide multivariado do grupo a partir das variáveis avaliadas. A distância de cada terço da planta (TS, TM e TI) em relação a esse centro foi estimada utilizando a matriz de covariância global obtida a partir do conjunto total de observações. A média das distâncias foi adotada como índice de desuniformidade vertical, sendo valores menores indicativos de maior homogeneidade ao longo do dossel. A distância foi calculada conforme:

$$D^2 = (x - \mu)^T \Sigma^{-1} (x - \mu)$$

em que  $x$  representa o vetor de médias das variáveis avaliadas para cada terço da planta,  $\mu$  corresponde ao centróide multivariado da combinação genótipo × ambiente de produção, e  $\Sigma^{-1}$  é a inversa da matriz de covariância global estimada a partir do conjunto total de observações.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao longo do ciclo de produção das sementes, os ambientes de Capinópolis e Viçosa apresentaram padrões climáticos contrastantes, refletindo diferenças marcantes nas condições térmicas, hídricas e energéticas. A dinâmica temporal detalhada das covariáveis climáticas e ecofisiológicas ao longo do ciclo da cultura em cada ambiente é apresentada no Apêndice A (Figuras A1 a A5).

A precipitação acumulada ao longo do ciclo em Capinópolis foi de 565 mm e em Viçosa foi de 470,7 mm (Figura 5). Assim, os dois locais não atingiram a precipitação mínima considerada satisfatória para obter altos rendimentos na soja, que é de 800 mm (Zanon;

Streck; Grassini, 2016). Em Capinópolis, observou-se uma precipitação média relativamente elevada, incluindo o mês de janeiro, período em que ocorreu a colheita. Em Viçosa, por sua vez, a precipitação mostrou-se distribuída ao longo de novembro, dezembro e janeiro, enquanto outubro, correspondente ao período de plantio, e fevereiro, mês da colheita, apresentaram as menores médias de precipitação. Quanto ao regime térmico, Capinópolis apresentou temperaturas médias superiores ao longo de todo o ciclo em comparação a Viçosa, refletindo condições mais quentes durante as fases de desenvolvimento, maturação e colheita das sementes (Figura 5). Em conjunto, esses contrastes caracterizam ambientes climaticamente distintos, com potencial para modular de forma diferenciada a expressão da qualidade fisiológica das sementes.

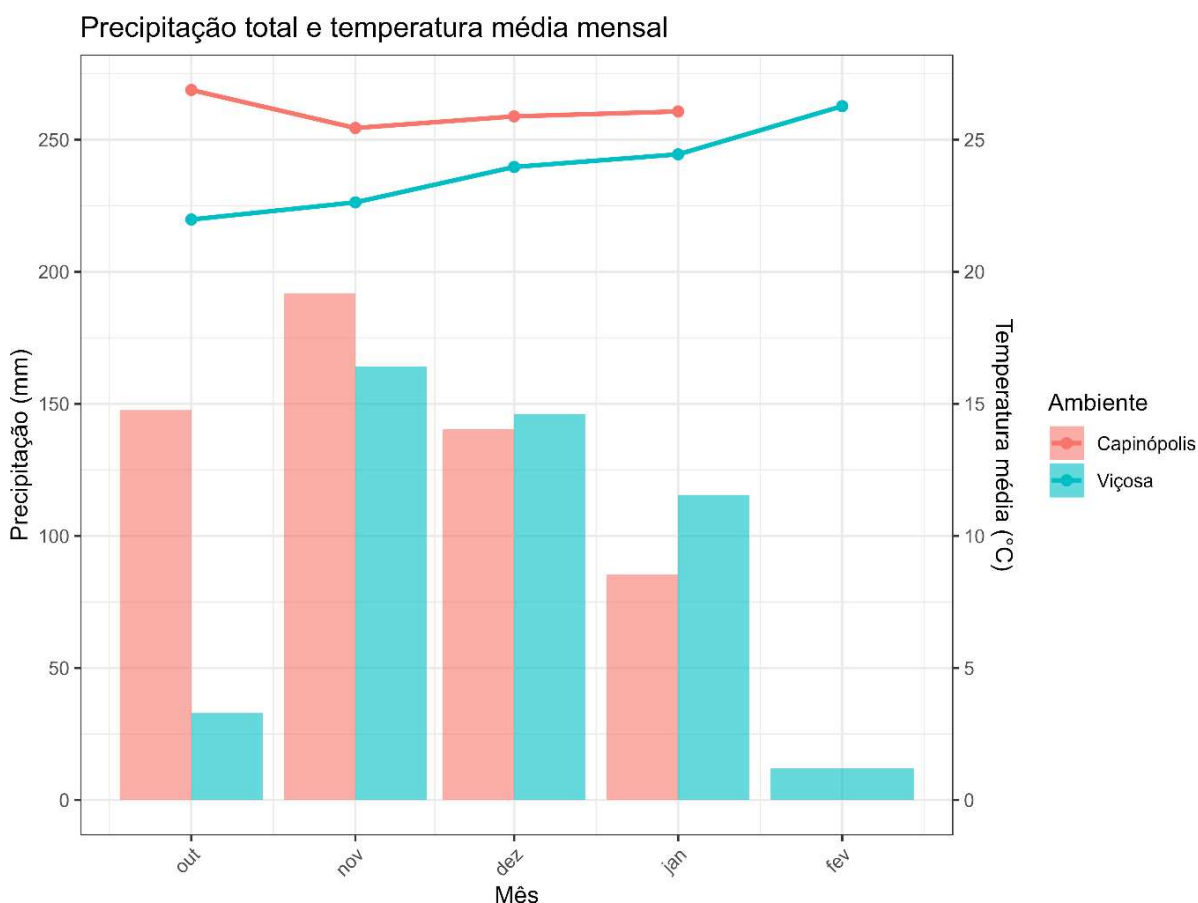


Figura 5 – Precipitação total mensal (mm) e temperatura média mensal (°C) registradas durante o período experimental nos ambientes de Capinópolis e Viçosa, no estado de Minas Gerais. As barras representam o total mensal de precipitação e as linhas representam a temperatura média mensal em cada ambiente.

O índice ambiental evidenciou contraste consistente entre os ambientes avaliados, apresentando valor negativo em Capinópolis (IA = -0,71) e positivo em Viçosa (IA = 0,71). Esse padrão indica que, no conjunto das covariáveis consideradas, Viçosa reuniu condições

climaticamente mais favoráveis à produção de sementes de maior qualidade em relação a Capinópolis. Dessa forma, o índice ambiental sintetizou o contraste entre os ambientes e estabelece a base para interpretar as respostas fenotípicas observadas nas variáveis de qualidade fisiológica.

A decomposição do índice ambiental a partir da contribuição relativa das covariáveis (Figura 6) demonstra que, embora Capinópolis tenha apresentado maior radiação solar média e maior precipitação total, esses fatores não foram suficientes para compensar o efeito limitante do regime térmico mais elevado. As temperaturas médias e máximas superiores, associadas ao maior acúmulo térmico e à maior demanda evaporativa, contribuíram negativamente para o desempenho ambiental relativo desse local, sobretudo no período correspondente à maturação e à pré-colheita, fases reconhecidamente sensíveis para a manutenção da qualidade fisiológica das sementes. Em contraste, Viçosa, apesar da menor oferta energética e menor precipitação média diária, apresentou condições térmicas mais amenas, caracterizadas por temperaturas máximas inferiores e menor demanda atmosférica. Esse conjunto de condições resultou em índice ambiental positivo, sugerindo ambiente relativamente mais favorável à produção de sementes de soja de maior qualidade. Assim, o equilíbrio entre fatores promotores e restritivos resultou em índice ambiental positivo para Viçosa e negativo para Capinópolis. O destaque do regime térmico como principal componente do contraste ambiental é coerente com a fisiologia da soja, cultura de elevada exigência térmica e sensível a estresses durante a fase reprodutiva (Gaynor; Lawn; James, 2011).

Esse padrão é coerente com o zoneamento agroclimático proposto por Pádua et al. (2014), no qual o risco climático para produção de sementes de soja foi definido com base na temperatura média do mês de março, período correspondente à maturação e à pré-colheita de lavouras semeadas em novembro. No presente estudo, entretanto, a soja foi semeada em outubro, com a colheita realizada no final de janeiro em Capinópolis e no final de fevereiro em Viçosa, o que desloca o período crítico de maturação e pré-colheita para meses anteriores ao considerado no zoneamento.

Ao analisar a temperatura média do último mês do ciclo em cada ambiente (Figura 4), observaram-se valores semelhantes: 26,06 °C em janeiro, em Capinópolis, e 26,26 °C em fevereiro, em Viçosa. Porém, em Capinópolis, esse regime térmico ocorreu associado a elevada precipitação, enquanto em Viçosa o período final do ciclo foi caracterizado por menor disponibilidade hídrica. De acordo com França-Neto et al. (2016), a fase final do ciclo da soja, compreendendo a maturação e a pré-colheita, deve ocorrer sob temperaturas amenas e clima seco para a obtenção de sementes de alta qualidade fisiológica. Dessa forma, mesmo com temperaturas médias semelhantes no último mês do ciclo, a combinação de temperaturas elevadas e alta precipitação em Capinópolis configurou condições menos favoráveis à

produção de sementes de alta qualidade quando comparadas às observadas em Viçosa, em coerência com o contraste ambiental previamente sintetizado pelo índice.

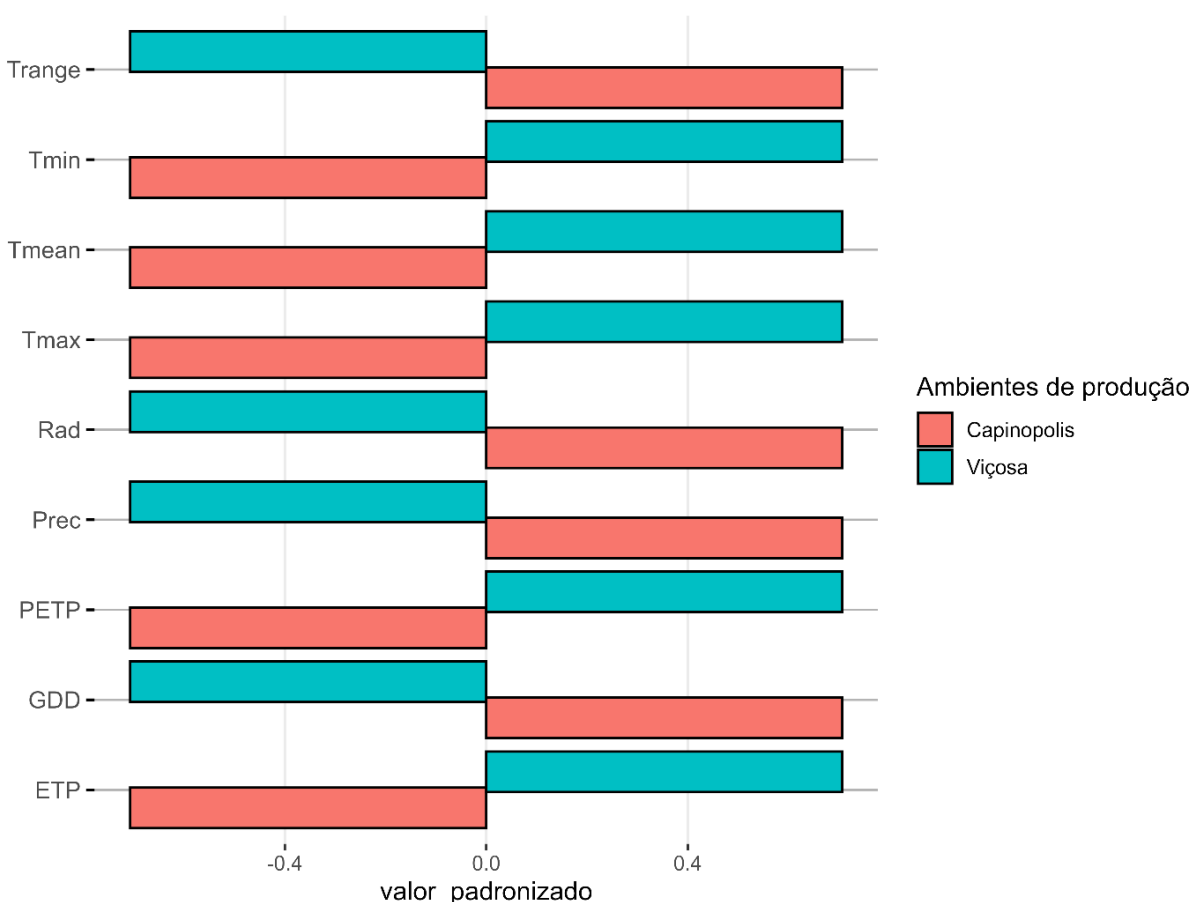


Figura 6 - Contribuição relativa das covariáveis climáticas e ecofisiológicas padronizadas para o índice ambiental (IA), evidenciando o papel dos fatores térmicos, hídricos, energéticos e de tempo térmico na diferenciação ambiental entre Capinópolis e Viçosa. Valores positivos indicam condições relativamente mais favoráveis à produção de sementes de alta qualidade, inclusive para variáveis associadas a estresse, cujos sinais foram previamente invertidos na matriz ambiental (W). Tmean = temperatura média do ar; Tmax = temperatura máxima do ar; Tmin = temperatura mínima do ar; Trange = amplitude térmica diária; Prec = precipitação total diária; ETP = evapotranspiração potencial diária; PETP = evapotranspiração potencial padronizada diária; Rad = radiação solar incidente; GDD = graus-dia acumulados.

Os dados descritivos da qualidade fisiológica das sementes dos genótipos selecionados (G1, G2, G3, G4, G5 e G9) produzidas em Capinópolis e Viçosa, incluindo os valores médios das variáveis avaliadas por genótipo e por terço da planta, as médias gerais e os coeficientes de variação entre os terços do dossel, são apresentados no Apêndice A.

As médias gerais de germinação, primeira contagem de germinação (PCG), vigor e viabilidade indicam tendência geral de maior qualidade fisiológica das sementes produzidas em Viçosa (Tabela 3). A viabilidade manteve-se elevada e com baixa variabilidade nos dois

ambientes, evidenciando a estabilidade dessa característica independentemente das condições de produção. Conforme discutido no capítulo anterior, os elevados valores de viabilidade podem estar associados ao fato de o teste de tetrazólio não detectar a presença de microrganismos, os quais podem comprometer o desempenho das sementes no teste de germinação (Oliveira; Carvalho; Davide, 2005).

Nos dois ambientes, o peso de 100 sementes (P100) apresentou baixo coeficiente de variação entre os terços, sugerindo que essa característica é mais constante ao longo do dossel.

Para as variáveis relacionadas aos danos, observaram-se contrastes mais pronunciados entre os ambientes. O ambiente Viçosa apresentou menores médias de DM18 e DP18 do que o ambiente Capinópolis. Os dois ambientes tiveram médias próximas de DU18. Em relação aos danos severos (DM68, DU68 e DP68 as médias foram, de modo geral, inferiores em Viçosa, embora acompanhadas de elevados coeficientes de variação em ambos os ambientes, indicando ocorrência irregular e heterogênea desses danos.

Em conjunto, esses resultados sugerem que o ambiente de produção influenciou o nível médio de expressão da qualidade fisiológica, representada pelas variáveis de germinação, vigor e viabilidade, e da qualidade física das sementes, associada à incidência de danos mecânicos, por umidade e por percevejo (Marcos Filho, 2015).

**Tabela 3** – Valores mínimo, máximo, média geral e coeficiente de variação (CV) de dados de germinação, vigor e presença de danos em sementes obtidas dos diferentes terços das plantas.

Variável	Mínimo		Máximo		Média geral		CV entre terços (%)	
	CAP	VIC	CAP	VIC	CAP	VIC	CAP	VIC
Germ (%)	52,5	41,0088,00	93,50	58,40	72,73	13,63	11,54	
PCG (%)	43,5	38,0075,00	92,00	69,31	78,17	11,95	11,40	
Vigor (%)	40,00	37,0078,00	93,00	63,50	72,71	11,26	10,77	
Viab (%)	79,00	70,0099,00	100,00	89,00	92,67	4,63	4,16	
DM18 (%)	28,00	7,0082,00	50,00	57,83	19,04	17,73	35,95	
DM68 (%)	0,00	0,0010,00	12,00	5,33	2,50	55,78	48,40	
DU18 (%)	21,00	35,0088,00	83,00	61,88	63,63	22,35	12,12	
DU68 (%)	0,00	0,0013,00	20,00	6,08	4,71	73,59	75,19	
DP18 (%)	7,00	1,0026,00	26,00	17,88	9,29	28,93	52,92	
DP68 (%)	0,00	0,0010,00	13,00	3,04	2,33	78,55	96,74	
P100 (g)	13,79	12,0719,90	21,75	16,04	16,77	4,93	5,60	

Nota: CAP = Capinópolis; VIC = Viçosa; Germ = germinação; PCG = primeira contagem de germinação; Vigor = vigor avaliado por meio do teste de tetrazólio; Viab = viabilidade avaliada por meio do teste de

tetrazólio; DM18 e DM68 = danos mecânicos classificados nas classes de 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente; DU18 e DU68 = danos por umidade classificados nas classes de 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente; DP18 e DP68 = danos por percevejo classificados nas classes de 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente; P100 = peso de 100 sementes.

As médias ajustadas diferiram entre os terços da planta, conforme indicado pelas letras distintas, considerando o ajuste para o efeito de genótipo no modelo (Tabela 4). Em Capinópolis, observaram-se diferenças entre os terços para as variáveis germinação e primeira contagem de germinação, com maiores valores no terço superior do dossel e valores inferiores nos terços médio e inferior, evidenciando um gradiente vertical consistente para essas características. Por outro lado, vigor, viabilidade e peso de 100 sementes não apresentaram variação detectável entre os terços nesse ambiente, indicando distribuição mais homogênea dessas variáveis ao longo do dossel. Em Viçosa, por sua vez, não foram observadas diferenças entre os terços para nenhuma das variáveis avaliadas, sugerindo maior uniformidade vertical da qualidade fisiológica das sementes nesse ambiente. Esse padrão sugere que as condições ambientais podem ter influenciado a magnitude da variação ao longo do dossel da qualidade das sementes.

Tabela 4 – Médias ajustadas das variáveis de qualidade fisiológica e peso de 100 sementes em função do terço da planta.

Variável	Capinópolis			Viçosa		
	TS	TM	TI	TS	TM	TI
Germ (%)	77,75 a	67,08 b	63,25 b	84,17 a	72,58 a	78,00 a
PCG (%)	66,50 a	56,83 b	53,58 b	78,00 a	67,17 a	72,83 a
Vigor (%)	64,17 a	62,83 a	62,33 a	78,67 a	70,67 a	69,33 a
Viab (%)	90,33 a	90,83 a	87,33 a	95,00 a	90,5 a	90,50 a
P100 (g)	15,57 a	16,52 a	15,57 a	16,20 a	16,54 a	16,96 a

Nota: Médias ajustadas (*emmeans*) seguidas pela mesma letra, dentro de cada ambiente e para cada variável, não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p \leq 0,05$ ). As comparações foram realizadas separadamente para Capinópolis e Viçosa. TS = Terço superior; TM = Terço médio; TI = Terço inferior; Germ = germinação; PCG = primeira contagem de germinação; Vigor = vigor avaliado por meio do teste de tetrazólio; Viab = viabilidade avaliada por meio do teste de tetrazólio; P100 = peso de 100 sementes.

As variáveis relacionadas aos danos apresentaram, elevados coeficientes de variação, indicando distribuição irregular ao longo do dossel. Assim, as médias apresentadas possuem caráter exclusivamente descritivo (Tabela 5).

Em Capinópolis, observou-se aumento progressivo da frequência de danos mecânicos (DM18 e DM68) e danos por percevejos (DP18 e DP68) do terço superior para o terço inferior

da planta, indicando maior exposição ou suscetibilidade das sementes formadas nas posições mais baixas do dossel a esse tipo de injúria. Em contraste, os danos por umidade de amplo espectro (DU18) apresentaram maiores valores no terço superior, com redução nos terços médio e inferior, enquanto os danos severos por umidade (DU68) não exibiram um gradiente vertical consistente. Em Viçosa, as frequências de danos mecânicos e por percevejos foram, de modo geral, inferiores às observadas em Capinópolis, embora também tenham apresentado valores ligeiramente mais elevados nos terços médio e inferior. Por outro lado, os danos por umidade, mostraram tendência de aumento em direção ao terço inferior.

As diferenças observadas entre os ambientes estão relacionadas às condições climáticas durante a fase final do ciclo, uma vez que, no último mês de cultivo em Viçosa, registrou-se menor volume de precipitação em comparação a Capinópolis (Figura 5). Esse contraste hídrico pode ter contribuído para a menor proporção de danos por umidade no terço superior em Viçosa e para a maior incidência desse tipo de dano na mesma posição em Capinópolis. Em conjunto, os resultados indicam que a distribuição vertical dos danos nas sementes constitui um componente relevante da variação na qualidade ao longo do dossel, podendo intensificar ou atenuar a desuniformidade associada às condições ambientais de produção.

**Tabela 5** – Médias descritivas da frequência de danos mecânicos, por umidade e por percevejo em sementes, em função do terço da planta.

Variável	Capinópolis			Viçosa		
	TS	TM	TI	TS	TM	TI
DM18 (%)	49,00	56,00	62,50	16,33	21,67	21,50
DM68 (%)	4,17	4,33	5,50	1,83	3,50	3,17
DU18 (%)	73,83	63,33	50,50	55,83	63,33	64,5
DU68 (%)	6,50	4,33	6,50	2,50	6,50	6,67
DP18 (%)	15,17	19,00	22,83	7,33	9,00	11,33
DP68 (%)	2,17	2,50	5,50	1,50	2,00	3,67

Nota: As médias apresentadas correspondem às médias observadas por terço, calculadas a partir dos valores obtidos nos diferentes genótipos, sendo utilizadas exclusivamente para descrição da distribuição dos danos ao longo do dossel. Não foram realizadas comparações estatísticas entre os terços. DM18 e DM68 = danos mecânicos classificados nas classes de 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente; DU18 e DU68 = danos por umidade classificados nas classes de 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente; DP18 e DP68 = danos por percevejo classificados nas classes de 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente.

A análise das médias gerais das variáveis avaliadas por genótipo (Tabela A4) evidenciou respostas contrastantes das linhagens elite de soja aos ambientes de produção,

tanto em termos de desempenho fisiológico médio quanto de incidência de danos.

Em Viçosa, apenas as sementes dos genótipos G2 e G5 atingiram germinação média superior a 80%, valor mínimo exigido a comercialização de sementes no Brasil (Brasil, 2013). Os genótipos G3, G4 e G9 apresentaram percentuais de germinação intermediários, variando entre 75 e 77%, enquanto o genótipo G1 apresentou germinação média de aproximadamente 60%. Em Capinópolis, por sua vez, apenas o genótipo G4 apresentou germinação superior a 80%, ao passo que os demais genótipos apresentaram valores inferiores a 72%.

Em Capinópolis, o genótipo G4 destacou-se pelos maiores valores médios de germinação, primeira contagem de germinação, vigor e viabilidade, associados a menores frequências de danos severos. Em contraste, os genótipos G2 e G3 apresentaram desempenho intermediário e G1, G5 e G9 apresentaram desempenho fisiológico reduzido nesse ambiente, com menores valores de germinação e PCG e maior ocorrência de danos.

Em Viçosa, observou-se alteração parcial desse padrão, com os genótipos G2 e G5 apresentando elevados valores médios de germinação, vigor e viabilidade, aliados a baixas frequências de danos mecânicos e por percevejos, caracterizando alto desempenho fisiológico em ambiente mais favorável. Os genótipos G3, G4 e G9 apresentaram desempenho intermediário em Viçosa, enquanto o genótipo G1 manteve valores relativamente baixos em ambos os ambientes.

De forma integrada, os resultados indicam que os genótipos diferiram não apenas quanto ao desempenho médio, mas também quanto à magnitude e à direção da resposta aos ambientes de produção, evidenciando a presença de interação genótipos  $\times$  ambientes na expressão da qualidade fisiológica das sementes.

Essa variação entre genótipos foi acompanhada por diferenças na uniformidade das variáveis avaliadas ao longo dos terços da planta, conforme indicado pelos coeficientes de variação (CVs) (Tabela A5).

Em Capinópolis, os CVs das variáveis associadas ao desempenho fisiológico (germinação, PCG, vigor e viabilidade) foram, de modo geral, moderados, evidenciando desuniformidade dessas características em magnitudes distintas entre os genótipos. O genótipo G4 destacou-se por apresentar os menores CVs, indicando maior homogeneidade dessas variáveis ao longo do dossel, enquanto G1, G2 e G5 apresentaram maior variação entre os terços.

Em Viçosa, observou-se padrão parcialmente contrastante, com redução dos CVs para germinação, PCG e vigor em genótipos como G2, G5 e G9, indicando menor variação dessas características nesse ambiente. Por outro lado, G1 apresentou aumento dos CVs em relação a Capinópolis, evidenciando intensificação da desuniformidade entre os terços mesmo sob condições ambientais mais favoráveis.

Para as variáveis relacionadas aos danos, os CVs foram elevados em ambos os

ambientes e para a maioria dos genótipos, especialmente para os danos severos (DM68, DU68 e DP68), refletindo a ocorrência irregular desses eventos ao longo do dossel e reforçando seu caráter pontual e dependente de condições específicas.

De forma geral, os resultados indicam que os genótipos diferiram quanto à estabilidade das características individuais ao longo da planta e que o ambiente de produção modulou, de maneira dependente do genótipo, tanto o desempenho médio quanto a uniformidade das variáveis de qualidade física e fisiológica das sementes.

A resposta fenotípica dos genótipos aos dois ambientes contrastantes foi inicialmente examinada por meio da representação gráfica dos valores ajustados para cada combinação genótipo × ambiente (Figura 8). Embora a análise envolva apenas dois ambientes, configurando um segmento de reta entre dois pontos para cada genótipo, essa abordagem permite visualizar a direção e o padrão da variação fenotípica, bem como inferir a presença de interação genótipos × ambientes (G×A).

De modo geral, a ausência de paralelismo entre as retas indica que os genótipos respondem de maneira diferencial às mudanças ambientais. Quando as linhas apresentam inclinações distintas, mas não se cruzam, caracteriza-se interação do tipo simples, na qual ocorre alteração na magnitude das diferenças entre genótipos sem mudança na sua classificação relativa entre ambientes. Por outro lado, o cruzamento das linhas indica interação do tipo complexa, evidenciando mudança na superioridade relativa dos genótipos entre os ambientes avaliados.

Para as variáveis associadas à qualidade fisiológica (germinação, primeira contagem de germinação e vigor), observaram-se retas com inclinações distintas e, em alguns casos, cruzamentos, indicando a ocorrência tanto de interação simples quanto complexa, dependendo da característica considerada. Esse comportamento sugere que a posição relativa de determinados genótipos variou entre os ambientes, refletindo diferenças na forma como cada material respondeu às condições de produção.

Para as variáveis relacionadas a danos, especialmente DM18, as retas apresentaram inclinações acentuadas e tendência ao paralelismo, caracterizando predominantemente interação do tipo simples. Neste caso, houve alteração da magnitude da resposta ambiental, mas tendência de manutenção do padrão relativo entre genótipos. Em contraste, variáveis como P100 e DU18 apresentaram cruzamentos pontuais entre algumas linhagens, indicando a presença de componentes de interação complexa nessas características.

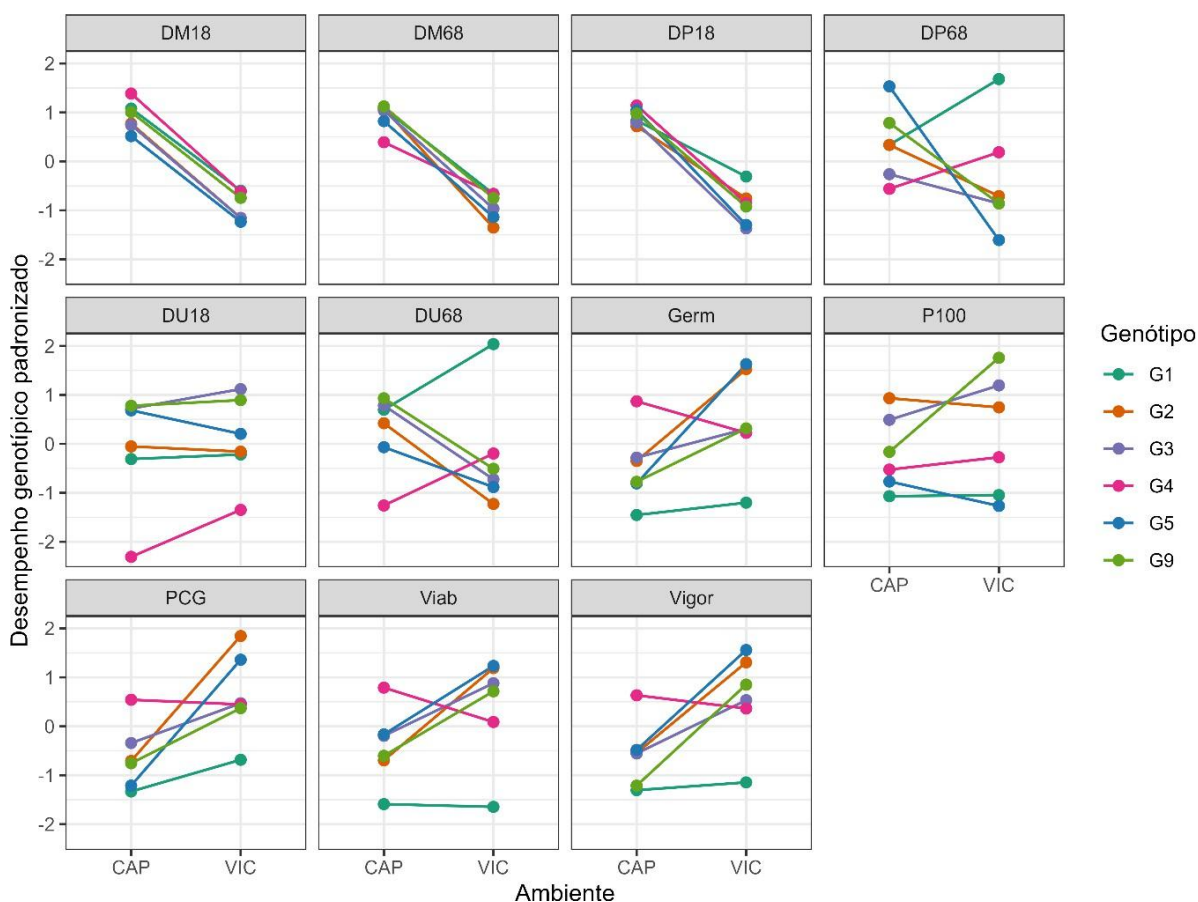


Figura 8 – Representação gráfica da resposta fenotípica ajustada dos genótipos em dois ambientes contrastantes. Cada linha representa um genótipo, e a inclinação e o paralelismo das retas indicam o padrão de interação genótipo  $\times$  ambiente. CAP = Capinópolis; VIC = Viçosa; Germ = germinação; PCG = primeira contagem de germinação; Vigor = vigor avaliado por meio do teste de tetrazólio; Viab = viabilidade avaliada por meio do teste de tetrazólio; DM18 e DM68 = danos mecânicos classificados nas classes de 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente; DU18 e DU68 = danos por umidade classificados nas classes de 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente; DP18 e DP68 = danos por percevejo classificados nas classes de 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente; P100 = peso de 100 sementes.

A magnitude da resposta ambiental foi quantificada por meio da diferença absoluta entre os valores ajustados obtidos nos dois ambientes ( $\Delta$ ), apresentada na Tabela 6. Essa métrica expressa a intensidade da variação fenotípica entre ambientes para cada genótipo e variável, permitindo comparar o grau de sensibilidade ambiental entre os materiais avaliados.

Para as variáveis associadas à qualidade fisiológica, observou-se variação expressiva nos valores de  $\Delta$  entre genótipos. Para germinação, os menores valores foram registrados para G1, G3 e G4, indicando menor sensibilidade ambiental relativa, enquanto G2 e G5 apresentaram maiores diferenças entre ambientes, evidenciando maior responsividade às condições de produção. Tendência semelhante foi observada para vigor, com  $\Delta$  reduzido para G1 e G4 e valores mais elevados para G2, G5 e G9.

A primeira contagem de germinação apresentou, de modo geral, valores de  $\Delta$  superiores aos observados para germinação final, especialmente para G2 e G5, sugerindo que variações no ambiente de produção afetam de forma mais pronunciada os atributos associados ao vigor das sementes, refletidos na velocidade e no estabelecimento inicial das plântulas. Em contraste, a viabilidade apresentou valores de  $\Delta$  relativamente baixos para a maioria dos genótipos, indicando menor variação entre ambientes e reforçando a estabilidade dessa característica.

Entre as variáveis relacionadas a danos, DM18 apresentou os maiores valores de  $\Delta$ , evidenciando elevada intensidade de resposta ambiental para todos os genótipos. Contudo, conforme observado na análise gráfica, essa variação ocorreu predominantemente sob interação do tipo simples, indicando que a diferença entre ambientes alterou a magnitude dos danos sem modificar substancialmente a classificação relativa dos materiais. Já as variáveis associadas a danos severos (DM68, DU68 e DP68) apresentaram valores de  $\Delta$  mais moderados, com variação entre genótipos. Para DU18, observou-se baixa magnitude de resposta para a maioria dos materiais, com exceção de G4, que apresentou maior sensibilidade relativa.

O peso de 100 sementes (P100) apresentou, de modo geral, valores reduzidos de  $\Delta$ , indicando menor intensidade de variação entre ambientes, embora genótipos como G9 tenham apresentado resposta mais pronunciada.

**Tabela 6** – Magnitude da sensibilidade ambiental ( $\Delta$ ) dos genótipos para características de qualidade fisiológica e física das sementes avaliadas em dois ambientes contrastantes.

Variável	G1	G2	G3	G4	G5	G9	
Germ ( $\Delta$ )		2,39	17,80	5,58	6,11	23,10	10,40
PCG ( $\Delta$ )		7,31	28,80	9,19	1,07	29,00	12,70
Vigor ( $\Delta$ )		1,27	14,70	8,67	2,14	16,30	16,40
Viab ( $\Delta$ )		0,25	8,43	4,81	3,14	6,26	5,90
DM18 ( $\Delta$ )		35,40	40,80	40,10	42,40	37,00	37,10
DM68 ( $\Delta$ )		2,68	3,74	3,08	1,62	3,01	2,88
DU18 ( $\Delta$ )		1,00	1,14	4,26	10,30	5,16	1,25
DU68 ( $\Delta$ )		3,67	4,51	4,13	2,91	2,23	3,94
DP18 ( $\Delta$ )		5,35	6,89	10,10	9,32	11,00	8,88
DP68 ( $\Delta$ )		1,32	1,03	0,59	0,73	3,08	1,61
P100 ( $\Delta$ )		0,04	0,37	1,39	0,50	0,98	3,80

Nota:  $\Delta$  foi calculado a partir dos valores genotípicos ajustados estimados por modelos lineares mistos. Valores mais altos indicam maior sensibilidade ambiental, enquanto valores mais baixos indicam menor

intensidade de resposta entre ambientes. CAP = Capinópolis; VIC = Viçosa; Germ = germinação; PCG = primeira contagem de germinação; Vigor = vigor avaliado por meio do teste de tetrazólio; Viab = viabilidade avaliada por meio do teste de tetrazólio; DM18 e DM68 = danos mecânicos classificados nas classes de 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente; DU18 e DU68 = danos por umidade classificados nas classes de 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente; DP18 e DP68 = danos por percevejo classificados nas classes de 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente; P100 = peso de 100 sementes.

A análise conjunta da representação gráfica (Figura 8) e dos valores de  $\Delta$  (Tabela 6) demonstra que a sensibilidade ambiental dos genótipos deve ser interpretada considerando simultaneamente a intensidade da diferença entre ambientes e a forma como essa variação se expressa. Enquanto o padrão das retas permite identificar a presença e o tipo de interação (simples ou complexa), o valor de  $\Delta$  quantifica a magnitude da resposta entre ambientes, fornecendo perspectivas complementares sobre a variação fenotípica observada.

De modo geral, genótipos como G1 e G4 combinaram baixos valores de  $\Delta$  para germinação, vigor e viabilidade com retas de menor inclinação, indicando resposta ambiental de menor intensidade e maior estabilidade relativa entre os ambientes avaliados. Em contraste, G2 e G5 apresentaram elevados valores de  $\Delta$  para diversas variáveis fisiológicas, associados a inclinações mais acentuadas nas retas de resposta, caracterizando perfil mais responsivo às variações ambientais.

Observou-se ainda que, na variável DM18, a magnitude da diferença entre ambientes foi elevada sem alteração expressiva na classificação relativa entre genótipos, configurando interação predominantemente simples. Em outras, como P100 e DP68 cruzamentos de linhas foram acompanhados de valores moderados de  $\Delta$ , evidenciando que mudanças na superioridade relativa podem ocorrer mesmo quando a intensidade da diferença ambiental não é extrema.

Assim, a combinação entre análise gráfica e quantificação de  $\Delta$  permitiu caracterizar de forma mais abrangente a sensibilidade ambiental dos genótipos, distinguindo entre intensidade da resposta e mudança no ordenamento relativo. Esses resultados reforçam que a expressão da qualidade fisiológica das sementes é condicionada pela interação entre genótipo e ambiente, sendo essa resposta variável conforme a característica considerada.

A uniformidade multivariada da qualidade física e fisiológica das sementes ao longo do dossel foi avaliada por meio da estatística  $D^2$  de Mahalanobis, estimada separadamente para cada ambiente (Figura 9). Essa abordagem considera simultaneamente o conjunto das variáveis avaliadas e incorpora a estrutura de variância-covariância dos dados, permitindo quantificar a divergência multivariada entre os terços superior, médio e inferior dentro de cada genótipo. Valores mais elevados de  $D^2$  indicam maior diferenciação entre os terços no espaço multivariado das características avaliadas, enquanto valores reduzidos refletem maior

uniformidade do conjunto dessas variáveis ao longo da planta.

Foram observadas diferenças consistentes na magnitude dessa divergência multivariada entre ambientes e genótipos. De modo geral, o ambiente de Viçosa apresentou menores valores médios de  $D^2$ , indicando menor diferenciação multivariada entre os terços da planta, enquanto Capinópolis apresentou valores médios mais elevados, refletindo maior desuniformidade vertical. Esse padrão é coerente com os resultados das análises univariadas baseadas no coeficiente de variação (Tabela A5) e com as médias ajustadas por terço (Tabela 5), sugerindo que ambientes mais favoráveis tendem a reduzir a diferenciação da qualidade das sementes entre posições no dossel.

A análise dos valores de  $D^2$  por terço indica que a divergência multivariada da qualidade das sementes não se distribui de forma uniforme ao longo da planta. A magnitude da contribuição relativa de cada terço para a divergência média variou conforme o genótipo e o ambiente. Assim, genótipos com valores médios semelhantes de  $D^2$  podem apresentar padrões distintos de diferenciação entre os terços. Esse comportamento pode ser observado, por exemplo, nos genótipos G2 e G3 em Capinópolis, que apresentaram valores médios próximos de  $D^2$ . Nesse ambiente, o genótipo G2 apresentou maior contribuição do terço inferior para a divergência multivariada enquanto em G3 a maior diferenciação foi observada no terço superior. Em Viçosa, além da redução geral de  $D^2$ , houve alteração na contribuição relativa dos terços: em G2, os terços superior e inferior contribuíram mais intensamente para a divergência, enquanto em G3 a maior contribuição passou a ser do terço médio. Esses resultados indicam que o ambiente modulou não apenas a intensidade média da divergência, mas também o padrão de diferenciação entre posições no dossel.

A melhoria das condições ambientais não afetou de forma uniforme a divergência multivariada da qualidade das sementes entre os materiais. Os genótipos G1 e G4 apresentaram valores elevados de  $D^2$  em ambos os ambientes, indicando maior desuniformidade multivariada ao longo do dossel independentemente das condições de produção, com intensificação dessa variação no ambiente favorável. Em contraste, os demais genótipos apresentaram redução dos valores de  $D^2$  no ambiente Viçosa, evidenciando maior uniformidade multivariada sob condições ambientais menos restritivas.

Esses resultados indicam que a diferenciação multivariada da qualidade das sementes entre os terços possui componente genotípico relevante, cuja expressão pode ser modulada pelas condições ambientais. Isso pode estar associada a características arquiteturais e fisiológicas dos genótipos, como estrutura do dossel e padrão de maturação, as quais interagem com o ambiente para determinar o grau de homogeneidade vertical da qualidade das sementes.

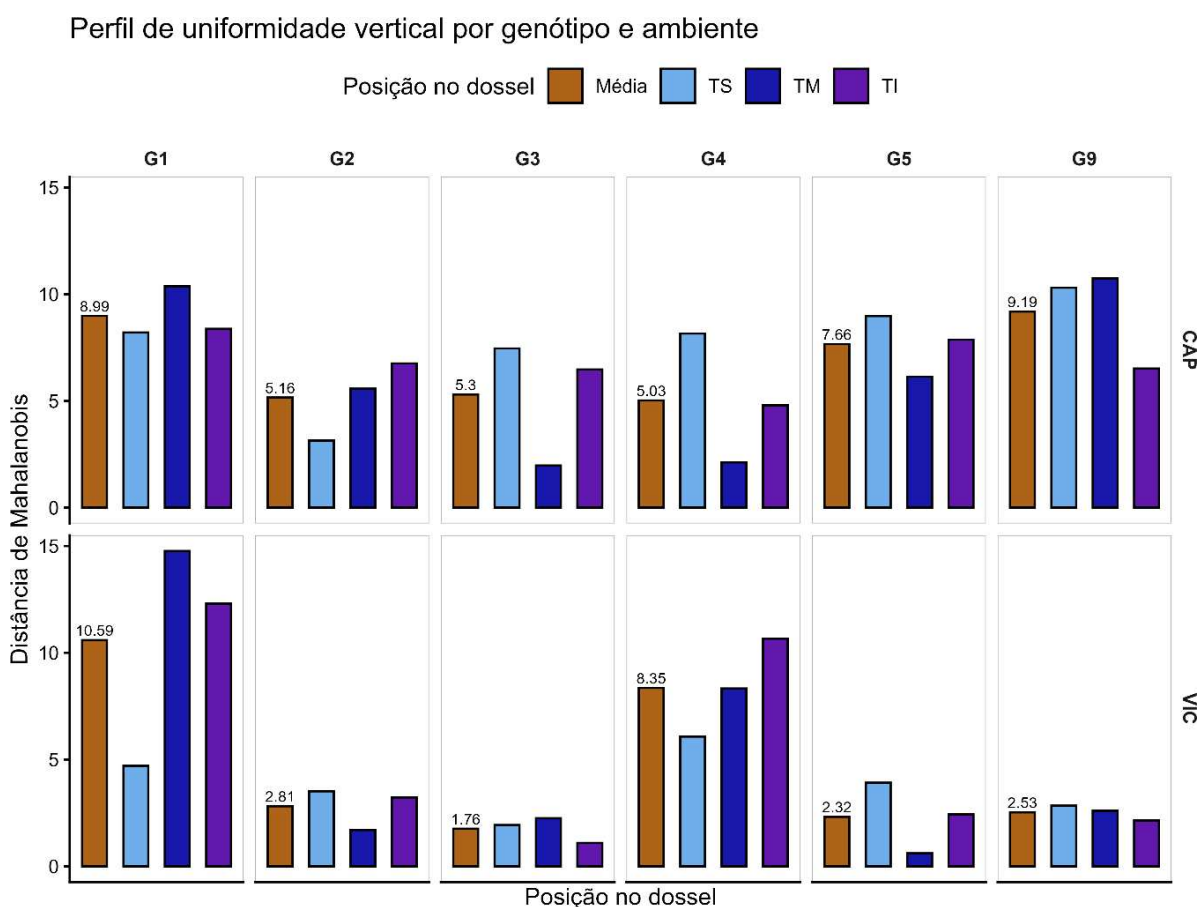


Figura 9 – Uniformidade vertical da qualidade das sementes ao longo do dossel, avaliada por meio da distância de Mahalanobis média ( $D^2$ ), para genótipos produzidos em Capinópolis (CAP) e Viçosa (VIC) em função da posição no dossel (TS = terço superior; TM = terço médio; TI = terço inferior) e da média geral. Valores mais elevados indicam maior divergência multivariada dos perfis avaliados.

A análise integrada do desempenho médio das variáveis de qualidade de sementes, da magnitude de sensibilidade ambiental ( $\Delta$ ) e da divergência multivariada da qualidade das sementes entre os terços ( $D^2$ ) evidencia que esses três componentes descreveram aspectos complementares da resposta dos genótipos aos ambientes de produção. O desempenho médio informou o nível geral de expressão das características; a sensibilidade ambiental quantificou a intensidade da variação das características avaliadas entre ambientes; e a divergência multivariada expressou o grau de uniformidade da qualidade das sementes ao longo do dossel. Essas métricas, portanto, auxiliam na descrição de informações não redundantes sobre o comportamento genotípico.

Genótipos como G2 e G5 apresentaram elevado desempenho médio no ambiente mais favorável, associado a elevada sensibilidade ambiental, porém com redução da divergência multivariada em Viçosa. Em contraste, o genótipo G1, embora tenha apresentado baixa magnitude de sensibilidade ambiental, exibiu desempenho médio inferior e valores

elevados de  $D^2$  em ambos os ambientes, indicando manutenção da desuniformidade da qualidade de sementes ao longo do dossel.

O genótipo G4 destacou-se por apresentar melhor desempenho médio das variáveis de qualidade de sementes no ambiente menos favorável, associado a menor diferenciação multivariada entre os terços nesse local. Entretanto, no ambiente mais favorável, observou-se aumento dos valores de  $D^2$ , indicando intensificação da desuniformidade multivariada da qualidade das sementes ao longo do dossel. Esse comportamento também foi observado para o genótipo G1, diferindo do padrão apresentado pelos demais genótipos, que exibiram redução da divergência multivariada sob condições ambientais menos restritivas.

Os genótipos G3 e G9 apresentaram padrões intermediários, com variação tanto no desempenho médio das variáveis de qualidade de sementes, quanto na variação da uniformidade qualidade ao longo do dossel, evidenciando respostas dependentes da característica considerada e do ambiente de produção.

Em conjunto, esses resultados demonstram que o desempenho médio das variáveis de qualidade das sementes não é necessariamente indicativo de menor sensibilidade ambiental ou de maior uniformidade vertical da qualidade física e fisiológica. Assim, a caracterização de genótipos para produção de sementes deve considerar simultaneamente o nível médio de desempenho, a magnitude da resposta entre ambientes e o grau de diferenciação vertical dentro da planta.

Após a realização das análises, a Tabela 7 sintetiza, de forma integrada, a caracterização ambiental, o desempenho fenotípico médio e a divergência multivariada da qualidade das sementes ao longo do dossel. O ambiente de Viçosa, classificado como mais favorável à produção de sementes com base no índice ambiental ( $IA = 0,71$ ), apresentou, de modo geral, maiores médias de germinação, primeira contagem de germinação, vigor e viabilidade, além de menor valor de  $D^2$  média (4,73), indicando menor divergência multivariada entre os terços da planta. Em contraste, Capinópolis ( $IA = -0,71$ ) apresentou menores médias das variáveis fisiológicas, maiores frequências de danos mecânicos e por percevejos e maior valor de  $D^2$  média (6,89), evidenciando maior diferenciação da qualidade das sementes ao longo do dossel.

**Tabela 7** – Índice ambiental (IA), uniformidade multivariada média (estatística  $D^2$  de Mahalanobis) e valores médios das variáveis de qualidade física e fisiológica das sementes nos ambientes de produção de Capinópolis e Viçosa.

Indicador	Ambiente de produção	
	Capinópolis	Viçosa
IA	-0,71	0,71
$D^2$ média	6,89	4,73
PCG (%)	58,40	72,73
Germ (%)	69,31	78,17
Vigor (%)	63,5	72,7
Viab (%)	89,0	92,7
DM18 (%)	57,83	19,04
DM68 (%)	5,33	2,50
DU18 (%)	61,88	63,63
DU68 (%)	6,08	4,71
DP18 (%)	17,88	9,29
DP68 (%)	3,04	2,33
P100 (g)	16,04	16,77

Nota: IA corresponde ao índice ambiental sintético obtido a partir da matriz ambiental padronizada. A  $D^2$  média corresponde à média dos valores de  $D^2$  de Mahalanobis estimados para cada genótipo dentro de cada ambiente, sendo obtida a partir da média das  $D^2$  médias calculadas entre os terços da planta. As demais variáveis (Germ, PCG, Vigor, Viab, DM18, DM68, DU18, DU68, DP18, DP68 e P100) correspondem às médias gerais por ambiente, considerando todos os genótipos e posições no dossel. Germ = germinação; PCG = primeira contagem de germinação; Vigor = vigor avaliado por meio do teste de tetrazólio; Viab = viabilidade avaliada por meio do teste de tetrazólio; DM18 e DM68 = danos mecânicos classificados nas classes de 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente; DU18 e DU68 = danos por umidade classificados nas classes de 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente; DP18 e DP68 = danos por percevejo classificados nas classes de 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente; P100 = peso de 100 sementes.

A síntese dos resultados indica que o ambiente de produção influencia simultaneamente o nível médio de expressão das características de qualidade das sementes e o grau de diferenciação multivariada entre os terços da planta. Entretanto, a elevação do índice ambiental não se traduziu, de forma consistente, em menor divergência multivariada para todos os genótipos, evidenciando que a resposta depende da interação entre material genético e ambiente.

Nesse contexto, a ampliação do número de ambientes avaliados poderá contribuir para aprofundar a compreensão da relação entre, a sensibilidade ambiental a variações nas condições do ambiente, o desempenho médio das variáveis de qualidade física e fisiológica e a uniformidade dessas características ao longo do dossel, subsidiando estratégias mais

robustas de seleção de genótipos para produção de sementes de soja de alta qualidade com hábito de crescimento indeterminado.

#### 4. CONCLUSÃO

Os ambientes de produção contrastantes influenciaram a qualidade fisiológica das sementes e a uniformidade dessas características ao longo do dossel das plantas. O ambiente mais favorável esteve associado a maiores médias de qualidade fisiológica e menor divergência entre os terços da planta. Os genótipos apresentaram diferentes níveis de sensibilidade ambiental, evidenciando respostas distintas quanto ao desempenho médio e à uniformidade da qualidade das sementes entre ambientes.

#### 5. REFERÊNCIAS

- ALLARD, R. W.; BRADSHAW, A. D. Implications of Genotype-Environmental Interactions in Applied Plant Breeding<sup>1</sup>. **Crop Science**, v. 4, n. 5, p. 503–508, set. 1964.
- BATES, Douglas et al. Fitting Linear Mixed-Effects Models Using lme4. **Journal of Statistical Software**, v. 67, n. 1, p. 1–48, 2015.
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº 45, de 17 de setembro de 2013**. Disponível em: <http://sistemasweb.agricultura.gov.br/sislegis>.
- BRASIL. **Regras para Análise de Sementes (RAS)**. Disponível em: <https://wikisda.agricultura.gov.br>. Acesso em: 18 dez. 2025.
- CARRERA, Constanza S.; SAVIN, Roxana; SLAFER, Gustavo A. Critical period for yield determination across grain crops. **Trends in Plant Science**, v. 29, n. 3, p. 329–342, 1 mar. 2024.
- CASTRO, Douglas Goulart *et al.* Qualidade fisiológica e expressão enzimática de sementes de soja RR®. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 40, n. 1, p. 222–235, 2017.
- COSTA-NETO, Germano *et al.* *EnvRtype*: a software to interplay enviromics and quantitative genomics in agriculture. **G3 Genes|Genomes|Genetics**, v. 11, n. 4, p. jkab040, 15 abr. 2021.
- DE MAESSCHALCK, R.; JOUAN-RIMBAUD, D.; MASSART, D. L. The Mahalanobis distance. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 50, n. 1, p. 1–18, jan. 2000.
- FARIAS, José Roberto Bicudo; NEPOMUCENO, Alexandre Lima; NEUMAIER, Norberto. **Ecofisiologia da soja**. Londrina: Embrapa Soja, 2007.
- FINLAY, K. W.; WILKINSON, G. N. The analysis of adaptation in a plant-breeding programme. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 14, p. 742–754, 1963.
- FRANÇA-NETO, José de Barros et al. **Tecnologia da produção de sementes de soja de alta qualidade**. Londrina: Embrapa Soja, 2016.

- FRANÇA-NETO, José de Barros; KRZYZANOWSKI, Francisco Carlos. **Metodologia do teste de tetrazólio em sementes de soja**. 2018.
- GAYNOR, L. G.; LAWN, R. J.; JAMES, A. T. Agronomic studies on irrigated soybean in southern New South Wales. I. Phenological adaptation of genotypes to sowing date. **Crop & Pasture Science**, v. 62, n. 12, p. 1056–1066, 10 fev. 2011.
- INMET. **Normais climatológicas – Estação meteorológica 83514**. Disponível em: <<https://clima.inmet.gov.br/GraficosClimatologicos/DF/83377>>. Acesso em: 16 jan. 2026.
- KÖPPEN BRASIL. **Classificação climática de Köppen para os municípios brasileiros**. Disponível em: <<https://koppenbrasil.github.io/>>. Acesso em: 16 jan. 2026.
- LENTH, Russell V.; PIASKOWSKI, Julia. **emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means**., 2025. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>>. Acesso em: 12 fev. 2026
- MARCOS FILHO, Julio. Seed vigor testing: an overview of the past, present and future perspective. **Scientia Agricola**, v. 72, n. 4, p. 363–374, 2015.
- MONTEIRO, Fiorita Faria *et al.* Breeding for yield and seed quality in soybean. **Euphytica**, v. 217, p. 212, 2021.
- OLIVEIRA, Luciana Magda de; CARVALHO, Maria Laene Moreira de; DAVIDE, Antonio Cláudio. Teste de tetrazólio para avaliação da qualidade de sementes de *Peltophorum dubium* (Sprengel) Taubert – *Leguminosae Caesalpinioideae*. **CERNE**, v. 11, n. 2, p. 159–166, 2005.
- PÁDUA, Gilda Pizzolante De *et al.* Agroclimatic zoning of the state of Minas Gerais for the production of high quality soybean seeds. **Journal of Seed Science**, v. 36, n. 4, p. 413–418, dez. 2014.
- R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2025.
- SCHNEIDER, Gabriel *et al.* Influence of climatic variables on the quality and yield of soybean seeds. **Agronomy Science and Biotechnology**, v. 11, p. 1–12, 2025.
- STANIAK, Mariola; SZPUNAR-KROK, Ewa; KOCIRA, Anna. Responses of Soybean to Selected Abiotic Stresses—Photoperiod, Temperature and Water. **Agriculture**, v. 13, n. 1, p. 146, 5 jan. 2023.
- THIEN NGUYEN, Quoc *et al.* Soybean Seed Development: Fatty Acid and Phytohormone Metabolism and Their Interactions. **Current Genomics**, v. 17, n. 3, p. 241–260, 29 mar. 2016.
- VASCONCELOS, Edmar Soares De *et al.* Qualidade fisiológica de sementes de cultivares e linhagens de soja no Estado de Minas Gerais. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 31, n. 2, p. 307–312, 19 maio 2009.
- WATERS, Dominic L. *et al.* Partitioning the forms of genotype-by-environment interaction in the reaction norm analysis of stability. **Theoretical and Applied Genetics**, v. 136, n. 5, p. 99, maio 2023.
- WICKHAM, Hadley *et al.* Welcome to the Tidyverse. **Journal of Open Source Software**, v. 4, n. 43, p. 1686, 2019.

ZAMBIAZZI, E. V. *et al.* Research Article Estimates of genetics and phenotypics parameters for the yield and quality of soybean seeds. **Genetics and Molecular Research**, v. 16, n. 3, 2017.

ZANON, Alencar Junior; STRECK, Nereu Augusto; GRASSINI, Patricio. Climate and Management Factors Influence Soybean Yield Potential in a Subtropical Environment. **Agronomy Journal**, v. 108, n. 4, p. 1447–1454, jul. 2016.

## 6. APÊNDICE A – Caracterização física e integridade das sementes.

**Tabela A1** – Germinação (Germ, %), primeira contagem de germinação (PCG, %), vigor (%), viabilidade (Viab, %) e peso de 100 sementes (P100, g) de sementes de linhagens elite de soja, produzidas em Capinópolis (CAP) e Viçosa (VIC), em função do tratamento: planta inteira (PI) e terços superior (TS), médio (TM) e inferior (TI) do dossel.

Genótipo	Grupo	Germ (%)		PCG (%)		Vigor (%)		Viab (%)		P100 (g)	
		CAP	VIC	CAP	VIC	CAP	VIC	CAP	VIC	CAP	VIC
G1	PI	55	63	43,5	58	58	62	80	90	13,79	15,48
G1	TS	68,5	80	59,5	74	63	67	87	91	13,87	14,08
G1	TM	52,5	41	45	38	50	57	83	75	15,52	14,10
G1	TI	60,5	57,5	50,5	54	57	37	83	70	13,87	13,10
G2	PI	69	91	56,5	89,5	67	79	86	97	19,91	18,60
G2	TS	82	85,5	67,5	83	72	83	92	99	17,75	18,23
G2	TM	70,5	93,5	54	92	58	79	91	97	17,96	17,25
G2	TI	59,5	88,5	51,5	88	57	79	79	96	18,00	17,31
G3	PI	73	78,5	57,5	74,5	55	70	85	99	17,67	19,55
G3	TS	81,5	84,5	71,5	76,5	66	74	89	95	18,04	18,29
G3	TM	69,5	66,5	63	61,5	62	70	91	91	17,88	19,33
G3	TI	61,5	76	56,5	70	72	75	95	96	15,94	18,37
G4	PI	88	76,5	75	73,5	78	71	94	93	13,81	14,39
G4	TS	86	86	73	81,5	78	78	95	92	15,89	15,31
G4	TM	83,5	67	74,5	59	75	68	99	90	15,91	15,17
G4	TI	78	71	71	67	72	63	96	86	15,80	18,37
G5	PI	54,5	85	44	76,5	64	73	90	92	16,00	14,42
G5	TS	79,5	93,5	69,5	83	66	93	96	100	13,89	12,07
G5	TM	63,5	92	45,5	83,5	62	84	90	98	15,93	14,05
G5	TI	63,5	93	45	85	64	80	84	99	13,97	14,14
G9	PI	75,5	73,5	63,5	65,5	66	78	90	97	17,81	21,75
G9	TS	69	75,5	58	70	40	77	83	93	13,97	19,24
G9	TM	63	75,5	59	69	70	66	91	92	15,91	19,35
G9	TI	56,5	82	47	73	52	82	87	96	15,83	20,46

**Tabela A2** – Frequência de danos mecânicos (DM), danos por umidade (DU) e danos por percevejos (DP) (%) classificados como danos amplos (classes de 1 a 8) e danos severos (classes de 6 a 8) em sementes de linhagens elite de soja, , produzidas em Capinópolis (CAP) e Viçosa (VIC), em função do tratamento: planta inteira (PI) e terços superior (TS), médio (TM) e inferior (TI) do dossel.

Genótipo	Grupo CAP	DM18 (%)		DM68 (%)		DU18 (%)		DU68 (%)		DP18 (%)		DP68 (%)	
		VIC	CAP	VIC	CAP	VIC	CAP	VIC	CAP	VIC	CAP	VIC	
G1	PI	74	19	10	0	46	64	8	7	12	15	3	5
G1	TS	51	25	3	2	73	51	6	6	7	13	2	3
G1	TM	47	25	5	2	56	64	4	18	24	9	1	2
G1	TI	65	50	7	12	63	60	12	20	25	26	6	13
G2	PI	62	12	8	0	59	64	7	1	10	8	1	3
G2	TS	43	13	3	0	74	61	6	0	15	5	2	1
G2	TM	60	14	6	0	73	49	4	0	12	16	3	3
G2	TI	58	7	8	0	48	64	10	4	26	15	6	0
G3	PI	55	12	10	0	64	82	9	0	17	7	2	1
G3	TS	43	11	4	3	86	71	11	4	12	2	4	1
G3	TM	58	18	7	5	75	78	8	5	16	6	1	3
G3	TI	62	7	3	1	56	77	4	3	21	3	1	1
G4	PI	73	16	5	2	41	57	2	3	16	10	1	2
G4	TS	57	26	3	4	41	35	1	2	25	6	1	2
G4	TM	82	29	1	8	24	55	0	7	19	11	0	2
G4	TI	78	24	0	2	21	55	0	8	21	13	4	7
G5	PI	60	21	6	5	71	83	6	7	14	2	3	0
G5	TS	44	7	3	0	81	47	2	0	17	12	1	0
G5	TM	28	15	3	0	81	57	4	2	24	6	6	1
G5	TI	53	7	7	0	63	61	8	1	22	1	10	0
G9	PI	59	20	5	2	78	75	10	1	18	15	2	2
G9	TS	56	16	9	2	88	70	13	3	15	6	3	2
G9	TM	61	29	4	6	71	77	6	7	19	6	4	1
G9	TI	59	34	8	4	52	70	5	4	22	10	6	1

**Tabela A4** – Médias descritivas das variáveis avaliadas por genótipo de sementes de soja produzidas em Capinópolis e Viçosa, obtidas a partir dos diferentes terços da planta: planta inteira (PI) e terços superior (TS), médio (TM) e inferior (TI) do dossel

Genótipo	Germ (%)	PCG (%)	Vigor (%)	Viab (%)	DM18 (%)	DM68 (%)	DU18 (%)	DU68 (%)	DP18 (%)	DP68 (%)	P100 (g)
<b>Capinópolis</b>											
G1	59,13	49,63	57,00	83,25	59,25	6,25	59,50	7,50	17,00	3,00	14,26
G2	70,25	57,38	63,50	87,00	55,75	6,25	63,50	6,75	15,75	3,00	18,40
G3	71,38	62,13	63,75	90,00	54,50	6,00	70,25	8,00	16,50	2,00	17,38
G4	83,88	73,38	75,75	96,00	72,50	2,25	31,75	0,75	20,25	1,50	15,35
G5	65,25	51,00	64,00	90,00	46,25	4,75	74,00	5,00	19,25	5,00	14,95
G9	66,00	56,88	57,00	87,75	58,75	6,50	72,25	8,50	18,50	3,75	15,88
<b>Viçosa</b>											
G1	60,38	56	55,75	81,5	29,75	4	59,75	12,75	15,75	5,75	14,19
G2	89,63	88,13	80	97,25	11,5	0	59,5	1,25	11	1,75	17,85
G3	76,38	70,63	72,25	95,25	12	2,25	77	3	4,5	1,5	18,88
G4	75,13	70,25	70	90,25	23,75	4	50,5	5	10	3,25	15,81
G5	90,88	82	82,5	97,25	12,5	1,25	62	2,5	5,25	0,25	13,67
G9	76,63	69,38	75,75	94,5	24,75	3,5	73	3,75	9,25	1,5	20,20

Nota: Germ = germinação; PCG = primeira contagem de germinação; Vigor = vigor avaliado por tetrazólio; Viab = viabilidade avaliada por tetrazólio; DM18 e DM68 = danos mecânicos classificados nas classes 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente; DU18 e DU68 = danos por umidade classificados nas classes 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente; DP18 e DP68 = danos por percevejo classificados nas classes 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente; P100 = peso de 100 sementes.

**Tabela A5** – Coeficientes de variação (%) das variáveis avaliadas entre os terços da planta (TS, TM e TI), por genótipo, de sementes de linhagens elite de soja produzidas em Capinópolis e Viçosa.

Genótipo	Germ (%)	PCG (%)	Vigor (%)	Viab (%)	DM18 (%)	DM68 (%)	DU18 (%)	DU68 (%)	DP18 (%)	DP68 (%)	P100 (g)
<b>Capinópolis</b>											
G1	13,22	14,17	11,48	2,74	17,40	40,00	13,35	56,77	54,19	88,19	6,61
G2	15,92	14,93	13,45	8,28	17,31	44,41	22,66	45,83	41,72	56,77	0,74
G3	14,21	11,81	7,55	3,33	18,44	44,61	20,98	45,81	27,61	86,60	6,74
G4	4,96	2,41	4,00	2,15	18,57	114,56	37,62	173,21	14,10	124,90	0,37
G5	13,42	26,26	3,13	6,67	30,39	53,29	13,86	65,47	17,17	79,57	7,91
G9	9,95	12,18	27,96	4,60	4,29	37,80	25,61	54,49	18,81	35,25	7,22
<b>Viçosa</b>											
G1	32,90	32,60	28,46	13,94	43,30	108,25	11,41	51,63	55,55	101,38	4,13
G2	4,53	5,14	2,87	1,57	33,41	0,00	13,68	173,21	50,69	114,56	3,10
G3	11,90	10,85	3,62	2,81	46,40	66,67	5,03	25,00	56,77	69,28	3,09
G4	13,42	16,49	10,96	3,42	9,56	65,47	23,89	56,73	36,06	78,73	11,11
G5	0,82	1,24	7,77	1,01	47,78	0,00	13,11	100,00	86,96	173,21	8,73
G9	4,83	2,95	10,91	2,22	35,28	50,00	5,59	44,61	31,49	43,30	3,43

Nota: Germ = germinação; PCG = primeira contagem de germinação; Vigor = vigor avaliado por tetrazólio; Viab = viabilidade avaliada por tetrazólio; DM18 e DM68 = danos mecânicos classificados nas classes 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente; DU18 e DU68 = danos por umidade classificados nas classes 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente; DP18 e DP68 = danos por percevejo classificados nas classes 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente; P100 = peso de 100 sementes.

7. **APÊNDICE B – Dinâmica temporal detalhada das covariáveis climáticas e ecofisiológicas ao longo do ciclo da cultura.**

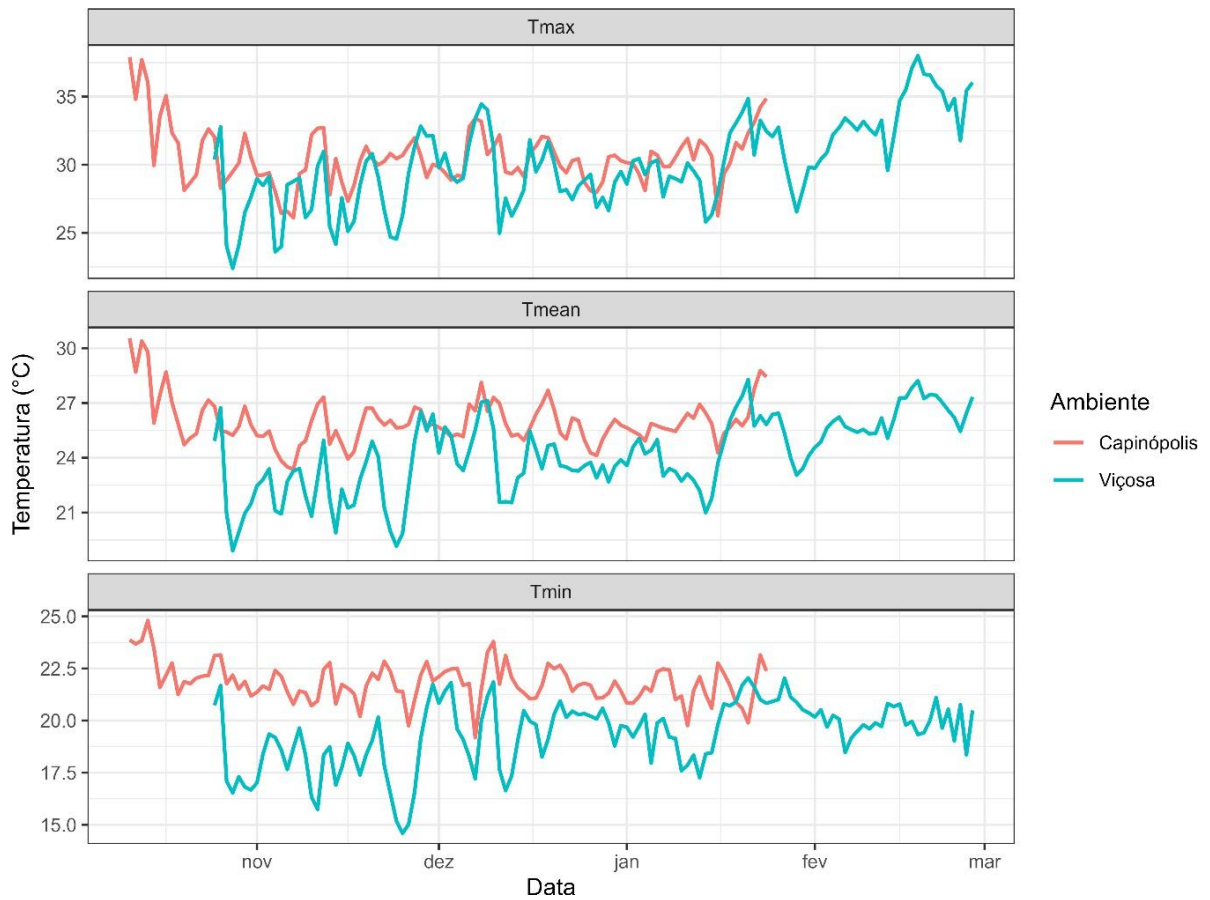


Figura B1 – Variação temporal da temperatura média (Tmean), máxima (Tmax) e mínima (Tmin) do ar ao longo do ciclo da cultura da soja nos ambientes de Capinópolis e Viçosa.

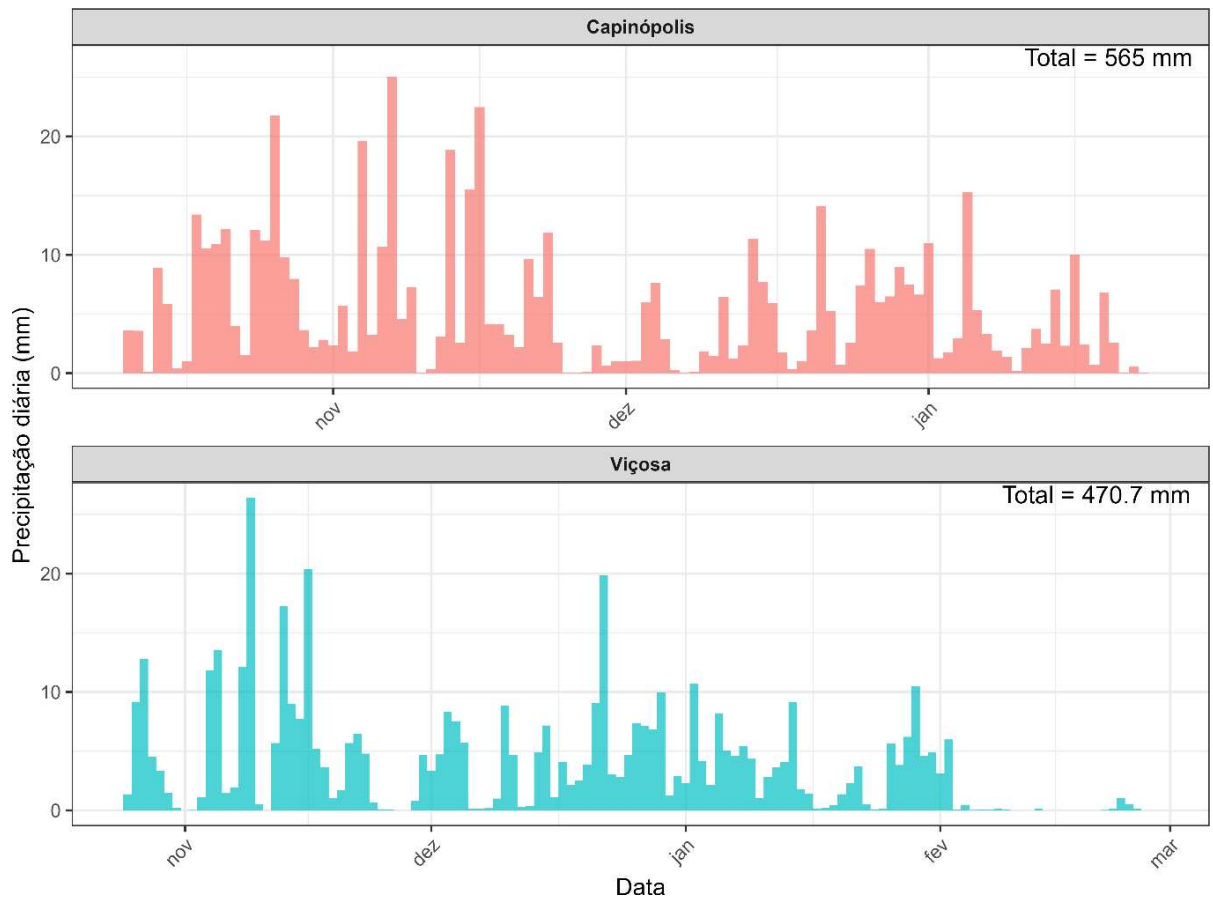


Figura B2 – Distribuição diária da precipitação ao longo do ciclo da cultura da soja nos ambientes de Capinópolis e Viçosa. O valor indicado em cada painel corresponde à precipitação acumulada total no período.

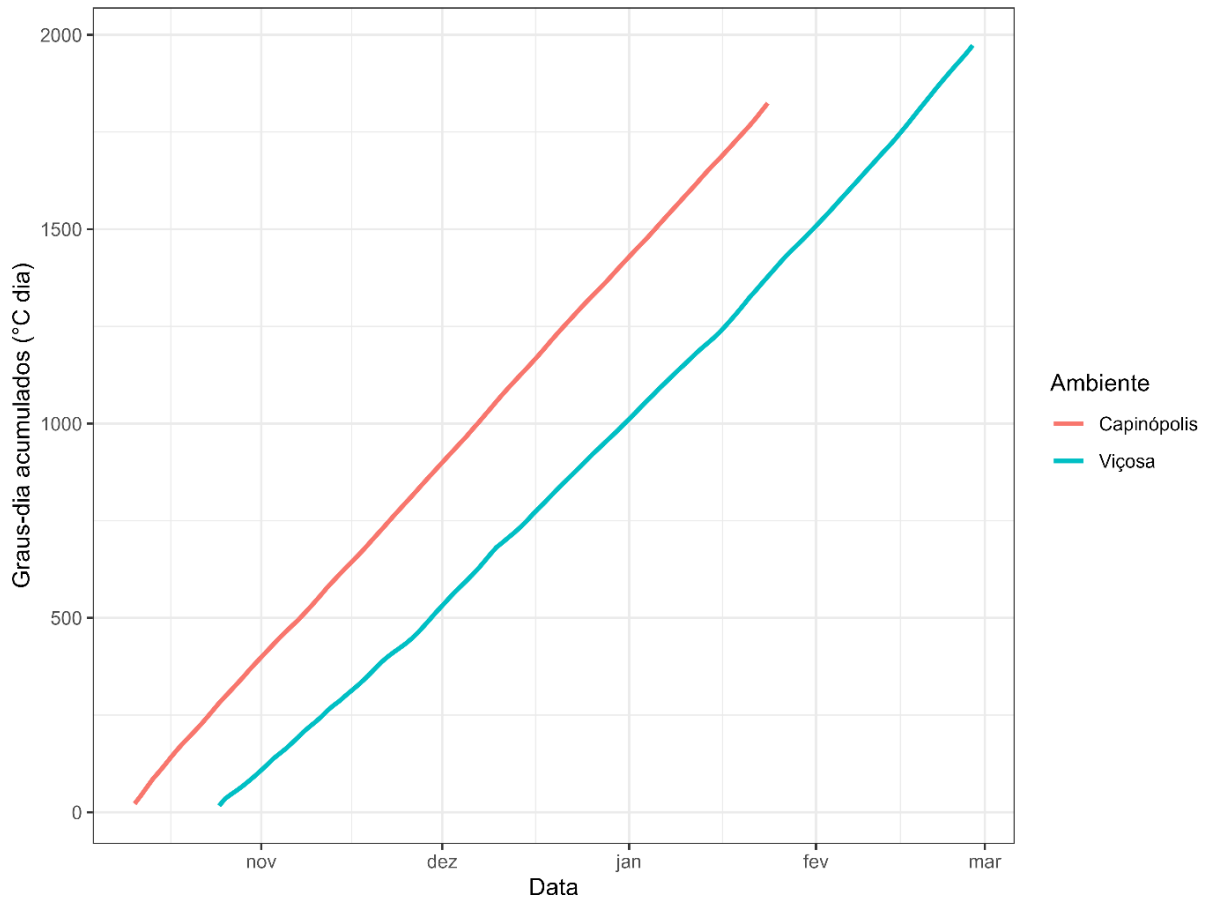


Figura B3 – Acúmulo de graus-dia de desenvolvimento ( $T_b = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) ao longo do ciclo da cultura da soja nos ambientes de Capinópolis e Viçosa.

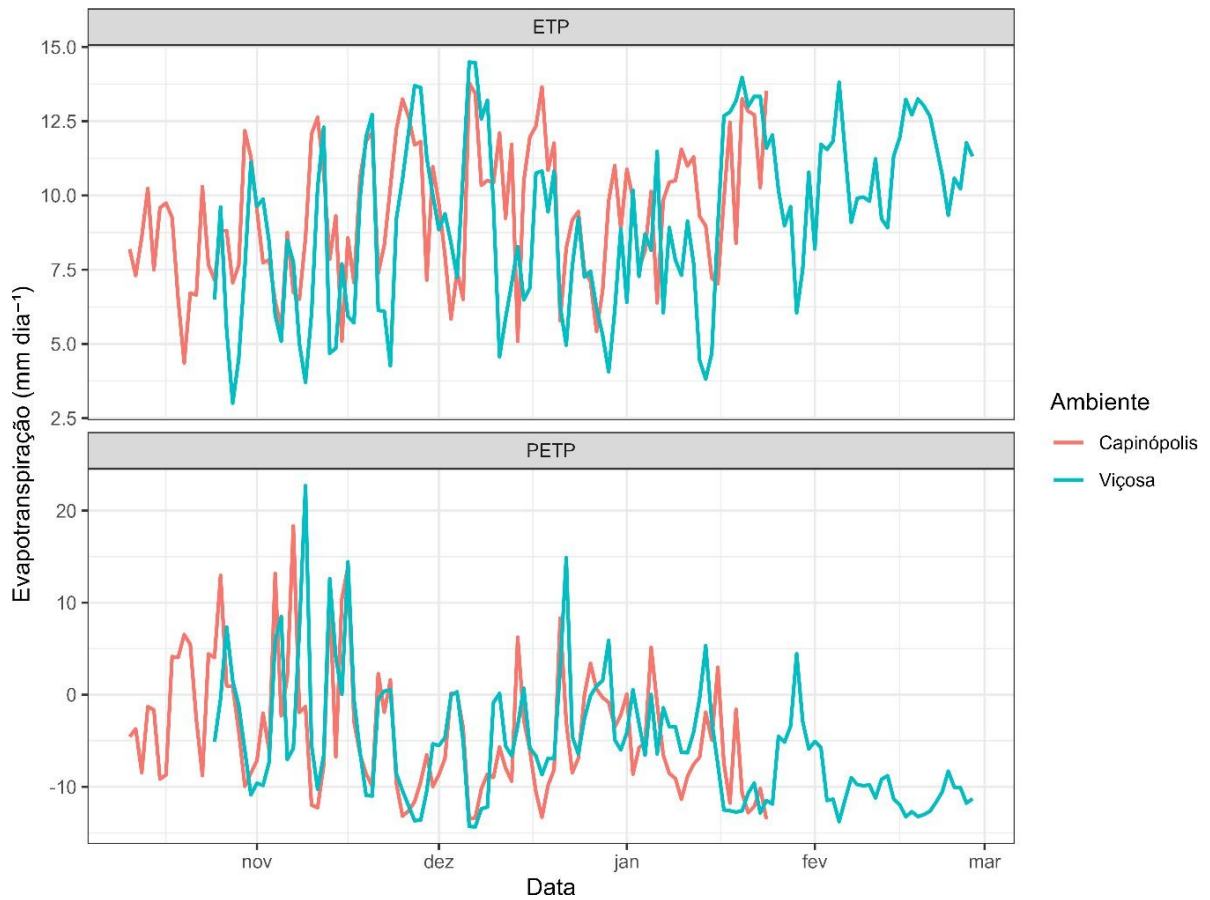


Figura B4 – Variação temporal da evapotranspiração potencial diária (ETP) e do balanço hídrico relativo (PETP) ao longo do ciclo da cultura da soja nos ambientes de Capinópolis e Viçosa.

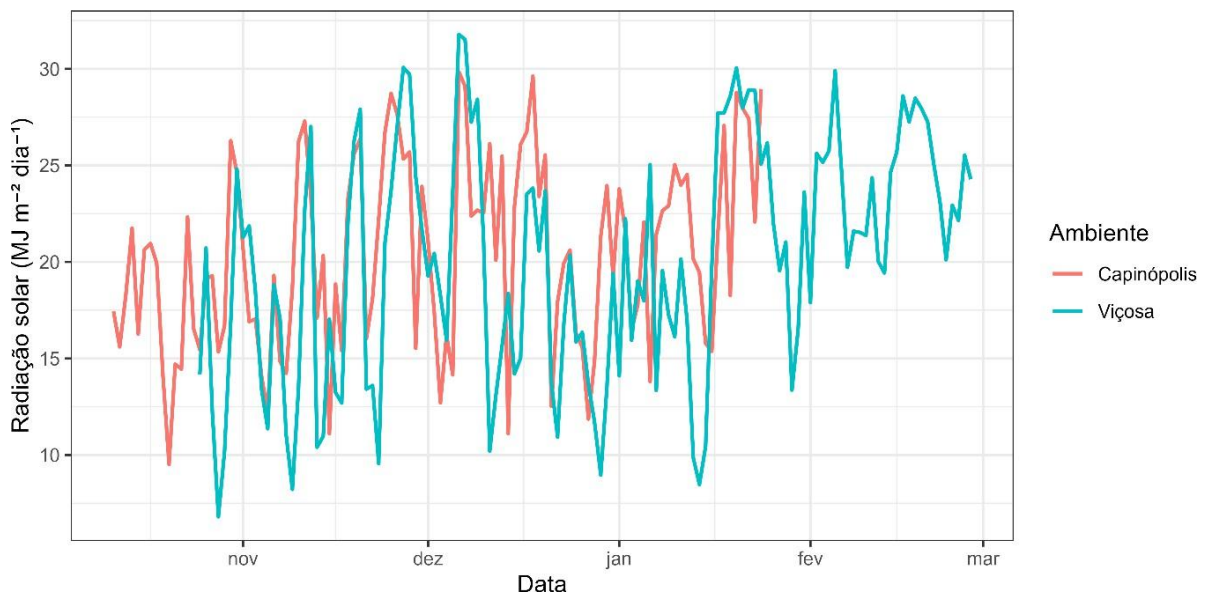


Figura B5 – Variação temporal da radiação solar global incidente na superfície ao longo do ciclo da cultura da soja nos ambientes de Capinópolis e Viçosa.

### **Capítulo III. Armazenabilidade de sementes de linhagens de soja de hábito de crescimento indeterminado**

#### **RESUMO**

A manutenção do potencial fisiológico durante o período pós-colheita representa um dos principais desafios na produção de sementes de soja, especialmente em cultivares de hábito de crescimento indeterminado, nas quais a maturação desuniforme ao longo do dossel pode resultar em desuniformidade do lote de sementes. O presente estudo investigou a armazenabilidade de sementes de linhagens elite de soja de crescimento indeterminado, considerando a posição da semente na planta, o ambiente de produção e a condição de armazenamento, bem como seus efeitos combinados. As sementes foram produzidas em dois ambientes contrastantes e armazenadas por seis meses sob condições controladas e não controladas de temperatura e umidade relativa do ar. Foram avaliadas a germinação, a primeira contagem de germinação, o vigor e a viabilidade por meio do teste de tetrazólio e a frequência de danos mecânicos, danos por umidade e danos por percevejo. A uniformidade da qualidade das sementes ao longo do dossel da planta foi avaliada por meio da distância de Mahalanobis ( $D^2$ ), complementada por análise de correlação e decomposição da contribuição das variáveis para a divergência multivariada. A dinâmica de deterioração foi estimada por modelos lineares ajustados entre três e seis meses de armazenamento. O ambiente sem controle higrotérmico esteve associado a maior intensidade e velocidade de redução da germinação e da primeira contagem. O ambiente de produção influenciou de forma consistente a estabilidade fisiológica ao longo do armazenamento. A posição na planta esteve associada a diferenças nos níveis médios de qualidade, porém não alterou a taxa de deterioração das sementes colhidas nos diferentes estratos da planta no período avaliado. A desuniformidade da qualidade entre os terços variou conforme genótipo e condições ambientais, estando mais relacionada à distribuição da frequência de danos do que às variáveis fisiológicas isoladamente. Os resultados evidenciam que a armazenabilidade e a uniformidade da qualidade das sementes ao longo do dossel resultam da interação entre ambiente de produção, condição de armazenamento e características genéticas das linhagens avaliadas.

Palavras-chave: *Glycine max* (L.) Merrill, deterioração fisiológica, desuniformidade vertical, distância de Mahalanobis.

### Chapter III. Storability of soybean lines with indeterminate growth habit

#### ABSTRACT

The maintenance of physiological potential during the post-harvest period represents one of the main challenges in soybean seed production, especially in cultivars with an indeterminate growth habit, in which non-uniform maturation along the canopy may result in seed lot heterogeneity. The present study investigated the storability of seeds from elite soybean lines with indeterminate growth habit, considering seed position on the plant, production environment, and storage condition, as well as their combined effects. Seeds were produced in two contrasting environments and stored for six months under controlled and non-controlled conditions of temperature and relative humidity. Germination, first germination count, vigor, and viability (by the tetrazolium test) were evaluated, as well as the frequency of mechanical damage, moisture damage, and stink bug damage. The uniformity of seed quality along the plant canopy was assessed using Mahalanobis distance ( $D^2$ ), complemented by correlation analysis and decomposition of the contribution of variables to multivariate divergence. Deterioration dynamics were estimated using linear models fitted between three and six months of storage. The environment without hygrothermal control was associated with greater intensity and rate of reduction in germination and first germination count. The production environment consistently influenced physiological stability throughout storage. Seed position on the plant was associated with differences in average quality levels; however, it did not affect the rate of deterioration of seeds harvested from different canopy strata during the evaluated period. Non-uniformity of quality among canopy thirds varied according to genotype and environmental conditions and was more closely related to the distribution of damage frequency than to isolated physiological variables. The results indicate that seed storability and the uniformity of seed quality along the canopy result from the interaction among production environment, storage condition, and the genetic characteristics of the evaluated lines.

Keywords: *Glycine max* (L.) Merr., physiological deterioration, vertical non-uniformity, Mahalanobis distance.

## 1. INTRODUÇÃO

A qualidade das sementes é determinante para o sucesso da cultura da soja, pois está diretamente associada à emergência rápida e uniforme das plântulas, ao estabelecimento inicial da lavoura e ao potencial produtivo (Ebene et al., 2020). No sistema de produção de sementes, há um intervalo prolongado entre a colheita e a semeadura subsequente, exigindo armazenamento por aproximadamente seis a sete meses (Souza et al., 2023). Assim, a manutenção da qualidade durante o armazenamento constitui etapa crítica na cadeia produtiva.

A semente de soja atinge seu máximo potencial fisiológico na maturidade fisiológica, entretanto, a semente possui um teor de água de aproximadamente 50%, inviabilizando a colheita imediata (Jacintho; De Carvalho, 1974). A partir desse ponto, inicia-se o processo de deterioração, que, de acordo com Delouche (1981), é caracterizado por alterações fisiológicas e bioquímicas progressivas que culminam na perda da capacidade germinativa. Embora inevitável, a taxa de deterioração pode ser modulada por fatores ambientais, especialmente temperatura e umidade relativa do ar, que influenciam a intensidade dos processos oxidativos e metabólicos envolvidos (Delouche, 1981).

A semente de soja apresenta menor longevidade quando comparada a diversas outras espécies cultivadas, o que torna a produção de sementes de alta qualidade um desafio em regiões tropicais (De Alencar; Faroni, 2011). O elevado teor de óleo favorece a peroxidação lipídica, intensificando os danos oxidativos e acelerando a deterioração (Đukić et al., 2017). Além disso, por serem higroscópicas, as sementes são altamente sensíveis às flutuações de temperatura e umidade do ambiente. O armazenamento em condições não controladas de temperatura e umidade pode acelerar a perda de viabilidade, favorecer a contaminação fúngica e intensificar a degradação bioquímica (Afzal et al., 2020; Coradi et al., 2020). Ainda que o armazenamento sob condições controladas reduza a atividade biológica e a incidência de patógenos, não impede totalmente a deterioração natural das sementes (Manjari et al., 2026). Nesse contexto, ressalta-se que a qualidade fisiológica não pode ser melhorada durante o armazenamento, apenas preservada sob condições adequadas de conservação (Pádua; Vieira, 2001). Além disso, diferenças genéticas podem influenciar a estabilidade fisiológica durante o armazenamento, evidenciando variabilidade genotípica quanto à tolerância à deterioração (Mamlic et al., 2021).

A qualidade inicial das sementes também é influenciada pelas condições ambientais durante o desenvolvimento e maturação, de modo que o ambiente de produção pode impactar sua estabilidade posterior (Monteiro et al., 2021). Paralelamente, a posição das sementes no dossel da planta constitui fonte adicional de variação. Em cultivares de crescimento indeterminado, a sobreposição das fases vegetativa e reprodutiva resulta em maturação desuniforme das vagens, favorecendo a formação de lotes com sementes com diferentes

níveis de qualidade (Kato et al., 2018). Evidências indicam que sementes produzidas em diferentes posições do dossel da planta apresentam variações na composição e no desempenho fisiológico (Huber et al., 2016; Oliveira et al., 2025).

Apesar de a qualidade fisiológica média do lote de sementes ser amplamente utilizada como indicador de desempenho, diferenças na qualidade das sementes produzidas por uma mesma planta podem influenciar tanto o comportamento durante o armazenamento quanto a uniformidade de emergência de plântulas no campo. Nesse sentido, a uniformidade da qualidade das sementes ao longo do dossel da planta emerge como atributo relevante, especialmente em cultivares de crescimento indeterminado, nas quais diferenças causadas pela desuniformidade de maturação entre terços da planta podem persistir após a colheita (Souza et al., 2020).

Estudos anteriores demonstram a influência do ambiente de produção (Vasconcelos et al., 2009), da posição na planta (Souza et al., 2020) e das condições de armazenamento (Santos et al., 2023) sobre a qualidade fisiológica das sementes de soja. No entanto, ainda são limitadas as abordagens que integrem esses fatores avaliando simultaneamente a dinâmica temporal da deterioração e a uniformidade vertical da qualidade ao longo do armazenamento. A análise da dinâmica temporal, por meio da estimativa da taxa de redução da qualidade, permite caracterizar diferenças na estabilidade fisiológica entre genótipos e condições ambientais, ampliando a compreensão da armazenabilidade.

Diante desse contexto, o presente estudo teve como objetivo investigar a armazenabilidade de sementes de linhagens elite de soja de hábito de crescimento indeterminado, considerando a posição da semente na planta, o ambiente de produção e a condição de armazenamento, bem como seus efeitos combinados.

## **2. MATERIAL E MÉTODOS**

### **2.1. Material vegetal**

Foram utilizadas seis linhagens elite com hábito de crescimento indeterminado (G1, G2, G3, G4, G5 e G9), provenientes do Programa de Melhoramento de Soja da Universidade Federal de Viçosa (UFV). Esses genótipos foram previamente selecionados por meio do índice FAI-BLUP, por apresentarem desempenho genético médio superior, independentemente do estrato do dossel (Capítulo 1). Os genótipos avaliados apresentaram valores de Grupo de Maturidade Relativa (GMR) estimado variando de 4,8 a 5,9 (Tabela 1).

**Tabela 1** – Linhagens e seus respectivos valores de Grupo de Maturidade Relativa (GMR) estimado.

<b>Genótipo</b>	<b>GMR estimado</b>
G1	4,8
G2	5,3
G3	5,4
G4	5,5
G5	5,6
G9	5,9

## 2.2. Ambientes de produção das sementes:

A produção das sementes ocorreu na safra 2024/25, em dois municípios do estado de Minas Gerais: Capinópolis e Viçosa. Em Capinópolis, o experimento foi instalado na Central de Experimentação, Pesquisa e Extensão do Triângulo Mineiro (Cepet) (18°43'22" S; 49°33'36" O), com semeadura em 11 de outubro de 2024 e colheita em 24 de janeiro de 2025. Em Viçosa, o experimento foi conduzido na Unidade de Ensino, Pesquisa e Extensão – Horta Nova (UEPE–Horta Nova) (20°45'45" S; 42°49'27" O), com semeadura em 25 de outubro de 2024 e colheita em 27 de fevereiro de 2025.

## 2.3. Colheita

A colheita das linhagens em Capinópolis foi realizada em um único dia, enquanto em Viçosa ocorreu em um intervalo de sete dias. A colheita das plantas foi realizada manualmente. Para cada linhagem, o feixe de plantas foi dividido em quatro grupos para posterior realização da trilha mecânica. Um quarto do feixe foi trilhado integralmente, conforme o procedimento convencional, constituindo o tratamento denominado Planta Inteira (PI). Os três quartos restantes foram submetidos ao corte individual das plantas, com o objetivo de separar os terços superior, médio e inferior. Para essa separação, realizou-se a contagem do número total de nós de cada planta, dividindo-se esse valor por três, de modo a garantir que cada terço apresentasse, o mais próximo possível, o mesmo número de nós. As porções correspondentes a cada terço foram agrupadas e trilhadas separadamente, originando os tratamentos Terço Superior (TS), Terço Médio (TM) e Terço Inferior (TI), conforme ilustrado na Figura 1.

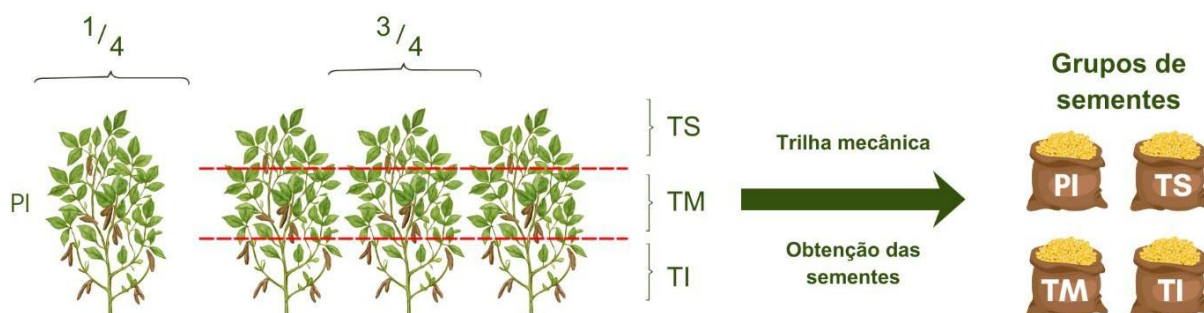


Figura 1 – Representação esquemática da obtenção dos quatro grupos de sementes: planta inteira (PI) e os diferentes terços do dossel, terço superior (TS), terço médio (TM) e terço inferior (TI).

#### 2.4. Armazenamento

As sementes foram armazenadas em dois ambientes contrastantes: laboratório (LAB) e câmara fria (CF). O ambiente de laboratório não apresentou controle de temperatura e umidade relativa do ar, enquanto a câmara fria operou sob condições controladas desses fatores. Ao longo dos seis meses de armazenamento e durante o período subsequente destinado à realização das avaliações, foram monitoradas continuamente as temperaturas e a umidade relativa máximas e mínimas em ambos os ambientes, conforme apresentado na Figura 2.

No período compreendido entre 21 de abril e 11 de setembro de 2025, correspondente a três meses de armazenamento, acrescidos do período necessário para a condução das avaliações, o ambiente de laboratório apresentou temperatura média máxima de 20,5 °C e mínima de 18,7 °C. Em contraste, a câmara fria manteve condições térmicas inferiores, com temperaturas médias máximas e mínimas de 14,3 °C e 12,3 °C, respectivamente. Em relação à umidade relativa do ar, o ambiente de laboratório apresentou médias de 74,3 % (máxima) e 59,7 % (mínima), evidenciando maior amplitude higrométrica quando comparado à câmara fria, que apresentou valores médios de 79,0 % (máxima) e 65,2 % (mínima).

Considerando todo o período experimental, de 21 de abril a 4 de dezembro de 2025, englobando seis meses de armazenamento e o tempo subsequente para a realização das avaliações, observou-se a manutenção de condições térmicas mais estáveis na câmara fria, com temperaturas médias variando entre 12,1 °C (mínima) e 14,1 °C (máxima) e umidade relativa média de 66,6 % (mínima) e 83,3 % (máxima). Por sua vez, o ambiente de laboratório apresentou temperaturas médias mais elevadas, entre 20,0 °C (mínima) e 21,8 °C (máxima), associadas a maior variação da umidade relativa do ar, com valores médios de 57,0 % (mínima) e 73,8 % (máxima).

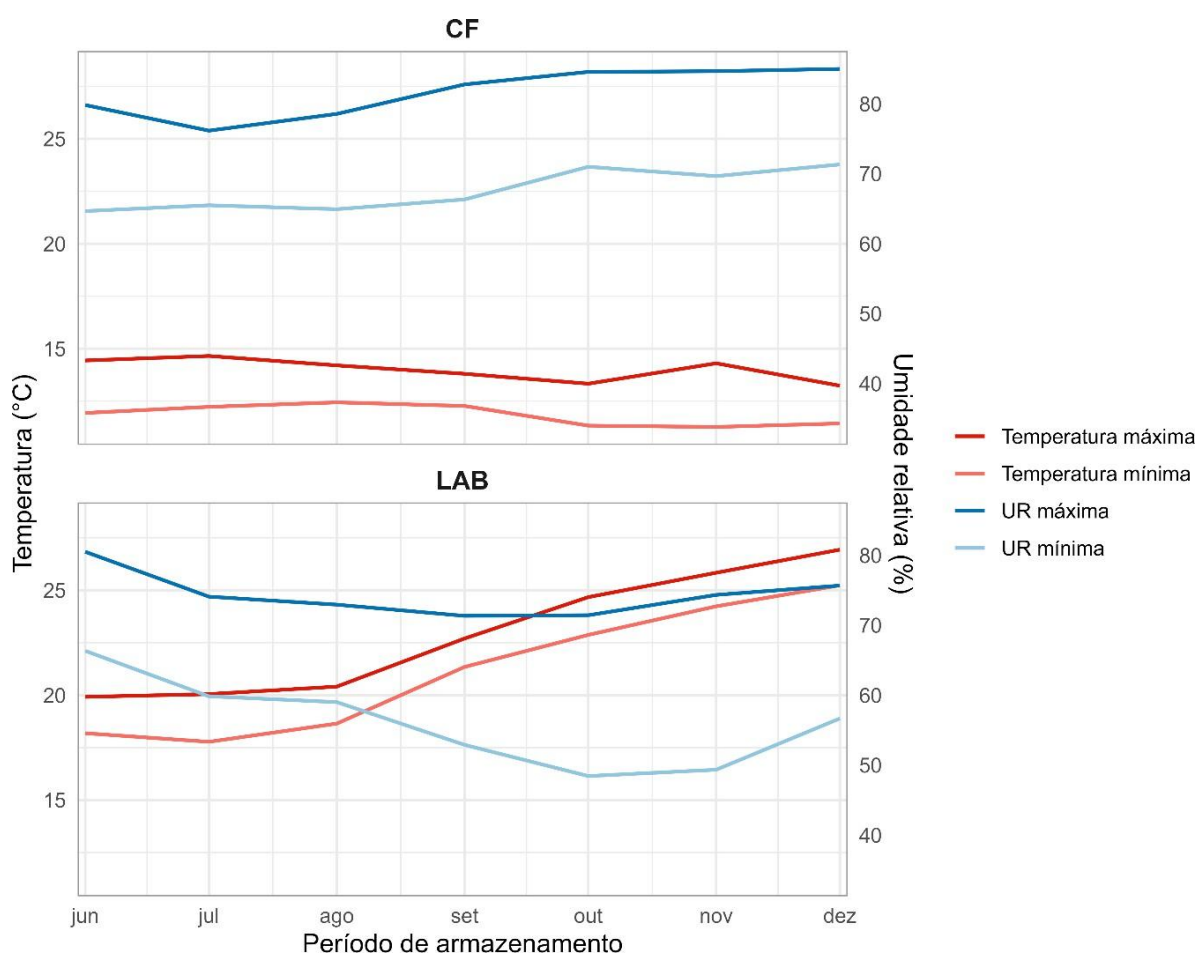


Figura 2- Temperaturas e umidade relativa do ar máximas e mínimas nos ambientes laboratório (LAB) e câmara fria (CF) ao longo do período experimental.

## 2.5. Avaliação da qualidade fisiológica das sementes

### 2.5.1. Grau de umidade e Peso de 100 sementes

O grau de umidade das sementes foi determinado por meio de leituras diretas utilizando o medidor de umidade de grãos John Deere Moisture Meter, com precisão de  $\pm 0,5\%$  na faixa usual de umidade para grãos armazenados. As medições foram expressas em porcentagem (%).

Em seguida, foi determinado o peso de 100 sementes, utilizando-se uma repetição de 100 sementes, tomada aleatoriamente no volume total das sementes de cada porção, contadas manualmente e pesadas em balança de precisão.

### 2.5.2. Teste de Germinação

O teste de germinação foi conduzido com quatro repetições de 50 sementes, distribuídas em rolos de papel para germinação umedecidos com um volume de água destilada equivalente a 2,5 vezes o peso do papel seco. Os rolos foram mantidos em germinador a 25 °C. As avaliações foram efetuadas no quinto e no oitavo dia após a

montagem do teste, de acordo com a metodologia descrita nas Regras para Análises de Sementes (Brasil, 2025). Os resultados foram expressos em porcentagem de plântulas normais, sendo os valores obtidos no quinto dia referentes à primeira contagem de germinação (PCG) e os do oitavo dia à germinação (Germ).

### 2.5.3. Teste de Tetrazólio

O teste de tetrazólio foi realizado conforme a metodologia descrita por França-Neto e Krzyzanowski (2018), utilizando-se duas repetições de 50 sementes. Inicialmente, as sementes foram submetidas ao pré-condicionamento em rolos de papel para germinação umedecidos com volume de água destilada equivalente a 2,5 vezes o peso do papel seco. Os rolos foram mantidos em germinador a 25 °C, por 16 horas.

Posteriormente, as sementes foram submersas em solução de tetrazólio (2-3-5, cloreto de trifetil tetrazólio) a 0,075%, acondicionadas em béqueres plásticos e mantidas em câmara BOD, no escuro, a 38°C por aproximadamente 120 minutos. Após a coloração, as sementes foram lavadas com água corrente e mantidas submersas em água até o momento da avaliação.

Cada semente foi avaliada individualmente, sendo seccionada longitudinalmente ao longo do eixo embrionário com o auxílio de estilete. Foram observadas as superfícies externa e interna dos cotilédones e do eixo embrionário, considerando a coloração dos tecidos, a presença, tipo e a localização dos danos. A partir dessa avaliação, cada semente foi classificada em uma das oito classes (1 a 8), conforme a metodologia descrita por França-Neto e Krzyzanowski (2018).

As variáveis fisiológicas foram expressas em porcentagem de sementes (%). O vigor foi determinado pela proporção de sementes classificadas nas classes 1 a 3, enquanto a viabilidade (Viab) correspondeu à proporção de sementes enquadradas nas classes 1 a 5. Os danos mecânicos, por umidade e por percevejo foram avaliados considerando-se duas abordagens: danos de amplo espectro e danos severos. Os danos de amplo espectro corresponderam à presença de danos nas classes 1 a 8, enquanto os danos severos incluíram apenas as sementes das classes 6 a 8. Essas variáveis foram expressas, respectivamente, como DM18, DU18 e DP18 para danos amplos, e DM68, DU68 e DP68 para danos severos, conforme a metodologia descrita por França-Neto e Krzyzanowski (2018).

## 2.6. Análises estatísticas

Os dados foram organizados e analisados por meio da linguagem de programação R (R Core Team, 2025), utilizando-se os pacotes *tidyverse* (Wickham et al., 2019) para manipulação e organização dos dados e construção de gráficos, *emmeans* (Lenth; Piaskowski, 2025) para obtenção de médias ajustadas e estimativa de inclinações em modelos lineares, *corrplot* (Wei; Simko, 2021) para análise de correlação, e os pacotes

*multcomp* (Hothorn; Bretz; Westfall, 2008) e *multcompView* (Graves et al., 2024) para comparações múltiplas e agrupamento de médias.

Inicialmente, foram calculadas as médias aritméticas descritivas para cada combinação de ambiente de produção, condição de armazenamento, tempo e variável. A avaliação inicial da qualidade das sementes (tempo 0) foi utilizada como ponto de partida comum para comparação com os períodos de 3 e 6 meses sob as condições de laboratório (LAB) e câmara fria (CF). A partir dessas médias, foram elaboradas representações gráficas com o objetivo de evidenciar a evolução temporal das variáveis dentro de cada ambiente de produção, permitindo a comparação entre as condições de armazenamento ao longo do período avaliado.

Para avaliar o comportamento diferencial das posições na planta ao longo do armazenamento, as análises foram conduzidas considerando os fatores ambiente de produção, condição de armazenamento, tempo e terço da planta. Para as variáveis fisiológicas, ajustaram-se modelos de análise de variância separadamente para cada combinação entre ambiente de produção, condição de armazenamento, tempo e variável, considerando os efeitos fixos de posição na planta (terço) e genótipo sobre a variável resposta.

A partir dos modelos ajustados, foram estimadas médias ajustadas (*estimated marginal means*) para os terços, utilizando o pacote *emmeans*. As comparações múltiplas entre terços foram realizadas com ajuste pelo método de Sidak (Šidák, 1967), adotando-se nível de significância de 5%. Os resultados foram expressos por meio de agrupamento de letras, indicando diferenças entre os terços dentro de cada combinação de fatores.

Para caracterizar a frequência dos danos entre os terços da planta durante o período de armazenamento, as variáveis de danos avaliadas pelo teste de tetrazólio foram apresentadas por meio de médias descritivas, considerando ambiente de produção, condição de armazenamento, tempo e terço da planta, sem aplicação de testes de comparação múltipla.

A uniformidade da qualidade das sementes entre os terços foi quantificada por meio da distância de Mahalanobis ( $D^2$ ) (De Maesschalck; Jouan-Rimbaud; Massart, 2000) considerando simultaneamente as variáveis fisiológicas e de danos. Essa métrica mede a divergência multivariada entre observações considerando simultaneamente a estrutura de covariância das variáveis avaliadas. A distância foi calculada conforme:

$$D^2 = (x - \mu)^T \Sigma^{-1} (x - \mu)$$

em que  $x$  representa o vetor de médias das variáveis fisiológicas e de danos para cada terço da planta,  $\mu$  corresponde ao centróide multivariado do grupo (genótipo  $\times$  ambiente de produção  $\times$  condição de armazenamento  $\times$  tempo), e  $\Sigma^{-1}$  é a inversa da matriz de covariância global estimada a partir de todas as observações disponíveis.

Para cada combinação de fatores, foram calculadas as distâncias individuais ( $D^2$ ) para os terços TS, TM e TI em relação ao centróide do respectivo grupo. A média dessas distâncias ( $D^2$  média) foi utilizada como indicador global da desuniformidade vertical, sendo que valores mais elevados indicam maior divergência multivariada entre os terços.

Com o objetivo de investigar a associação entre a uniformidade da qualidade das sementes ao longo do dossel e as variáveis fisiológicas e de danos após o armazenamento, foi realizada análise de correlação utilizando os dados referentes à avaliação aos seis meses. Foram consideradas as médias observadas para o tratamento planta inteira (PI), adotado como referência operacional do lote, incluindo todas as variáveis avaliadas e a distância de Mahalanobis média ( $D^2$ ), utilizada como estimador da uniformidade da qualidade das sementes entre os terços da planta. As associações entre as variáveis foram estimadas por meio do coeficiente de correlação de Spearman ( $\rho$ ), adotado em função do tamanho amostral reduzido e da possibilidade de relações monotônicas não lineares entre as variáveis. A significância das correlações foi avaliada pelo teste correspondente ao coeficiente de Spearman, considerando nível de significância de 5%. A matriz de correlação foi representada graficamente com o pacote corrplot.

Para investigar quais variáveis mais contribuíram para a divergência multivariada da qualidade das sementes entre os terços da planta, foi realizada a decomposição da distância de Mahalanobis média ( $D^2$ ) em seus componentes associados a cada variável avaliada. A partir da matriz de covariância global matriz de covariância global estimada a partir de todas as observações disponíveis calculada na Mahalanobis, foram extraídas as variâncias individuais (elementos da diagonal de  $\Sigma$ ), utilizadas para padronização dos desvios quadráticos.

Para cada combinação de genótipo, ambiente de produção, condição de armazenamento e tempo, foi calculada a contribuição individual de cada variável como o desvio quadrático em relação ao centro multivariado do grupo, padronizado pela variância global correspondente, conforme a expressão:

$$Contrib_{ij} = (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 / \sigma_j^2$$

em que  $x_{ij}$  representa o valor da variável  $j$  na observação  $i$ ;  $\bar{x}_j$  corresponde à média da variável  $j$  no grupo considerado; e  $\sigma_j^2$  representa a variância global da variável  $j$ .

As contribuições foram então promediadas dentro de cada combinação experimental, obtendo-se a contribuição média padronizada de cada variável para a divergência multivariada. Para fins de interpretação, foram considerados principalmente os valores referentes aos seis meses de armazenamento, por representarem a condição final do período experimental. Também foram calculadas contribuições estratificadas por ambiente de produção (Capinópolis e Viçosa) e por condição de armazenamento (laboratório e câmara

fria), com o objetivo de identificar possíveis diferenças na estrutura da divergência.

Para estimar a taxa de deterioração durante o armazenamento, foram ajustados modelos lineares considerando apenas os tempos de 3 e 6 meses, tratando o tempo como covariável contínua. Para cada variável avaliada, ajustou-se um modelo linear geral, incluindo como efeitos fixos os fatores genótipo, ambiente de produção, posição na planta (terço), condição de armazenamento e tempo (meses). Foram incluídas as interações entre tempo e todos os fatores principais (genótipo  $\times$  tempo, ambiente  $\times$  tempo, terço  $\times$  tempo e condição de armazenamento  $\times$  tempo), bem como a interação tripla entre terço, condição de armazenamento e tempo, permitindo avaliar possíveis efeitos combinados sobre a taxa de deterioração.

A significância dos efeitos foi avaliada por meio de análise de variância (ANOVA) aplicada aos modelos ajustados. As taxas de deterioração foram estimadas a partir das inclinações da regressão em relação ao tempo, utilizando a função *emmeans* do pacote *emmeans*. As inclinações representam a variação média da variável por mês ( $\% \text{ mês}^{-1}$ ), acompanhadas de erro-padrão e intervalos de confiança de 95%, sendo estimadas para os fatores condição de armazenamento, ambiente de produção e posição na planta.

Para as variáveis fisiológicas, inclinações negativas indicam redução da qualidade ao longo do armazenamento. Para as variáveis de danos, inclinações positivas indicam aumento da frequência de dano com o tempo. Todas as análises adotaram nível de significância de 5%.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As condições de armazenamento diferiram entre o ambiente de laboratório (LAB) e a câmara fria (CF) ao longo do período experimental (Figura 2). De modo geral, o ambiente de laboratório caracterizou-se por temperaturas mais elevadas e maior amplitude térmica diária, além de maior variação na umidade relativa do ar, enquanto a câmara fria apresentou maior estabilidade térmica e higrométrica.

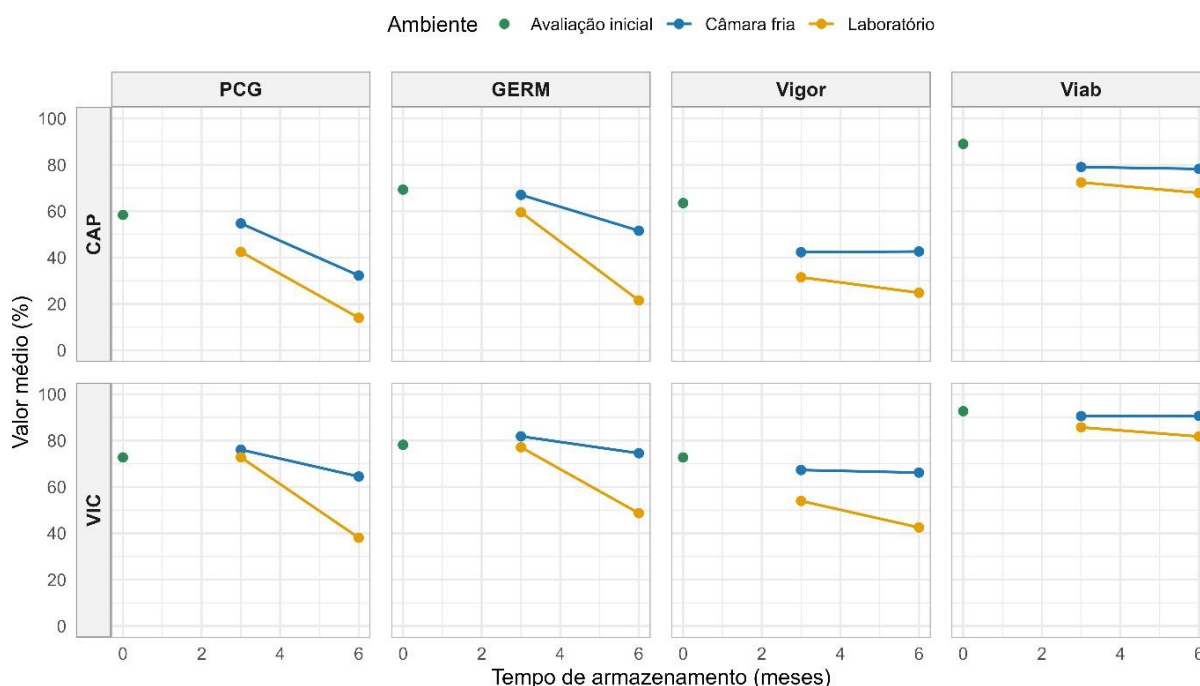
Temperaturas mais elevadas e maior oscilação higrométrica intensificam a atividade respiratória e os processos oxidativos, enquanto o armazenamento sob resfriamento favorece a desaceleração metabólica e a manutenção da qualidade fisiológica das sementes (Smaniotto et al., 2014).

A germinação (Germ), a primeira contagem de germinação (PCG), o vigor e a viabilidade (Viab) apresentaram médias superiores na condição de câmara fria em relação ao laboratório, indicando maior manutenção da qualidade fisiológica das sementes armazenadas em CF ao longo dos seis meses, quando comparadas às mantidas em LAB (Figura 3). De modo geral, todas as variáveis apresentaram redução ao longo do armazenamento, com diferentes magnitudes conforme a condição de armazenamento e o ambiente de produção

das sementes.

A PCG mostrou-se mais sensível ao armazenamento, com redução mais acentuada ao longo do tempo, especialmente sob condição de laboratório. A germinação também apresentou decréscimo, porém em menor magnitude quando comparada à PCG. O vigor apresentou redução progressiva durante o armazenamento, sendo essa tendência mais evidente no ambiente de laboratório. A viabilidade, por sua vez, manteve-se relativamente mais estável, com declínio menos acentuado em comparação ao vigor. Esse padrão indica que a redução na velocidade de germinação constitui um dos primeiros indicadores de queda na qualidade das sementes, refletindo a maior sensibilidade da PCG às fases iniciais do processo de deterioração.

Além das condições de armazenamento, o ambiente de produção também esteve associado a diferenças no comportamento das sementes ao longo do período. De modo geral, os materiais provenientes de VIC apresentaram reduções menos acentuadas da PCG quando comparados aos oriundos de CAP. Entretanto, essa diferença pode estar relacionada, ao menos em parte, ao maior nível inicial de qualidade observado nas sementes produzidas em VIC.



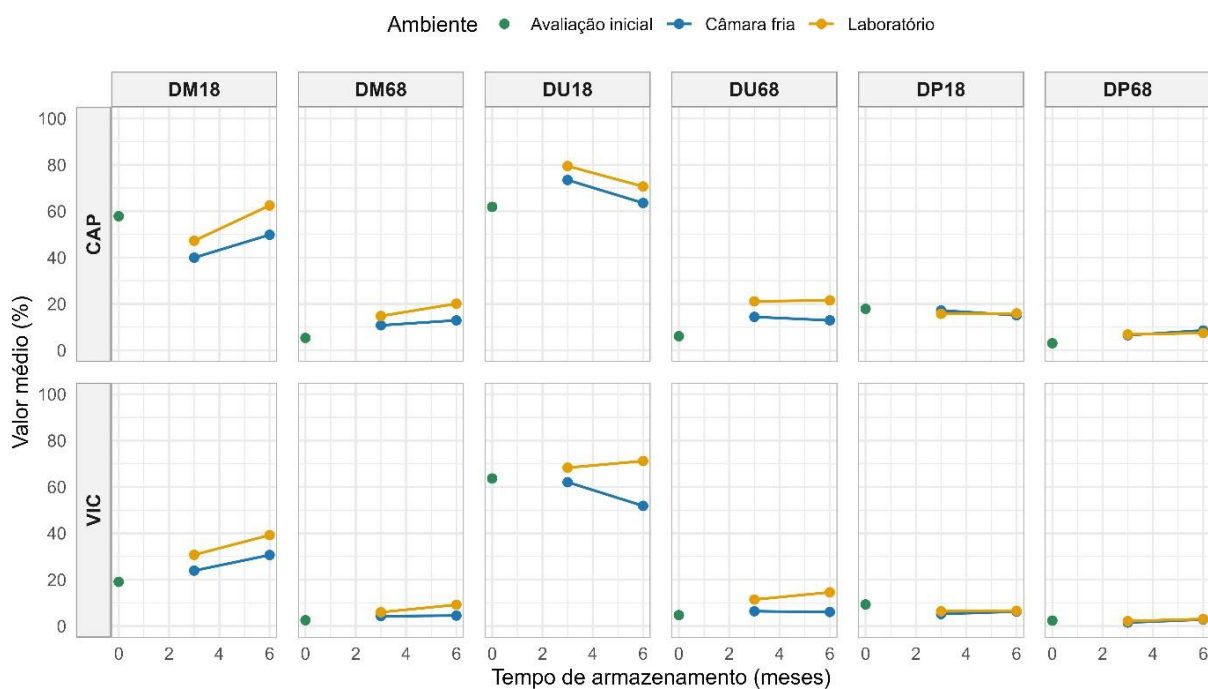
**Figura 3.** – Comportamento temporal das variáveis primeira contagem de germinação (PCG), germinação (GERM), vigor (Vigor) e viabilidade (Viab) em função do ambiente de armazenamento, considerando a avaliação inicial (0 meses) e os ambientes laboratório (LAB) e câmara fria (CF), para sementes produzidas nos ambientes Capinópolis (CAP) e Viçosa (VIC). Os valores apresentados correspondem às médias gerais obtidas para cada combinação de fatores.

Os danos mecânicos (DM), por umidade (DU) e por percevejo (DP), tanto de amplo espectro (18) quanto severos (68), a apresentaram variações na frequência ao longo do

armazenamento (Figura 4).

Observou-se padrão consistente de incremento na frequência de danos severos ao longo do período, especialmente para danos mecânicos e, em menor magnitude, para danos por umidade. Os danos por percevejo apresentaram variações menos expressivas, mantendo-se relativamente estáveis. Os danos de amplo espectro incluem tanto os danos severos (classes 6 a 8) quanto as classes de menor intensidade (1 a 5) e apresentaram comportamento menos uniforme do que os severos. O aumento foi mais evidente para DM18, enquanto DP18 manteve-se relativamente estável e DU18 não apresentou incremento consistente, sendo observada inclusive redução aos três meses no ambiente CAP. Esses padrões sugerem progressão da deterioração em tecidos previamente comprometidos, com intensificação da severidade das lesões

Observou-se ainda maior frequência de danos, especialmente nas classes severas, sob armazenamento em laboratório quando comparado à câmara fria. Esse comportamento indica que condições com maior oscilação térmica e higrométrica podem intensificar a expressão de lesões previamente estabelecidas. Considerando a natureza higroscópica das sementes, variações de temperatura e umidade relativa no ambiente sem controle (LAB) tendem a acelerar processos de deterioração em tecidos já comprometidos, favorecendo o agravamento das lesões inicialmente presentes.



**Figura 4** – Comportamento temporal das variáveis avaliadas pelo teste de tetrazólio, danos mecânicos (DM18 e DM68), danos por umidade (DU18 e DU68) e danos por percevejos (DP18 e DP68), em função do ambiente de armazenamento, considerando a avaliação inicial (0 meses) e os ambientes laboratório (LAB) e câmara fria (CF), para sementes produzidas nos ambientes Capinópolis (CAP) e Viçosa (VIC).

Os valores apresentados correspondem às médias gerais obtidas para cada combinação de fatores.

Diferenças entre a qualidade das sementes nos terços da planta (TS, TM e TI) foram observadas para as variáveis em determinadas combinações de ambiente de produção, condição de armazenamento e tempo (Figura 5).

Em sementes produzidas em Capinópolis e armazenadas em laboratório, aos três meses, TS apresentou valores superiores de PCG e germinação em relação aos demais terços. Entretanto, aos seis meses, essas diferenças deixaram de ser significativas. Sob armazenamento em câmara fria, as variáveis apresentaram padrão semelhante aos três meses, com maiores valores de PCG e germinação no TS em relação ao TM e TI. Aos seis meses, a PCG não diferiu entre os terços e a germinação manteve superioridade do TS em relação ao TI, enquanto o TM não diferiu dos demais terços. Esses resultados indicam que as variações de qualidade de sementes entre os terços não se mantiveram de forma consistente ao longo do armazenamento.

Sharma et al. (2013), que observaram maior deterioração em sementes provenientes do terço inferior em comparação ao terço superior da planta. Segundo os autores, esse comportamento pode estar associado ao maior teor de óleo nas sementes do terço inferior, característica que pode aumentar a suscetibilidade à deterioração. De fato, a deterioração durante o armazenamento é amplamente atribuída à peroxidação lipídica, processo que compromete a integridade das membranas celulares e acelera a perda de qualidade fisiológica (Mahmood; Basra, 2009). Além disso, sementes formadas no terço inferior de cultivares de com habito de crescimento indeterminado permanecem por período mais prolongado no campo do que as sementes do terço médio e inferior, ficando mais expostas a variações ambientais antes da colheita (Oliveira; Carvalho, 2021).

Para as sementes produzidas em Viçosa e armazenadas em câmara fria, ao final de 6 meses de armazenamento, a PCG e a germinação apresentaram maiores valores no TS, em relação ao TM, enquanto o TI não diferiu estatisticamente dos demais. Para as sementes armazenadas no laboratório, o TS apresentou maior valor que os demais.

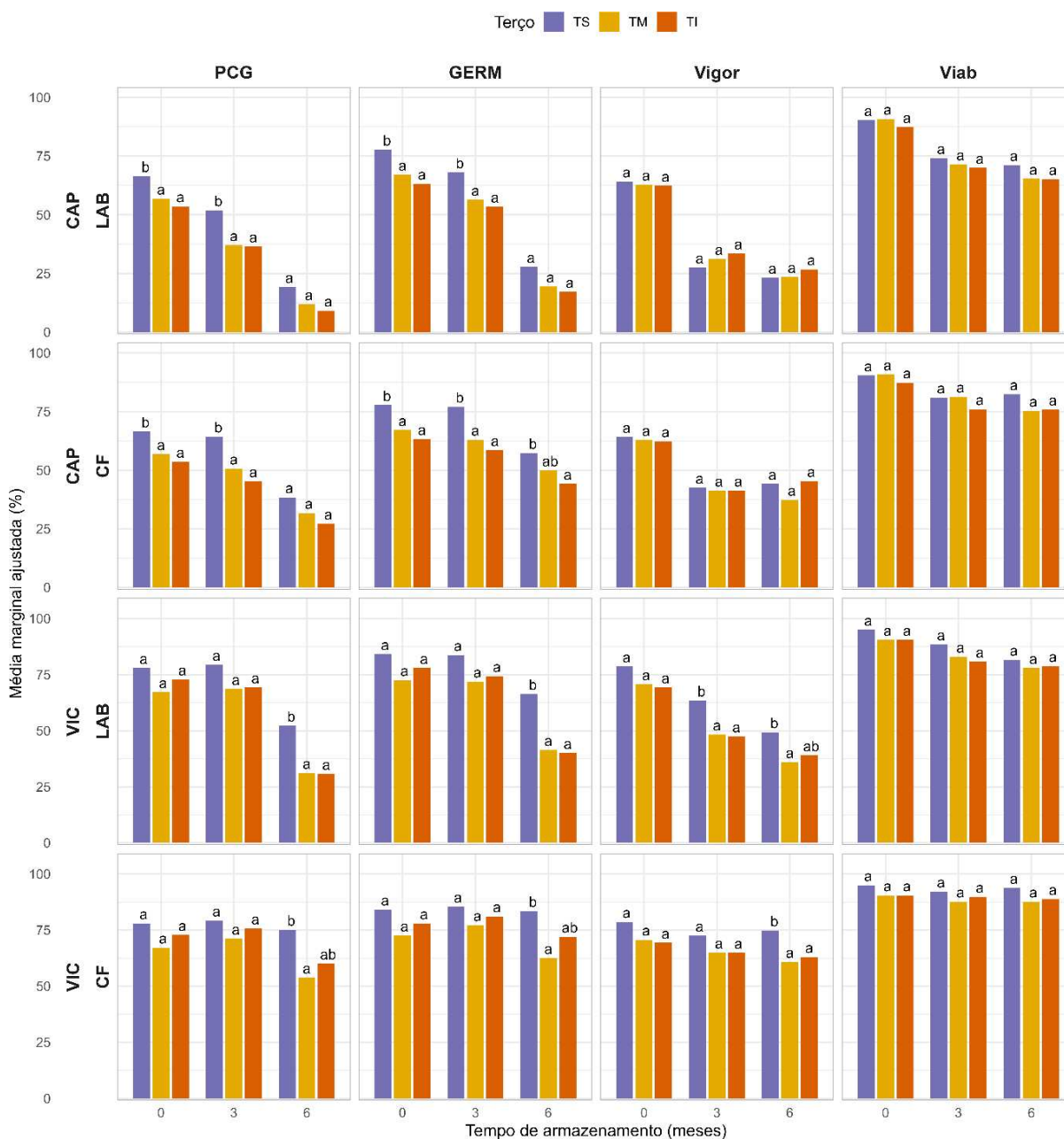
Em relação ao vigor, o comportamento variou conforme o ambiente de produção da semente e a condição de armazenamento. Nas sementes produzidas em Capinópolis, o vigor não diferiu entre os terços ao longo de todo o período avaliado. Já nas sementes produzidas em Viçosa armazenadas em laboratório, ao final dos seis meses observou-se maior vigor no TS em relação ao TM, com o TI não diferindo dos demais terços. Sob armazenamento em câmara fria, o TS apresentou valores superiores de vigor em relação a TM e ao TI, que exibiram médias semelhantes entre si.

A viabilidade manteve-se estatisticamente semelhante entre os terços da planta em todas as combinações de ambiente de produção, condição de armazenamento e tempo

avaliadas.

Os resultados indicam que a uniformidade da qualidade fisiológica das sementes ao longo do dossel inicial (tempo 0) não se manteve de maneira sistemática ao longo do armazenamento. Em algumas combinações, especialmente sob armazenamento em laboratório, diferenças observadas aos três meses deixaram de ser detectadas aos seis meses, sugerindo redução da desuniformidade inicial. Em outras situações, como em sementes produzidas em Viçosa e armazenadas em câmara fria, parte da hierarquia entre terços persistiu até o final do período. Esse comportamento indica que o armazenamento atuou sobre a qualidade inicial das sementes, podendo atenuar ou manter diferenças entre os terços conforme a condição de armazenamento e a variável considerada, sem promover uniformização completa entre as posições da planta.

Esses resultados corroboram parcialmente com os achados de Oliveira e Carvalho (2021), que observaram redução da germinação e do vigor ao longo de 350 dias de armazenamento sob condições controladas de temperatura e umidade relativa, sem detectar efeito do estrato de produção das sementes sobre essas variáveis. De forma semelhante, no presente estudo verificou-se declínio progressivo da qualidade fisiológica durante o armazenamento em condições controladas. Entretanto, diferentemente da ausência de efeito de estrato reportada pelos autores, neste trabalho foram observadas diferenças pontuais entre os terços da planta em determinadas combinações de ambiente de produção e condição de armazenamento. Essas distinções, embora não sistemáticas, indicam que a influência da posição na planta pode se manifestar sob determinadas condições experimentais. Considerando que o presente estudo avaliou seis genótipos em dois ambientes de produção, é possível que a maior variabilidade genética e ambiental tenha permitido a expressão de diferenças da qualidade fisiológica das sementes entre os terços da planta que não foram detectadas por Oliveira e Carvalho (2021), cujo experimento foi conduzido com um único genótipo.



**Figura 5** – Médias ajustadas das variáveis primeira contagem de germinação (PCG), germinação (GERM), vigor (Vigor) e viabilidade (Viab) em função da posição no dossel (TS, TM e TI), considerando os ambientes de produção Capinópolis (CAP) e Viçosa (VIC), as condições de armazenamento laboratório (LAB) e câmara fria (CF), e os tempos de armazenamento (0, 3 e 6 meses). O tempo 0 corresponde à avaliação inicial e foi incluído em ambas as condições de armazenamento para fins comparativos. Médias seguidas pela mesma letra dentro de cada combinação de ambiente de produção, condição de armazenamento, tempo e variável não diferem entre si pelo teste de comparações múltiplas com ajuste de Sidak ( $p \leq 0,05$ ).

As frequências de danos mecânicos (DM), por umidade (DU) e por percevejo (DP), tanto de amplo espectro (18) quanto severos (68), variaram entre os terços da planta ao longo do armazenamento (Figura 6).

Para os danos mecânicos de amplo espectro (DM18), observou-se predominância de maiores médias no terço inferior (TI), seguido do terço médio (TM), em praticamente todas as combinações de ambiente de produção e condição de armazenamento. A exceção ocorreu em CAP sob armazenamento em laboratório aos seis meses, em que o TM apresentou valor ligeiramente superior ao TI. De maneira geral, os danos mecânicos severos (DM68) apresentaram maiores frequências sob condição de laboratório em comparação à câmara fria, além de valores mais elevados nas sementes produzidas em CAP quando comparadas às de VIC, evidenciando maior progressão da severidade sob condições menos estáveis de armazenamento.

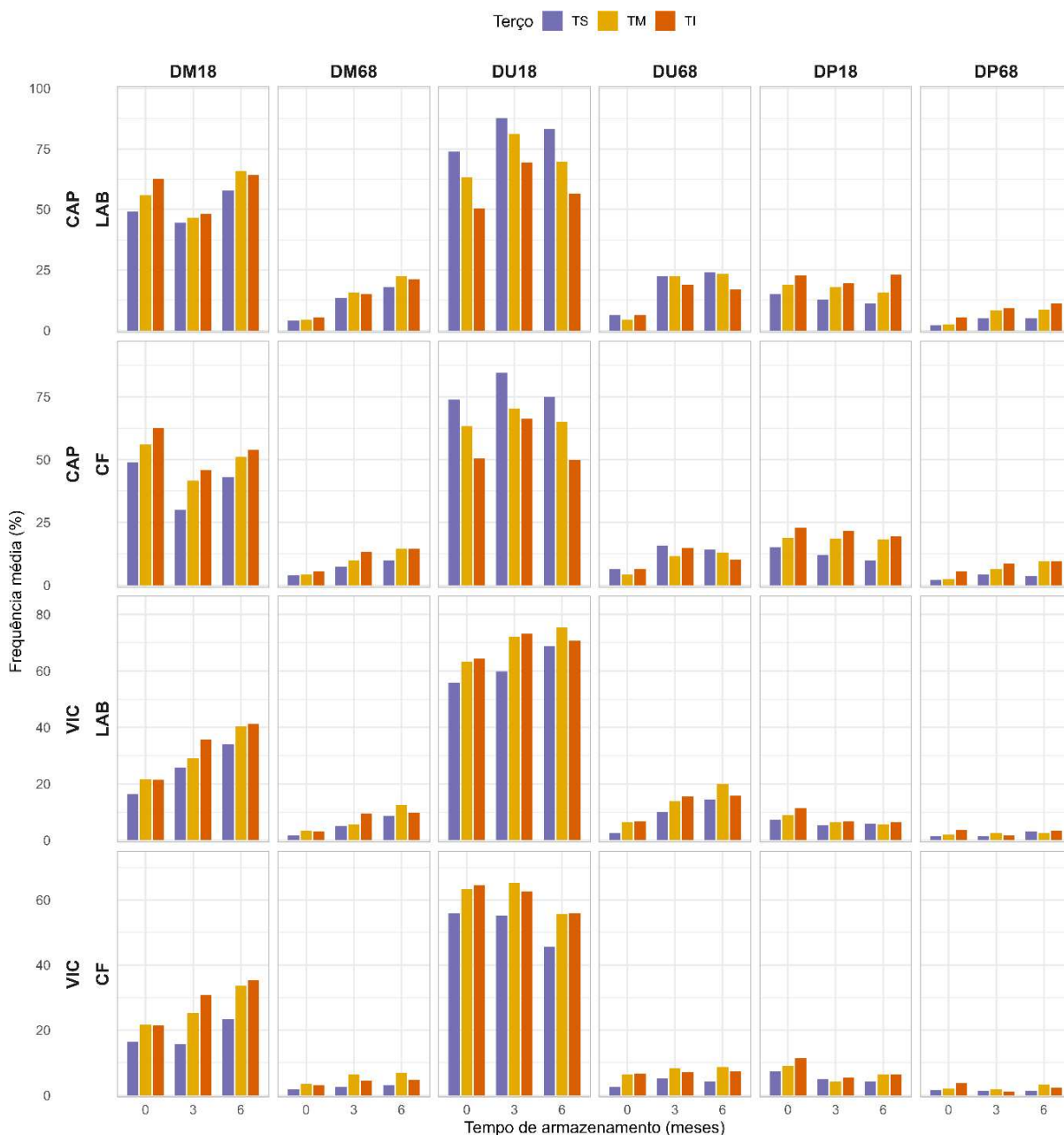
Em relação aos danos por umidade de amplo espectro (DU18), observaram-se variações ao longo do armazenamento, com valores numericamente mais elevados nas sementes produzidas em CAP. Nessa condição, o terço superior (TS) apresentou as maiores médias, seguido do TM. Para as sementes produzidas em VIC, o padrão foi distinto, com maiores frequências concentradas no TM e no TI e menores valores no TS. Esse comportamento é compatível com o esperado para cultivares de hábito de crescimento indeterminado, nas quais o terço inferior, por permanecer um período mais prolongado campo até a colheita, tende a estar mais exposto a ciclos de hidratação e desidratação, aumentando sua suscetibilidade a danos por umidade. A maior frequência de DU18 no TS das sementes produzidas em Capinópolis pode estar associada a condições climáticas ocorridas na fase final do ciclo, como a incidência de chuvas relatada no Capítulo 2. Em cultivares de hábito de crescimento indeterminado, as sementes do terço superior atingem a maturidade fisiológica mais tardiamente e podem estar mais expostas diretamente à precipitação, além de potencialmente apresentarem maior teor de água no momento da colheita. Essa combinação de fatores pode ter contribuído para maior suscetibilidade a danos por umidade nesse estrato.

Os danos severos por umidade (DU68) apresentaram incremento mais evidente sob armazenamento em laboratório, mantendo distribuição entre os terços semelhante à observada para DU18.

Os danos por percevejo de amplo espectro (DP18) nas sementes produzidas em CAP apresentaram maior frequência no TI, seguido do TM e do TS, padrão que se manteve ao longo do armazenamento, com pequenas oscilações nas médias. Nas sementes produzidas em VIC, os valores permaneceram relativamente baixos ao longo do período, com variações discretas e maior uniformidade entre os terços. Comportamento semelhante foi observado para os danos severos (DP68), cujas frequências permaneceram reduzidas e com pouca variação temporal.

De modo geral, o armazenamento em câmara fria esteve associado a menor incremento dos danos severos, particularmente para danos mecânicos e por umidade, quando comparado ao ambiente de laboratório. Esses resultados indicam que o armazenamento,

especialmente sob condições menos controladas de temperatura e umidade relativa, pode intensificar a expressão de lesões previamente estabelecidas no campo, promovendo a progressão da severidade dos danos ao longo do tempo.



**Figura 6** – Frequência média dos danos mecânicos (DM18 e DM68), danos por umidade (DU18 e DU68) e danos por percevejos (DP18 e DP68) em função da posição no dossel (TS, TM e TI), considerando os ambientes de produção Capinópolis (CAP) e Viçosa (VIC), as condições de armazenamento laboratório (LAB) e câmara fria (CF), e os tempos de armazenamento (0, 3 e 6 meses). O tempo 0 corresponde à avaliação inicial e foi incluído em ambas as condições de armazenamento para fins comparativos. Os valores apresentados correspondem às médias descritivas obtidas para cada combinação de fatores.

A divergência multivariada da qualidade das sementes entre os terços da planta, estimada pela distância de Mahalanobis média ( $D^2$ ), variou conforme o genótipo, o ambiente de produção e a condição de armazenamento (Figura 7). A comparação entre a avaliação inicial (0 meses) e seis meses de armazenamento evidenciou padrões distintos na dinâmica da divergência entre os terços.

De modo geral, os genótipos G1, G2, G4 e G5 apresentaram, aos seis meses, maiores valores de  $D^2$  média quando as sementes foram armazenadas em laboratório (LAB), independentemente do ambiente de produção. Em contraste, os genótipos G3 e G9 apresentaram maiores valores de  $D^2$  média quando as sementes foram armazenadas em câmara fria (CF), indicando que o efeito do ambiente de armazenamento sobre a divergência entre os terços foi específico para cada genótipo.

O genótipo G1 apresentou redução da  $D^2$  média ao final do período de armazenamento em todas as combinações avaliadas. Nas sementes produzidas em Capinópolis (CAP) e armazenadas em laboratório, observou-se diminuição da  $D^2$  em todos os terços, sendo essa redução mais pronunciada no terço médio (TM), que inicialmente apresentava maior divergência. Nas sementes produzidas em CAP e armazenadas em câmara fria, houve redução principalmente no TM e no terço inferior (TI). Para as sementes produzidas em Viçosa (VIC), a redução da divergência também foi observada nas duas condições de armazenamento, sendo mais uniforme quando armazenadas em câmara fria.

O genótipo G2 apresentou aumento da  $D^2$  média nas sementes produzidas em CAP e armazenadas tanto em laboratório quanto em câmara fria, bem como nas sementes produzidas em VIC e armazenadas em laboratório. Apenas nas sementes produzidas em VIC e armazenadas em câmara fria observou-se discreta redução da  $D^2$  média. O incremento da divergência esteve associado principalmente ao aumento da  $D^2$  no terço superior (TS) e no TM, enquanto o TI apresentou redução ou variação menos expressiva, conforme a combinação ambiental.

Para o genótipo G3, verificou-se aumento da  $D^2$  média em todas as combinações de produção e armazenamento. Nas sementes produzidas em CAP, o aumento esteve associado principalmente ao TM e ao TI quando armazenadas em câmara fria. Já nas sementes produzidas em VIC, que apresentavam baixa divergência inicial, ocorreu aumento da  $D^2$  nos três terços ao longo do armazenamento, sendo mais expressivo sob armazenamento em câmara fria.

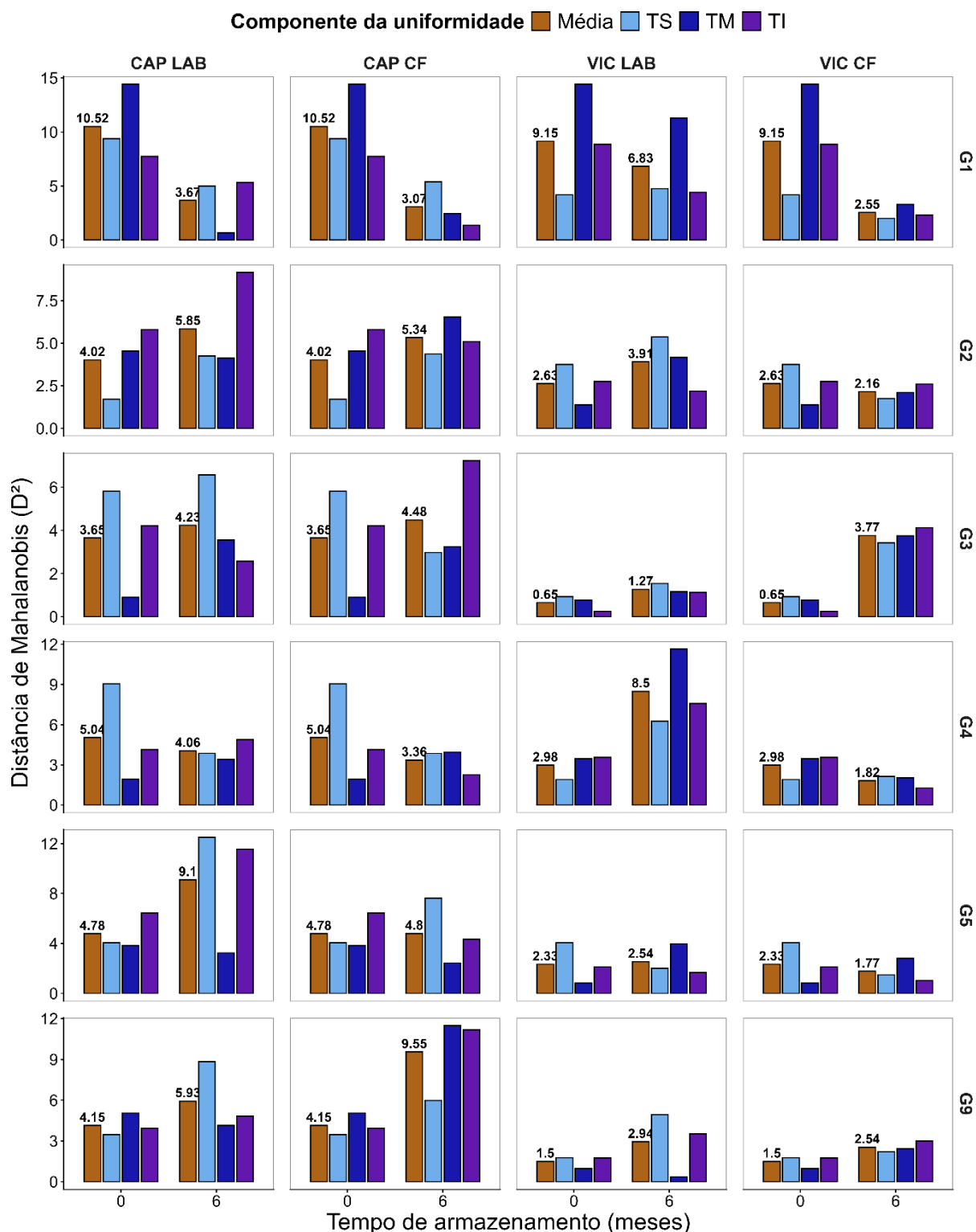
O genótipo G4 apresentou redução da  $D^2$  média nas sementes produzidas em CAP e armazenadas tanto em laboratório quanto em câmara fria, bem como nas sementes produzidas em VIC e armazenadas em câmara fria. Entretanto, nas sementes produzidas em VIC e armazenadas em laboratório observou-se aumento considerável da  $D^2$  média, associado à elevação da divergência nos três terços.

O genótipo G5 apresentou aumento da  $D^2$  média nas sementes produzidas em CAP, independentemente da condição de armazenamento, e também nas sementes produzidas em VIC quando armazenadas em laboratório. Por outro lado, nas sementes produzidas em VIC e armazenadas em câmara fria observou-se redução da divergência média. Em CAP, o aumento esteve relacionado principalmente ao TS e ao TI, enquanto em VIC houve redução da divergência nesses terços e aumento relativo no TM.

O genótipo G9 apresentou aumento da  $D^2$  média em todas as combinações avaliadas. Nas sementes produzidas em CAP, tanto sob armazenamento em laboratório quanto em câmara fria, verificou-se aumento da divergência entre os terços. Nas sementes produzidas em VIC, o incremento também ocorreu nas duas condições de armazenamento, com elevação da  $D^2$  nos três terços ao final do período.

De forma geral, os resultados indicam que o armazenamento pode tanto ampliar quanto reduzir a divergência multivariada da qualidade das sementes entre os terços da planta, dependendo do genótipo e da combinação entre ambiente de produção e condição de armazenamento. A dinâmica observada evidencia que o processo de deterioração não atuou de maneira uniforme ao longo do dossel, podendo alterar a contribuição relativa de cada terço para a divergência total ao longo do tempo.

Diversos estudos relatam que o armazenamento sob condições refrigeradas está associado à maior manutenção da germinação e da qualidade fisiológica das sementes (Smaniotto et al., 2014; Oliveira; Carvalho, 2021; Koskosidis et al., 2022). Além das condições de armazenamento, a qualidade inicial do lote também exerce papel determinante na estabilidade ao longo do tempo. Vergara et al. (2019) destacam que sementes com melhor condição fisiológica inicial tendem a apresentar maior desempenho após o armazenamento.



**Figura 7** – Perfil temporal da uniformidade vertical da qualidade das sementes, expressa pela distância de Mahalanobis média ( $D^2$ ), em função do tempo de armazenamento (0 e 6 meses), do ambiente de produção das sementes (Capinópolis – CAP e Viçosa – VIC) e do ambiente de armazenamento (laboratório – LAB e câmara fria – CF), para os genótipos G1, G2, G3, G4, G5 e G9. As barras representam a contribuição da média do genótipo (Média) e dos terços superior (TS), médio (TM) e inferior (TI) para a uniformidade vertical em cada condição avaliada. A avaliação inicial (0 meses) foi

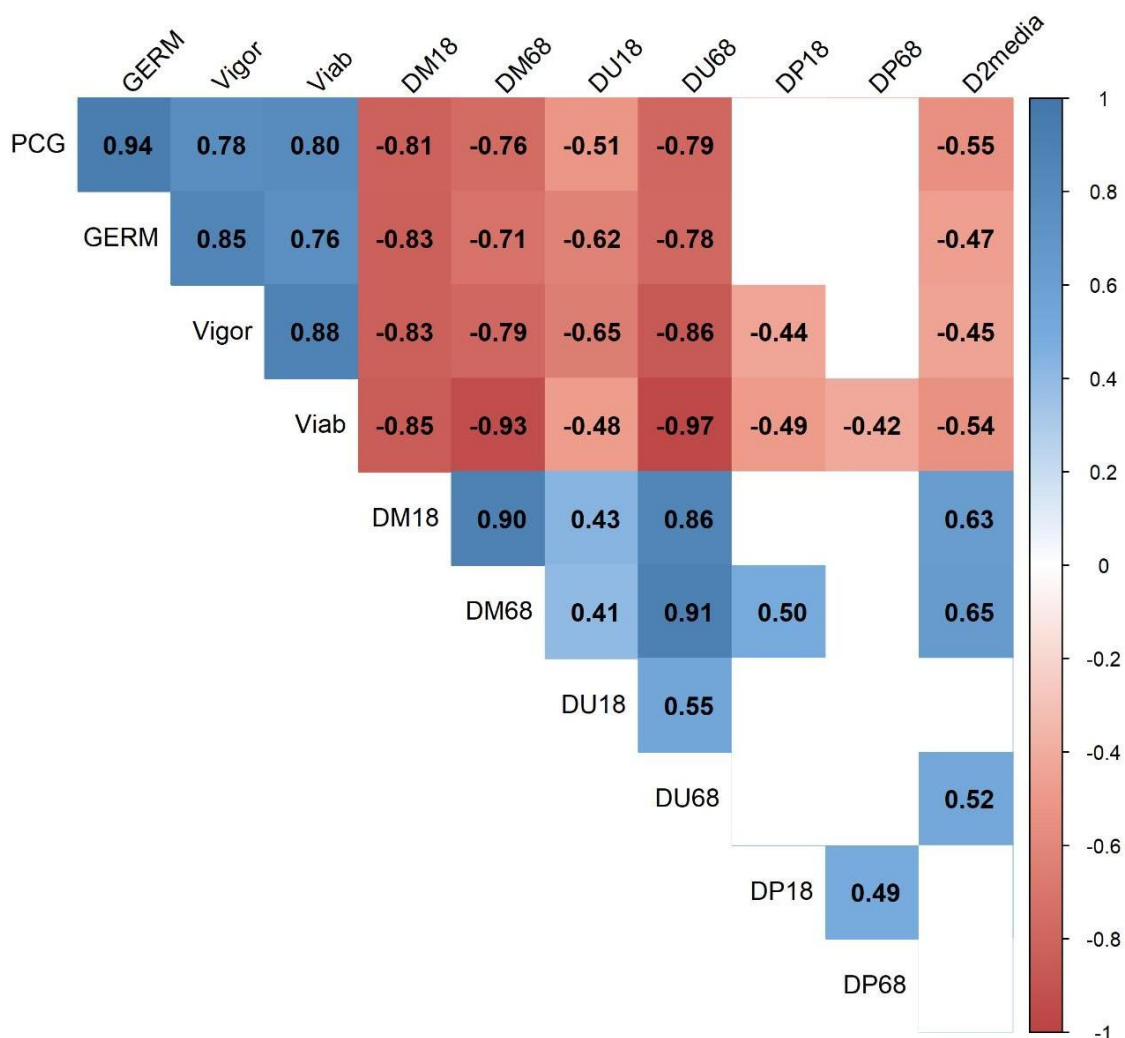
utilizada como ponto de referência comum aos ambientes de armazenamento, permitindo a comparação das trajetórias de alteração da uniformidade ao longo do armazenamento.

A análise de correlação de Spearman foi empregada com o objetivo de investigar se a divergência multivariada média da qualidade das sementes entre os terços da planta ( $D^2$  média) esteve associada ao desempenho fisiológico comercial do lote de sementes (Figura 8). Para isso, a correlação foi realizada com os valores observados aos seis meses de armazenamento para o terço planta inteira (PI). A escolha do PI como base para a correlação justifica-se por representar a condição efetivamente obtida no manejo convencional de colheita, permitindo avaliar se maior desuniformidade da qualidade das sementes entre posições na planta esteve relacionada a alterações na qualidade média do lote de sementes que é colhido convencionalmente.

As variáveis fisiológicas apresentaram correlações positivas elevadas entre si, evidenciando coerência interna entre os testes utilizados para avaliação da qualidade fisiológica. Por sua vez, as variáveis de danos apresentaram correlação negativa com os atributos fisiológicos, indicando que o aumento da frequência de danos esteve associado à redução da qualidade das sementes.

A divergência multivariada da qualidade fisiológica das sementes ao longo do dossel ( $D^2$ ) apresentou correlação negativa com PCG, viabilidade, germinação e vigor, indicando que lotes com menor desempenho fisiológico tenderam a apresentar maior desuniformidade da qualidade fisiológica das sementes entre os terços da planta. Em contrapartida, a  $D^2$  apresentou correlação positiva com os danos mecânicos de amplo espectro e severos, bem como com os danos severos por umidade, sugerindo que o aumento da divergência multivariada esteve associado principalmente à intensificação da frequência desses danos entre posições na planta.

Esses resultados indicam que o aumento da  $D^2$  média não esteve associado apenas à redução da qualidade fisiológica média do lote, mas sobretudo ao aumento da frequência de danos nas sementes dos diferentes estratos do dossel. Esse comportamento reforça o caráter multivariado da  $D^2$  como medida integrada da desuniformidade da qualidade das sementes ao longo do dossel em cultivares de hábito de crescimento indeterminado.



**Figura 8** – Matriz dos coeficientes de correlação de Spearman entre variáveis de qualidade fisiológica, danos em sementes e a distância de Mahalanobis média (D2media). Os valores apresentados correspondem aos coeficientes de correlação monotônica ( $\rho$ ), variando de  $-1$  a  $1$ , sendo as correlações positivas representadas em tons de azul e as negativas em tons de vermelho. Foram apresentados apenas os coeficientes de correlação significativos pelo teste de Spearman ( $p \leq 0,05$ ), considerando os valores observados aos seis meses de armazenamento para o tratamento planta inteira (PI). Germ = germinação; PCG = primeira contagem de germinação; Vigor = vigor avaliado por meio do teste de tetrazólio; Viab = viabilidade avaliada por meio do teste de tetrazólio; DM18 e DM68 = danos mecânicos classificados nas classes de 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente; DU18 e DU68 = danos por umidade classificados nas classes de 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente; DP18 e DP68 = danos por percevejo classificados nas classes de 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente; D<sup>2</sup>\_media = distância de Mahalanobis média, utilizada como estimador da uniformidade da qualidade das sementes entre os terços da planta.

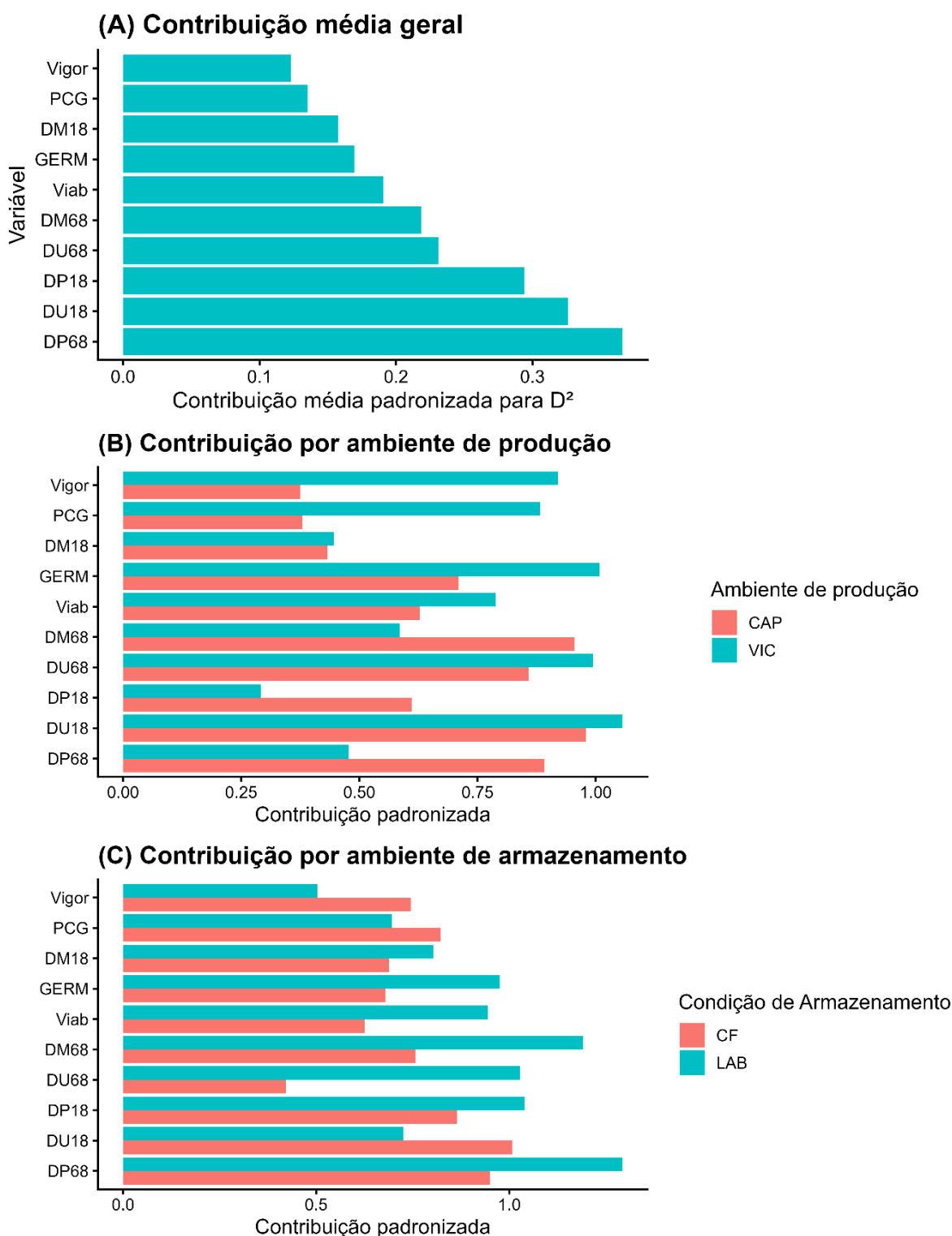
A análise da contribuição relativa das variáveis para a divergência multivariada entre os terços da planta ( $D^2$ ) evidenciou que os danos avaliados pelo teste de tetrazólio foram os principais responsáveis pela desuniformidade da qualidade das sementes ao longo do dossel (Figura 9A).

De modo geral, as maiores contribuições foram observadas para os danos severos por percevejo (DP68), danos por umidade de amplo espectro (DU18), danos por percevejo de amplo espectro (DP18), danos severos por umidade (DU68) e danos mecânicos severos (DM68). Em contraste, as variáveis fisiológicas apresentaram menor contribuição relativa para a divergência total.

A estratificação por ambiente de produção (Figura 9B) revelou que, nas sementes produzidas em Capinópolis, a divergência entre os terços foi mais fortemente explicada por danos mecânicos e por umidade, especialmente em suas classes severas. Já nas sementes produzidas em Viçosa, observou-se padrão mais equilibrado entre danos e variáveis fisiológicas, embora os danos por umidade permanecessem entre os principais determinantes da divergência.

Em relação à condição de armazenamento (Figura 9C), o ambiente de laboratório esteve associado a maior contribuição de danos severos, particularmente DP68 e DM68, para a divergência multivariada. Por outro lado, sob armazenamento em câmara fria, a contribuição das variáveis mostrou-se mais distribuída, com destaque para os danos por umidade, porém com menor predominância de danos severos mecânicos e por percevejo.

Esses resultados indicam que a divergência da qualidade das sementes entre os terços da planta não foi determinada predominantemente pela variação nos testes fisiológicos, mas principalmente pela distribuição da frequência de danos nas sementes ao longo do dossel, reforçando o caráter multivariado da  $D^2$  como medida integrada da desuniformidade da qualidade das sementes.



**Figura 9** – Contribuição relativa das variáveis para a divergência multivariada da qualidade das sementes entre os terços da planta ( $D^2$ ) aos seis meses de armazenamento. (A) Contribuição média geral das variáveis, considerando todas as combinações de genótipo, ambiente de produção e condição de armazenamento. (B) Contribuição das variáveis estratificada por ambiente de produção (CAP = Capinópolis; VIC = Viçosa). (C) Contribuição das variáveis estratificada por ambiente de armazenamento (LAB = laboratório; CF = câmara fria). Germ = germinação; PCG = primeira contagem

de germinação; Vigor = vigor avaliado por meio do teste de tetrazólio; Viab = viabilidade avaliada por meio do teste de tetrazólio; DM18 e DM68 = danos mecânicos classificados nas classes de 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente; DU18 e DU68 = danos por umidade classificados nas classes de 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente; DP18 e DP68 = danos por percevejo classificados nas classes de 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente.

A dinâmica da deterioração das sementes no intervalo entre três e seis meses de armazenamento foi analisada por meio da decomposição da variância e das estimativas de inclinação ( $\% \text{ mês}^{-1}$ ), permitindo avaliar tanto os efeitos principais quanto as interações com o tempo (Tabela 2; Figura 10). A análise indicou variação consistente associada aos fatores experimentais avaliados — genótipo, ambiente de produção, posição na planta e condição de armazenamento — sobre a taxa de redução dos atributos fisiológicos.

O ambiente de produção apresentou os maiores valores de F para todas as variáveis, indicando contribuição expressiva para a variação observada em germinação, primeira contagem de germinação, vigor e viabilidade. Esse padrão confirma que o ambiente no qual as sementes foram produzidas influenciou de forma determinante o desempenho fisiológico no período de armazenamento analisado, reforçando a importância da qualidade inicial estabelecida no campo.

A condição de armazenamento também apresentou efeito significativo e de elevada magnitude, indicando que o ambiente de armazenamento regulou a intensidade da perda fisiológica entre três e seis meses. De forma complementar, o fator meses foi significativo para todas as variáveis, com valores de F particularmente elevados para germinação e primeira contagem de germinação, enquanto para vigor e viabilidade os valores foram inferiores. Esse contraste indica que os testes diretamente relacionados à capacidade germinativa foram mais sensíveis para detectar a redução da qualidade de sementes.

A posição na planta apresentou efeito significativo para todas as variáveis, especialmente para germinação e primeira contagem de germinação, embora com magnitude inferior àquela atribuída ao ambiente de produção e à condição de armazenamento. Esse resultado indica que existem diferenças estruturais entre os terços quanto aos níveis médios de qualidade, porém secundárias na dinâmica de deterioração.

As interações com o tempo permitem examinar se a taxa de deterioração variou conforme os fatores avaliados (Tabela 2; Figura 10). A interação Genótipos  $\times$  Meses foi significativa para germinação e primeira contagem de germinação, indicando que os genótipos diferiram quanto à intensidade da redução desses atributos entre três e seis meses. Para vigor e viabilidade, entretanto, o padrão foi mais uniforme entre os materiais, sugerindo menor variabilidade genética na taxa de deterioração desses parâmetros no intervalo considerado. Essa diferença pode estar associada à variabilidade genética quanto à suscetibilidade às

intempéries no campo, fator que influencia a taxa de deterioração durante o armazenamento. Características sob controle genético, como espessura do tegumento, teor de óleo e permeabilidade, têm sido exploradas em programas de melhoramento com o objetivo de aprimorar a qualidade fisiológica e a capacidade de armazenamento das sementes de soja (Tripathi; Khare, 2016).

A interação Ambientes de produção × Meses foi significativa apenas para germinação, sugerindo diferenças na intensidade da perda germinativa entre os ambientes de produção. Conforme ilustrado na Figura 10, sementes produzidas em Viçosa apresentaram menor velocidade de redução da germinação em comparação às provenientes de Capinópolis.

Por sua vez, a interação Posições na planta × Meses não foi significativa para nenhuma das variáveis avaliadas, indicando que, embora existam diferenças nos níveis médios de qualidade entre os terços, a taxa de deterioração entre três e seis meses foi semelhante entre posições. Esse comportamento é corroborado pela sobreposição dos intervalos de confiança das inclinações na Figura 7, sugerindo que o armazenamento não ampliou diferencialmente as diferenças fenotípicas previamente estabelecidas entre os estratos da planta. Esse achado está em consonância com os resultados de Oliveira e Carvalho (2021), que também observaram que os diferentes estratos da planta mantiveram comportamento semelhante quanto à deterioração ao longo do armazenamento.

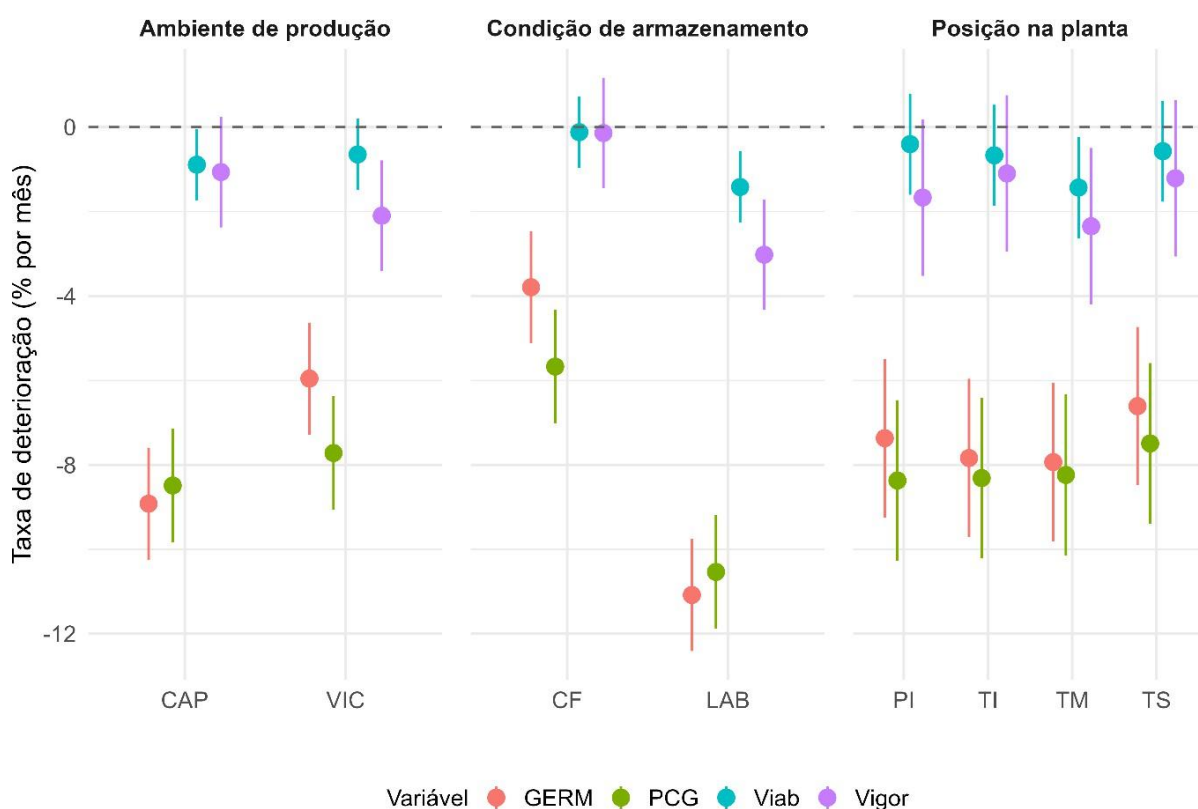
A interação Condições de armazenamento × Meses foi significativa para todas as variáveis, indicando que o ambiente de armazenamento influenciou diretamente a velocidade de deterioração. Conforme observado na Figura 7, as inclinações estimadas sob armazenamento em laboratório foram substancialmente mais negativas do que aquelas sob câmara fria. Para germinação, as taxas sob laboratório aproximaram-se de  $-11 \text{ \% mês}^{-1}$ , enquanto sob câmara fria mantiveram-se próximas de  $-4 \text{ \% mês}^{-1}$ , padrão semelhante ao observado para a primeira contagem de germinação. Para vigor e viabilidade, as reduções mensais foram menos intensas, indicando maior estabilidade relativa desses atributos no período analisado.

Esses resultados indicam que a condição de armazenamento influenciou tanto a intensidade quanto a velocidade da deterioração das sementes avaliadas, enquanto a posição na planta influenciou predominantemente os níveis médios de qualidade das sementes, sem alterar de forma significativa a taxa de declínio entre três e seis meses.

**Tabela 2** – Análise de variância (ANOVA) da dinâmica de deterioração das sementes entre 3 e 6 meses de armazenamento, considerando os efeitos de genótipo, ambiente de produção, posição na planta, condição de armazenamento e suas interações com o tempo.

Fonte de variação	GL	GERM (F)	GERM (p)	PCG (F)	PCG (p)	Vigor (F)	Vigor (p)	Viab (F)	Viab (p)
Genótipos	5	15.63	<0.001	13.41	<0.001	13.99	<0.001	19.27	<0.001
Ambientes de produção	1	208.86	<0.001	347.19	<0.001	247.34	<0.001	196.85	<0.001
Posições na planta	3	20.57	<0.001	18.97	<0.001	4.44	0.005	8.80	<0.001
Condições de armazenamento	1	142.80	<0.001	108.06	<0.001	135.62	<0.001	71.25	<0.001
Meses	1	245.10	<0.001	281.95	<0.001	11.32	<0.001	6.41	0.012
Genótipos × Meses	5	2.57	0.029	3.82	0.003	0.06	0.998	1.12	0.353
Ambientes de produção × Meses	1	9.74	0.002	0.64	0.426	1.21	0.272	0.16	0.689
Posições na Planta × Meses	3	0.41	0.749	0.18	0.909	0.37	0.778	0.56	0.639
Condições de armazenamento × Meses	1	58.89	<0.001	25.40	<0.001	9.42	0.003	4.59	0.034

Nota: F = valor do teste F; p = nível de significância; GL = graus de liberdade. Apenas os termos relacionados à dinâmica de deterioração foram apresentados. GL residual = 167. Germ = germinação; PCG = primeira contagem de germinação; Vigor = vigor avaliado por meio do teste de tetrazólio; Viab = viabilidade avaliada por meio do teste de tetrazólio.



**Figura 10** – Taxa de deterioração (% por mês) das sementes entre 3 e 6 meses de armazenamento, em função do ambiente de produção, condição de armazenamento e posição na planta. Pontos representam as inclinações estimadas por regressão linear ajustada, e as barras verticais indicam o intervalo de confiança de 95%. As estimativas foram obtidas a partir de modelo linear ajustado considerando os efeitos de genótipo, ambiente de produção, posição na planta, condição de armazenamento, tempo (meses) e suas interações com o tempo. Inclinações cujo intervalo de confiança não intercepta zero indicam tendência consistente de deterioração ao longo do período avaliado. CAP = Capinópolis; VIC = Viçosa; LAB = laboratório; CF = câmara fria; Germ = germinação; PCG = primeira contagem de germinação; Vigor = vigor avaliado por meio do teste de tetrazólio; Viab = viabilidade avaliada por meio do teste de tetrazólio.

A dinâmica temporal dos danos nas sementes avaliados pelo teste de tetrazólio entre três e seis meses de armazenamento evidenciou padrões distintos conforme o tipo de dano considerado (Tabela 3). Nesta tabela são apresentados exclusivamente os efeitos envolvendo o fator meses e suas interações, uma vez que o objetivo desta etapa foi examinar especificamente a taxa de variação dos danos no intervalo avaliado. Os efeitos principais de genótipo, ambiente de produção, posição na planta e condição de armazenamento, embora significativos para a maioria das variáveis, não são detalhados nesta seção por refletirem diferenças previamente estabelecidas entre os genótipos, os ambientes e as posições na planta, já discutidas nas análises anteriores.

Conforme observado na Tabela 3, o fator meses apresentou efeito significativo principalmente para os danos mecânicos de amplo espectro (DM18), seguido pelos danos por umidade de amplo espectro (DU18) e pelos danos mecânicos severos (DM68). Para danos severos por percevejo (DP68), o efeito foi significativo, porém de menor magnitude. Já os danos severos por umidade (DU68) e os danos por percevejo de amplo espectro (DP18) não apresentaram variação temporal significativa no período considerado. Esses resultados indicam que, entre três e seis meses, a modificação temporal foi mais evidente para os danos mecânicos, enquanto os demais tipos de dano apresentaram variação mais discreta.

A interação Genótipos  $\times$  Meses não foi significativa para a maioria dos danos avaliados, indicando que a progressão temporal ocorreu de forma relativamente uniforme entre os materiais. De modo semelhante, a interação Posições na planta  $\times$  Meses não foi significativa para nenhum tipo de dano, sugerindo que, embora existam diferenças nos níveis médios entre os terços, a taxa de variação temporal foi semelhante entre posições.

A interação Ambiente de produção  $\times$  Meses foi significativa apenas para DM18, indicando que a intensidade de incremento desse dano variou entre os ambientes de produção. Para os demais danos, a ausência de interação significativa na Tabela 3 indica que a progressão temporal foi semelhante entre ambientes.

A interação Condições de armazenamento  $\times$  Meses foi significativa para DM68 e DU18, evidenciando que o ambiente de armazenamento influenciou a taxa de variação desses danos. Para DM18, DP18, DP68 e DU68, entretanto, não houve diferença significativa entre laboratório e câmara fria quanto à taxa de variação no período analisado.

Os padrões observados na Tabela 3 são corroborados pelas estimativas de inclinação apresentadas na Figura 11. Para os danos mecânicos de amplo espectro (DM18), observa-se incremento positivo ao longo do tempo, com taxas mais elevadas em comparação aos demais danos.

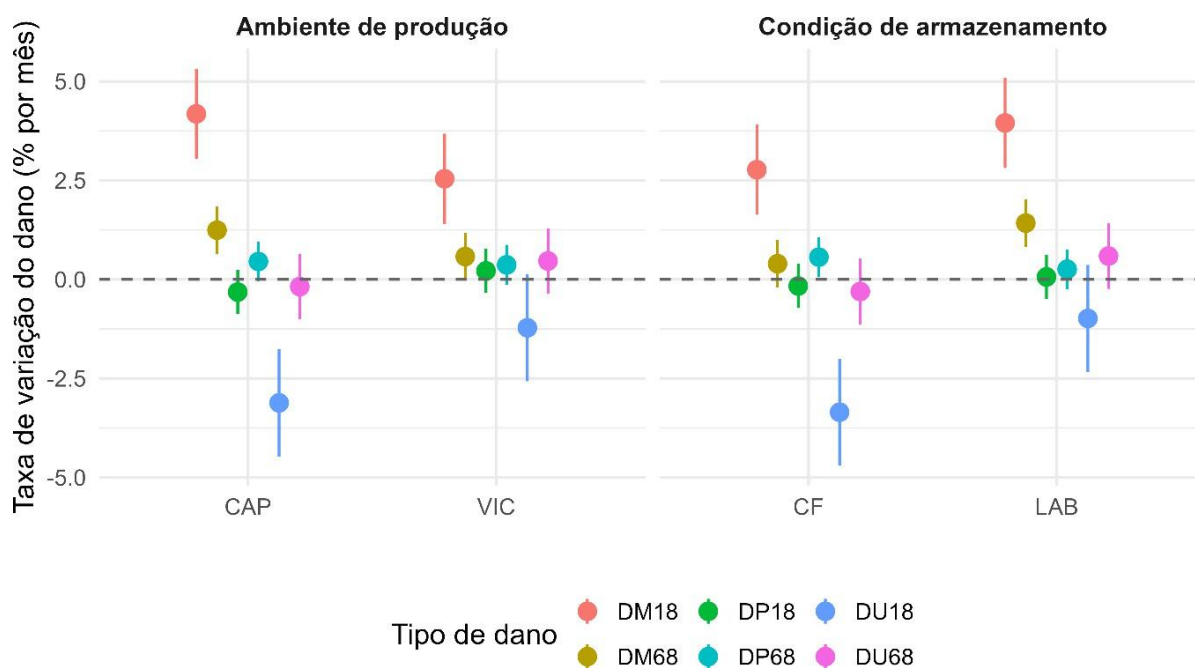
Os danos por umidade de amplo espectro (DU18), embora tenham apresentado efeito significativo do fator meses na Tabela 3, exibiram inclinações negativas na Figura 8, indicando tendência de redução entre três e seis meses. Em contraste, os danos mecânicos severos (DM68), os danos severos por umidade (DU68) e os danos por percevejo (DP18 e DP68) apresentaram taxas próximas de zero ou discretamente positivas, não ultrapassando aproximadamente 1,5% ao mês, mesmo nas condições de maior variação. Esse padrão indica estabilidade relativa desses danos no período avaliado, sugerindo que o armazenamento entre três e seis meses não promoveu incremento expressivo desses componentes.

A ampla sobreposição dos intervalos de confiança na Figura 8 reforça que, embora existam tendências de incremento para determinados danos, a magnitude dessas variações foi relativamente baixa quando comparada à dinâmica de deterioração fisiológica observada no mesmo período.

**Tabela 3** – Análise da dinâmica temporal dos danos estruturais entre 3 e 6 meses de armazenamento. São apresentados apenas os efeitos envolvendo o fator tempo (meses) e suas interações.

Fonte de variação	GL	DM18	DM18	DM68	DM68	DU18	DU18	DU68	DU68	DP18	DP18	DP68	DP68
		(F)	(p)	(F)	(p)	(F)	(p)	(F)	(p)	(F)	(p)	(F)	(p)
Meses	1	68.11	<0.001	17.71	<0.001	20.12	<0.001	0.23	0.632	0.07	0.795	5.14	0.025
Genótipos × Meses	5	1.84	0.108	1.51	0.190	2.27	0.050	0.86	0.509	0.87	0.503	1.22	0.300
Ambientes de produção × Meses	1	4.05	0.046	2.38	0.125	3.84	0.052	1.18	0.278	1.79	0.183	0.05	0.818
Posições na planta × Meses	3	0.40	0.750	1.26	0.289	0.74	0.530	0.76	0.518	0.23	0.873	0.49	0.693
Condições de armazenamento × Meses	1	2.10	0.149	5.65	0.019	5.99	0.015	2.28	0.133	0.33	0.567	0.71	0.399

Nota: F = valor do teste F; p = nível de significância; GL = graus de liberdade. São apresentados exclusivamente os efeitos envolvendo o fator tempo (meses) e suas interações, por representarem a dinâmica temporal dos danos estruturais no intervalo avaliado. GL residual = 167. DM18 e DM68 = danos mecânicos classificados nas classes de 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente; DU18 e DU68 = danos por umidade classificados nas classes de 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente; DP18 e DP68 = danos por percevejo classificados nas classes de 1 a 8 e 6 a 8, respectivamente.



**Figura 11** – Taxa de deterioração (% por mês) das sementes entre 3 e 6 meses de armazenamento, em função do ambiente de produção, condição de armazenamento e posição na planta. Pontos representam as inclinações estimadas por regressão linear ajustada, e as barras verticais indicam o intervalo de confiança de 95%. As estimativas foram obtidas a partir de modelo linear ajustado considerando os efeitos de genótipo, ambiente de produção, posição na planta, condição de armazenamento, tempo (meses) e suas interações com o tempo. Inclinações cujo intervalo de confiança não intercepta zero indicam deterioração estatisticamente significativa ( $p < 0,05$ ).

Os resultados indicam que a desuniformidade da qualidade das sementes entre os terços da planta se estabelece predominantemente ainda no campo, sob influência do ambiente de produção e das características próprias do crescimento indeterminado. Sementes provenientes do terço inferior florescem primeiro e permanecem por período mais prolongado expostas às condições ambientais antes da colheita, além de se desenvolverem em regiões do dossel com menor incidência de radiação solar e maior umidade relativa, fatores que podem limitar a translocação de fotoassimilados e favorecer a ocorrência de microrganismos (Taiz; Zeiger, 2013; Teixeira; Stone; Heinemann, 2015; Huber et al., 2016; Oliveira; Carvalho, 2021). Esses mecanismos contribuem para diferenças na qualidade física e fisiológica estabelecidas inicialmente entre as posições da planta.

No período de armazenamento entre três e seis meses, a deterioração fisiológica mostrou-se mais pronunciada que a progressão dos danos identificados pelo teste de tetrazólio, sendo influenciada principalmente pela condição de armazenamento. As estimativas de inclinação indicaram reduções mensais mais intensas para germinação e primeira contagem de germinação, enquanto a maioria dos danos apresentou variações discretas nesse intervalo. Durante o armazenamento, as lesões previamente estabelecidas

tendem a ser intensificadas, especialmente sob condições de maior temperatura e oscilação higrométrica, favorecendo a progressão de danos na estrutura das sementes e o declínio do desempenho fisiológico das sementes (Gebeyehu, 2020; Rezende dos Anjos, 2023).

Considerando que a interação Posições na planta × Meses não foi significativa para as variáveis fisiológicas nem para os danos, a variação da desuniformidade da qualidade das sementes entre os terços observada em determinados genótipos não parece decorrer de diferenças na taxa de deterioração entre posições, mas sim da manutenção e da amplificação das diferenças entre os estratos da planta previamente estabelecidos no campo.

#### 4. CONCLUSÃO

A armazenabilidade sementes foi influenciada principalmente pelo ambiente de produção e pela condição de armazenamento, com maior redução da qualidade fisiológica em ambiente sem controle térmico e higrométrico. O ambiente de produção afetou a manutenção da qualidade das sementes ao longo do armazenamento, evidenciando a importância da qualidade inicial obtida no campo. A posição da semente na planta esteve associada a diferenças nos níveis médios de qualidade, porém a taxa de deterioração ao longo do armazenamento foi semelhante entre os terços. Além disso, observou-se variabilidade entre os genótipos quanto à estabilidade fisiológica e à uniformidade da qualidade das sementes durante o armazenamento.

#### 5. REFERÊNCIAS

AFZAL, Irfan *et al.* Modern Seed Technology: Seed Coating Delivery Systems for Enhancing Seed and Crop Performance. **Agriculture**, v. 10, n. 11, p. 526, nov. 2020.

BRASIL. **Regras para Análise de Sementes (RAS)**. Disponível em: <https://wikisda.agricultura.gov.br>. Acesso em: 18 dez. 2025.

CORADI, Paulo Carteri *et al.* Soybean seed storage: Packaging technologies and conditions of storage environments. **Journal of Stored Products Research**, v. 89, p. 101709, 1 dez. 2020.

DE ALENCAR, Ernandes Rodrigues; FARONI, Lêda Rita D'Antonino. Storage of soybeans and its effects on quality of soybean sub-products. **Recent Trends for Enhancing the Diversity and Quality of Soybean Products**, 2011.

DE MAESSCHALCK, R.; JOUAN-RIMBAUD, D.; MASSART, D. L. The Mahalanobis distance. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 50, n. 1, p. 1–18, jan. 2000.

DELOUCHE, James C. **Physiological Changes During Storage That Affect Soybean Seed Quality**. Mississippi State, MS: Mississippi State University, 1981.

ĐUKIĆ, Vojin *et al.* Pulsed electromagnetic field – a cultivation practice used to increase soybean seed germination and yield. **Zemdirbyste-Agriculture**, v. 104, n. 4, p. 345–352, 10

nov. 2017.

EBONE, Luciano Antônio *et al.* Soybean Seed Vigor: Uniformity and Growth as Key Factors to Improve Yield. **Agronomy**, v. 10, n. 4, p. 545, abr. 2020.

FRANÇA-NETO, José de Barros; KRZYZANOWSKI, Francisco Carlos. **Metodologia do teste de tetrazólio em sementes de soja**. 2018.

GEBEYEHU, Birhanu. Review on: Effect of Seed Storage Period and Storage Environment on Seed Quality. **International Journal of Applied Agricultural Sciences**, v. 6, n. 6, p. 185, 2020.

GRAVES, Spencer *et al.* **multcompView: Visualizations of Paired Comparisons.**, 2024. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=multcompView>>. Acesso em: 12 fev. 2026

HOTHORN, Torsten; BRETZ, Frank; WESTFALL, Peter. Simultaneous Inference in General Parametric Models. **Biometrical Journal**, v. 50, n. 3, p. 346–363, jun. 2008.

HUBER, Steven C. *et al.* Canopy position has a profound effect on soybean seed composition. **PeerJ**, v. 4, p. e2452, 2016.

JACINTHO, J. B. C.; DE CARVALHO, N. M. Maturacao de sementes de soja (*Glycine max* L., Merrill). **Científica**, v. 1, 1974.

KATO, Shin *et al.* The effect of stem growth habit on single seed weight and seed uniformity in soybean. **Breeding Science**, v. 68, n. 3, p. 352–359, 2018.

KOSKOSIDIS, Avraam *et al.* Effect of storage conditions on seed quality of soybean (*Glycine max* L.) germplasm. **AIMS Agriculture and Food**, v. 7, n. 2, p. 387–402, 2022.

LENTH, Russell V.; PIASKOWSKI, Julia. **emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means.**, 2025. Disponível em: <<https://CRAN.R-project.org/package=emmeans>>. Acesso em: 12 fev. 2026

MAHMOOD, Tariq; BASRA, S. M. Invigoration of low vigor sunflower hybrids by seed priming. **Int. J. Agric. Biol.**, v. 11, p. 521–528, 2009.

MAMLIC, Zlatica *et al.* The Use of Electrostatic Field to Improve Soybean Seed Germination in Organic Production. **Agronomy**, v. 11, n. 8, p. 1473, ago. 2021.

MANJARI, T. *et al.* Soybean storage and Preservation: A comprehensive review of post-harvest challenges, technologies, and global perspectives. **Journal of Stored Products Research**, v. 116, p. 102910, 2026.

MONTEIRO, Fiorita Faria *et al.* Breeding for yield and seed quality in soybean. **Euphytica**, v. 217, n. 12, p. 212, 11 nov. 2021.

OLIVEIRA, Michelli Rodrigues De; CARVALHO, TEREZA CRISTINA DE. Qualidade fisiológica de sementes de soja oriundas de distintos estratos da planta. **Nucleus**, v. 18, n. 1, p. 371–383, 30 abr. 2021.

OLIVEIRA, Izabela Cristina De *et al.* New Proposal to Increase Soybean Seed Vigor: Collection Based on Pod Position. **Agronomy**, v. 15, n. 11, p. 2563, 6 nov. 2025.

PÁDUA, Gilda Pizzolante; VIEIRA, R. D. Deterioração de sementes de algodão durante o armazenamento. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 23, n. 2, p. 255–262, 2001.

R CORE TEAM. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2025.

REZENDE DOS ANJOS, Mônica Cristina. **Potencial fisiológico de sementes de soja resfriadas sob diferentes temperaturas**. Dissertação de mestrado—Cascavel, PR: Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2023.

SANTOS, Cassiano Vasconcelos dos *et al.* Physiological Quality of Soybean Seeds Stored in Different Periods in Dry Soil and Temperatures. **Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde**, v. 27, n. 3, p. 321–326, 2023.

SHARMA, Sucheta *et al.* Positional effects on soybean seed composition during storage. **Journal of Food Science and Technology**, v. 50, n. 2, p. 353–359, abr. 2013.

ŠIDÁK, Zbyněk. Rectangular confidence regions for the means of multivariate normal distributions. **Journal of the American Statistical Association**, v. 62, p. 626–633, 1967.

SMANIOTTO, Thaís A. de S. *et al.* Qualidade fisiológica das sementes de soja armazenadas em diferentes condições. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, p. 446–453, 2014.

SOUZA, Tiago Rodrigues *et al.* Physiological quality of conventional soybean cultivars of seeds as a function of pod position in plant canopy. **Emirates Journal of Food and Agriculture**, 2020.

SOUZA, A. D. V. *et al.* Physical and physiological soybean seed qualities stored under different environmental conditions and storage bag depths. **Brazilian Journal of Biology**, v. 83, p. e277916, 2023.

TAIZ, Lincoln; ZEIGER, Eduardo. **Plant Physiology and Development**. 5. ed. 2013.

TEIXEIRA, Gisele Carneiro da Silva; STONE, Luís Fernando; HEINEMANN, Alexandre Bryan. Eficiência do uso da radiação solar e índices morfofisiológicos em cultivares de feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, n. 1, p. 9–17, 2015.

TRIPATHI, Niraj; KHARE, Dharendra. Molecular approaches for genetic improvement of seed quality and characterization of genetic diversity in soybean: a critical review. **Biotechnology Letters**, v. 38, n. 10, p. 1645–1654, 1 out. 2016.

VASCONCELOS, Edmar Soares De *et al.* Qualidade fisiológica de sementes de cultivares e linhagens de soja no Estado de Minas Gerais. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 31, n. 2, p. 307–312, 19 maio 2009.

VERGARA, Rafael *et al.* Harvest delay, storage and physiological quality of soybean seeds. **Journal of Seed Science**, v. 41, n. 4, p. 506–513, out. 2019.

WEI, Taiyun; SIMKO, Viliam. **corrplot: Visualization of a Correlation Matrix**. [S.l.]: R Foundation for Statistical Computing, 2021.

WICKHAM, Hadley *et al.* Welcome to the Tidyverse. **Journal of Open Source Software**, v. 4, n. 43, p. 1686, 2019.

## **CONCLUSÃO GERAL**

De forma integrada, os resultados permitiram: (i) demonstrar que a qualidade fisiológica das sementes varia ao longo do dossel da planta, com magnitude dependente do genótipo e diferenças quanto à uniformidade entre os terços; (ii) verificar que ambientes de produção contrastantes influenciam o desempenho fisiológico médio das sementes, a sensibilidade ambiental dos genótipos e a uniformidade da qualidade fisiológica ao longo do dossel, evidenciando interação genótipo × ambiente; e (iii) constatar que a qualidade fisiológica das sementes reduz-se durante o armazenamento, com maior intensidade em condições sem controle higratérmico. Em conjunto, desempenho médio, uniformidade da qualidade das sementes, sensibilidade ambiental e armazenabilidade devem ser considerados simultaneamente na seleção de linhagens de soja destinadas à produção de sementes de alta qualidade.