

PRISCILA DO CARMO SANTOS

**Qualidade fisiológica de sementes de feijão-guandu após
condicionamento: germinação e tetrazólio digitalizado**

São Cristóvão – SE

Janeiro 2026



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE – UFS
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS APLICADAS – CCAA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÔNOMICA – DEA

**Qualidade fisiológica de sementes de feijão-guandu após condicionamento:
germinação e tetrazólio digitalizado**

**Monografia apresentada ao Departamento de
Engenharia Agrônômica - Universidade
Federal de Sergipe, como requisito parcial para
obtenção do título de Engenheira Agrônoma.**

APROVADO em:

ORIENTADA: PRISCILA DO CARMO SANTOS

**Profa. Dra. Renata Silva Mann
(Orientadora)**

**Me. Maria Suzana Oliveira Silva
(Banca examinadora)**

**Mestranda Ana Paula Alves Matos
(Banca examinadora)**

Dedico este trabalho, primeiramente, a Deus, por me conceder força e sabedoria para enfrentar cada desafio ao longo desta caminhada. A Ele, que guiou meus passos, fortaleceu minha fé e sustentou minha alma quando o cansaço falou mais alto. A minha mãe, que, com uma vida cheia de dificuldades e o coração repleto de esperança, semeou em mim o desejo de um futuro diferente.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, que esteve comigo em cada etapa desta caminhada. Só Ele conhece, de fato, os desafios enfrentados, os medos silenciosos, as lágrimas contidas e as inúmeras vezes em que pensei que não conseguiria seguir em frente. Quando minhas forças pareciam insuficientes, foi Ele quem me sustentou, renovou minha fé e me concedeu sabedoria para continuar, mesmo diante das dificuldades.

Foi Deus quem me guiou nos momentos de incerteza, fortaleceu meu coração nos dias mais difíceis e me lembrou, a cada passo, que desistir não era uma opção. Consagrar este trabalho a Ele é reconhecer que nada disso seria possível sem Sua presença constante em minha vida. Como reflexo dessa fé que me acompanhou durante toda a trajetória, deixo registrada a mensagem de Provérbios 16:3: “*Consagre ao Senhor tudo o que você faz, e os seus planos serão bem-sucedidos*”, versículo que traduz a esperança, a confiança e a entrega que sustentaram a realização deste sonho.

Agradeço a minha mãe, Joelma do Carmo Santos que mesmo não tendo nada, sempre me deu tudo. Que mesmo sem ter concluído os estudos, sempre acreditou no poder da educação e nunca mediu esforço para que eu pudesse trilhar esse caminho e para que eu chegasse até aqui. Que mesmo na ausência da distância sempre me amou e nunca me deixou faltar nada.

Agradeço às minhas irmãs que a vida me deu, Taisa e Thauane, por todo o acolhimento, carinho e apoio ao longo dessa caminhada. Obrigada Thauane, por ser a irmã que nunca tive, por estar ao meu lado nos momentos difíceis, pelos conselhos, pelas conversas, pelas risadas e por sempre se orgulhar de mim. Agradeço também à Vânia, que me acolheu como filha e me deu todo suporte nos momentos mais difíceis desses últimos anos, contribuindo de forma essencial para que eu pudesse realizar esse sonho. Sou imensamente grata por ter vocês.

Agradeço, de forma muito especial, às minhas amigas Maria Gabriela Gomes de Lima e Lorena Hellem Santana Carvalho, por terem sido meu verdadeiro alicerce ao longo de toda essa formação. Vocês tornaram meus dias mais leves, meus sorrisos mais frequentes e cada vivência dentro desta universidade única e inesquecível. Em meio às dificuldades, às incertezas e ao cansaço, foram vocês que estiveram ao meu lado, transformando momentos difíceis em lembranças cheias de afeto e significado. Levo vocês

comigo não apenas como amigas, mas como parte essencial da minha história, da minha formação e de quem eu me tornei.

Agradeço ao meu amor, Felipe Santana, por ter chegado à minha vida para somar e por ter sido apoio constante nesta caminhada. Obrigada por acreditar em mim, por sempre me lembrar da minha força e do quanto eu podia ir além. Seu incentivo, suas palavras de orgulho e cada gesto de cuidado foram essenciais para que eu continuasse firme e confiante. Sou grata por ter você como meu porto seguro e por todo amor e companheirismo que me ajudaram a chegar até aqui.

Também agradeço aos amigos João, Amanda, Thiago, Lucas Pinheiro, Domingos, Gabriel Costa, Maria Guiomar, Lucas Matos que fizeram parte dessa jornada, vocês foram importantes nessa trajetória, cada um trazendo consigo uma bagagem de um sonho a ser tornar realidade e tornando o percurso melhor de ser trilhado.

Agradeço também aos amigos Larissa, Soenne, Gustavo Ryan, Marcos, Vinicius, Kaic que fizeram parte da minha trajetória no pibic. Agradeço a Gustavo, Júlia e Suzana por tornarem a realização deste experimento possível. Em especial, agradeço à Suzana por todo o apoio, dedicação e disponibilidade, tanto durante a condução experimental quanto no processo de escrita deste trabalho.

Agradeço à Professora Renata por aceitar o desafio de me orientar, pelo suporte constante, pela confiança e pelas contribuições que foram fundamentais para a conclusão desta etapa tão importante da minha trajetória acadêmica. Agradeço ao Laboratório de Ensino em Tecnologia de Sementes por todo o auxílio, infraestrutura e suporte técnico oferecidos ao longo do desenvolvimento desta pesquisa.

Por fim, agradeço à Universidade Federal de Sergipe, instituição que contribuiu de forma decisiva para o meu crescimento pessoal e profissional, bem como a todos os professores que, ao longo da graduação, colaboraram para a construção do meu conhecimento e da minha formação acadêmica.

Por fim, agradeço a mim mesma pela resiliência, pela coragem de continuar mesmo nos momentos de dúvida. Hoje reconheço que cada passo foi sustentado por Deus que sempre esteve ao meu lado, mesmo nas vezes que duvidei dEle.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1. Importância do guandu na agricultura	13
2.2. Qualidade de sementes: viabilidade e vigor	14
2.3. Teste de germinação para qualidade fisiológica	14
2.4. Tratamentos pré-germinativos e efeitos sobre vigor	15
2.5. Potencial de <i>Chromobacterium subtsugae</i> na germinação de sementes	16
2.6. Testes de vigor e viabilidade e o teste de tetrazólio	17
2.7. Tecnologias de imagem e GroundEye na análise de sementes	18
3. MATERIAL E MÉTODOS	20
3.1. Delineamento experimental e tratamentos	20
3.2. Tratamento pré-germinativo	21
3.3. Teste de germinação	22
3.4. Teste de tetrazólio e digitalização	23
3.5. Análises estatísticas	25
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
5. CONCLUSÃO	47
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1. Sementes de feijão- guandu (<i>Cajanus cajan</i>) utilizadas no experimento.	20
Figura 2. Sementes separadas em saco para embebição.	21
Figura 3. Sementes em biocondicionamento com oxigenação.	22
Figura 4. Papel Germitest sendo pesado (A), montagem do teste de germinação (B).	23
Figura 5. Sementes de feijão- guandu em contato com solução de sal de tetrazólio.	24
Figura 6. Equipamento de imagem GroundEye.	25
Figura 7 Interação: tamanho das raízes secundárias vs concentração (tempo 1 vs 120); média $\pm$ EP: tamanho das raízes secundárias por concentração (tempo 1 vs 120).	29
Figura 8. Boxplot: tamanho das raízes secundárias por concentração (Tempo 1 e 120); tamanho das raízes secundárias por tempo (1 vs 120).	30
Figura 9. Tamanho das raízes secundárias por tempo (1 vs 120); QQ-plot dos resíduos (2-way) para raízes secundárias (escala original).	31
Figura 10. Interação (Box-Cox): raízes secundárias vs concentração (TEMPO 1 vs 120), Média $\pm$ EP (Box-Cox): raízes secundárias por concentração (TEMPO 1 vs 120).	31
Figura 11. Controle (0%): boxplot de raízes secundárias por tempo (0 vs 1 vs 120).	32
Figura 12. Interação: hipocótilo vs concentração (TEMPO 1 vs 120); Média $\pm$ EP: hipocótilo por concentração (TEMPO 1 vs 120).	33
Figura 13. Boxplot: hipocótilo por concentração (TEMPO 1 e 120), Boxplot: hipocótilo por tempo (1 vs 120).	34
Figura 14. QQ-plot dos resíduos (2-way) para hipocótilo, Controle (0%): boxplot de hipocótilo por tempo (0 vs 1 vs 120).	34
Figura 15. Interação: raiz primária vs concentração (TEMPO 1 vs 120), Média $\pm$ EP: raiz primária por concentração (Tempo 1 vs 120).	35
Figura 16. Boxplot: raiz primária por concentração (Tempo 1 e 120), raiz primária por tempo (1 vs 120).	36
Figura 17. QQ-plot dos resíduos (2-way) para raiz primária, Controle (0%): boxplot de raiz primária por tempo (0 vs 1 vs 120).	36
Figura 18. Interação: tamanho total vs concentração (Tempo 1 vs 120), Média $\pm$ EP: tamanho total por concentração (Tempo 1 vs 120).	37
Figura 19. Boxplot: tamanho total por concentração (Tempo 1 e 120).	38
Figura 20. Imagens das plântulas capturadas no GroundEye no tempo 1 min com diferentes concentrações da suspensão bacteriana <i>Chromobacterium subtsugae</i> : Concentração 0 % (A), Concentração 3% (v/v) (B), Concentração 5% (v/v) (C), Concentração 50% (v/v) (D).	39
Figura 21. Imagens das plântulas capturadas no GroundEye no tempo 120 min com diferentes concentrações da suspensão bacteriana <i>Chromobacterium subtsugae</i> : Concentração 0 % (A), Concentração 3% (v/v) (B), Concentração 5% (v/v) (C),	

Concentração 50% (v/v) (D).	39
Figura 22. QQ-plot dos resíduos (2-way) para tamanho total, Figura 26 - Controle (0%): boxplot de tamanho total por tempo (0 vs 1 vs 120).	40
Figura 23. Matriz de correlação (Pearson) entre variáveis de crescimento (tempos 1 e 120 min; médias por repetição).	43
Figura 24. Tetrazólio: dominância vermelha (média $\pm$ EP) em função da concentração e do tempo (T0 vs T2; n=4 por condição).	44
Figura 25. Imagem capturada pelo groundeye da semente de guandu após teste de tetrazólio na concentração 50 mL e tempo 120 minutos.	45
Figura 26. Imagem capturada pelo groundeye da semente de guandu após teste de tetrazólio na concentração 25 mL e tempo 120 minutos.	46
Figura 27. Imagem capturada pelo groundeye da semente de guandu após teste de tetrazólio com sementes submetidas ao tratamento com bioinsumos na concentração de 5% (v/v) e tempo 1 minuto.	46
Figura 28. Imagem capturada pelo groundeye da semente de guandu após teste de tetrazólio e sementes submetidas ao tratamento com bioinsumos na concentração de 10% (v/v) e tempo 1 minuto.	47

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1. Tratamentos do experimento (fatorial 2 x 4 + controle).	21
Tabela 2. Síntese dos efeitos na ANOVA fatorial (p-valores) e interpretação aplicada.	27
Tabela 3. Análises de normalidade e homogeneidade a 5% de probabilidade.	28
Tabela 4. Médias e desvios-padrão por grupo (TT, T0 e T2) em características selecionadas	40
Tabela 5. Teste t de Welch (exploratório) e tamanho de efeito em características selecionadas	41

RESUMO

Com este trabalho avaliou-se a qualidade fisiológica de sementes de feijão-guandu (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.) por teste de tetrazólio digitalizado e análise de imagens no sistema GroundEye, com o objetivo de reduzir a subjetividade da interpretação visual e associar padrões de coloração a notas de viabilidade e vigor. Adotou-se delineamento inteiramente casualizado, em esquema fatorial 2×4 , com dois tempos de embebição (1 min. e 120 min.) e quatro concentrações do bioinsumo bacteriano *Chromobacterium subtsugae* (0, 3, 5 e 10 %), além de testemunha sem embebição, totalizando 9 tratamentos com 4 repetições. As avaliações incluíram teste de germinação, teste de tetrazólio (0,075%) e extração de atributos de imagem (cor, uniformidade, área corada, forma e textura). Nos resultados preliminares (1 minuto; concentrações 0, 3 e 5 %), não foi observado efeito principal de concentração sobre os comprimentos de plântulas. A abordagem de leitura digital do tetrazólio indica potencial para padronização e maior precisão na classificação de viabilidade e vigor em sementes de guandu.

PALAVRAS-CHAVE: Condicionamento fisiológico, potencial fisiológico, análise de imagens, GroundEye, viabilidade, método bioquímico, vigor.

1. INTRODUÇÃO

O feijão-guandu (*Cajanus cajan*) é uma leguminosa de ampla adaptação e múltiplos usos, com destaque para alimentação humana e animal, cobertura do solo e adubação verde. Revisões e documentos técnicos apontam sua relevância nutricional e agrônômica, bem como sua contribuição para sistemas produtivos em ambientes com restrição hídrica, associada ao sistema radicular profundo e à rusticidade da espécie (Abebe et al., 2022; Fuller, 2019; FAO, 2011). Nesse contexto, o estabelecimento adequado da cultura e a eficiência de sistemas que utilizam o guandu dependem diretamente do uso de sementes com alta qualidade fisiológica, visto que a viabilidade e o vigor influenciam a velocidade e a uniformidade de emergência.

A qualidade fisiológica das sementes está relacionada não apenas ao potencial de germinação, mas também ao desempenho inicial das plântulas, sendo um fator determinante para a implantação de estandes uniformes (Sowjanya e Prasad, 2023). Além da avaliação do lote em condições padrão, estratégias de tratamento pré-germinativo, como o condicionamento fisiológico, têm sido estudadas por poderem alterar respostas associadas ao vigor e ao desempenho inicial, especialmente quando envolvem períodos controlados de embebição e o uso de bioinsumos. Assim, a investigação de tratamentos pré-germinativos em sementes de guandu demanda ferramentas sensíveis e consistentes para detectar alterações na viabilidade e no vigor (Reed *et al.*, 2022).

Entre os métodos de avaliação rápida da qualidade fisiológica, o teste de tetrazólio se destaca por estimar viabilidade e vigor a partir da coloração dos tecidos, refletindo atividade respiratória e integridade celular. Embora se trate de um método consolidado e amplamente empregado, a interpretação tradicional pode apresentar variação entre avaliadores, sobretudo quando os padrões de coloração são intermediários, o que pode comprometer a padronização e a comparabilidade de resultados entre análises e laboratórios (França-Neto; Krzyzanowski, 2022; Brasil, 2009). Dessa forma, um desafio central é tornar a leitura do tetrazólio menos dependente da subjetividade humana, sem perder a capacidade diagnóstica do teste.

Nesse cenário, tecnologias de captura e processamento de imagens têm se consolidado como alternativa para reduzir subjetividade, ampliar rastreabilidade e estabelecer padrões mais objetivos de classificação. Sistemas como o GroundEye, baseados em visão computacional, permitem mensurar características de cor, forma e textura, oferecendo suporte à padronização de avaliações de sementes e plântulas

(Brandani et al., 2022; Ribeiro, 2021; Tbit, 2025). Apesar desse avanço, ainda é necessário fortalecer a aplicação dessas abordagens para espécies e condições específicas, como o feijão-guandu, integrando a avaliação fisiológica clássica a métricas digitais que auxiliem a tomada de decisão sobre a qualidade do lote e o efeito de tratamentos pré-germinativos.

Diante do exposto, o objetivo geral deste trabalho foi avaliar a qualidade fisiológica de sementes de feijão-guandu por meio do teste de tetrazólio digitalizado e analisado no sistema GroundEye, comparando com os resultados obtidos na germinação inicial, visando reduzir a subjetividade da interpretação visual.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Importância do guandu na agricultura

O feijão-guandu (*Cajanus cajan*), pertencente à família Fabaceae, é uma leguminosa originária do centro da Índia e da África Tropical Ocidental. Mundialmente, o maior produtor do feijão guandu é a Índia, representando quase 90% da produção. Trata-se de uma planta arbustiva, de ciclo anual ou semiperene, capaz de se desenvolver em solos de baixa fertilidade, demonstrando grande rusticidade e adaptabilidade a diferentes condições edafoclimáticas (Filho et al., 2023).

O guandu é cultivado em regiões tropicais e subtropicais, com histórico de domesticação e ampla distribuição (Fuller, 2019). Além do uso como grão e forragem, a cultura destaca-se como adubo verde e planta de cobertura, apresentando elevada produção de massa seca e expressivo aporte de matéria orgânica ao solo. A cultura contribui para o aumento do nitrogênio total do solo em função da fixação biológica de nitrogênio, favorecendo a melhoria da fertilidade e a sustentabilidade dos sistemas de produção (Fonseca et al., 2023).

Em revisões nutricionais, o guandu é descrito como uma importante fonte proteica, apresentando teor médio de aproximadamente 26% de proteína, além de ser rico em minerais, o que o torna relevante tanto para a alimentação humana quanto animal. (Abebe et al., 2022; Haji et al., 2024; Teixeira; Silva-López, 2022). Na nutrição animal, pode ser utilizado de diferentes formas, como feno, farelo, verde picado ou em consorciação com gramíneas, apresentando elevado teor proteico e boa digestibilidade (Ribeiro, Guimarães e Dias, 2022).

O feijão-guandu também é apreciado por seu potencial farmacológico e medicinal, principalmente por ser fonte de constituintes bioativos, amplamente utilizado como planta medicinal em comunidades tradicionais, além de ser importante fonte de proteína na dieta de vários países e principalmente seu valor nutricional para o consumo popular. Além disso, têm grande importância socioeconômica devido ser um dos componentes principais na refeição humana a nível global. A leguminosa apresenta elevado teor protéico, variando aproximadamente entre 18% e 26%, além de ser fonte de fibras, vitaminas e minerais. (Teixeira; Silva-López, 2022).

2.2 Qualidade de sementes: viabilidade e vigor

A avaliação da qualidade fisiológica das sementes é essencial para garantir o bom desempenho das culturas agrícolas, sendo realizada principalmente por meio de testes que mensuram a viabilidade e o vigor das sementes. Esses parâmetros permitem prever o potencial de germinação e o desempenho inicial das plântulas em campo, importante para o controle e a tomada de decisão de lotes e no planejamento da produção (Sowjanya e Prasad, 2023).

Viabilidade se refere à capacidade de germinar sob condições favoráveis e originar plântulas normais, garantindo o início adequado do ciclo produtivo (McDonald, 1998). Esses atributos desempenham um papel essencial na produção agrícola, pois influencia diretamente o estabelecimento das plantas no campo. (FAO, 2006).

O vigor das sementes está relacionado ao seu potencial de germinar de forma rápida e uniforme, originando plântulas normais mesmo em condições ambientais variadas (McDonald, 1998). Ele representa um indicador essencial da qualidade, pois reflete a capacidade da semente em manter seu desempenho desde a produção até a semeadura, influenciando diretamente a formação de lavouras mais produtivas e consistentes. Quanto maior o vigor, menor é o processo de deterioração, garantindo melhor estabelecimento de mudas e maior eficiência agrícola (França-Neto; Krzyzanowski, 2001).

2.3 Teste de germinação para qualidade fisiológica

O teste de germinação é essencial para avaliar a qualidade das sementes, pois determina o potencial máximo de germinação de um lote. Seu objetivo principal é fornecer uma estimativa precisa de quantas sementes de um lote serão capazes de germinar e

originar plântulas normais em condições ideais. Essas informações são fundamentais para garantir que os produtores utilizem sementes de boa qualidade, favorecendo o sucesso da cultura (Calvillo-Aguilar *et al.*, 2023).

A importância desse teste está na sua capacidade de avaliar o vigor e a viabilidade das sementes, fatores que impactam diretamente o desempenho das plantas no campo. Ele permite comparar diferentes lotes de sementes, facilitando a escolha de lotes com maior capacidade de germinação e ajudando no planejamento da semeadura (Hegde *et al.*, 2025). Além disso, realizado em condições controladas de laboratório, o teste minimiza a influência de variáveis ambientais, oferecendo resultados mais confiáveis e consistentes em comparação aos testes feitos diretamente em campo (Brasil 2009).

O teste de germinação também é importante para diagnosticar problemas como dormência ou danos nas sementes, que podem impedir a germinação, e para monitorar a qualidade fisiológica ao longo do tempo, especialmente em condições de armazenamento (Reed *et al.*, 2022).

Para que uma semente seja considerada germinada, ela deve apresentar plântulas normais, com todas as estruturas essenciais bem desenvolvidas. Além disso, a uniformidade da germinação em testes laboratoriais, realizados em condições controladas, é preferível ao teste de campo, pois este último pode ser afetado por variáveis ambientais que interferem nos resultados. A identificação de plântulas normais, aquelas com pequenos defeitos ou até mesmo plântulas anormais, como danificadas ou deformadas, permite avaliar a viabilidade e o vigor de um lote de sementes, fundamentais para garantir um bom desempenho no campo (Brasil 2009).

2.4 Tratamentos pré-germinativos e efeitos sobre vigor

O condicionamento, também conhecido como processo pré-germinativo, é uma técnica que envolve a imersão das sementes em água por um período controlado, permitindo que o processo de germinação seja iniciado, mas sem que a semente chegue a germinar completamente. Esse tratamento visa otimizar a atividade metabólica das sementes, promovendo um melhor desempenho durante a germinação e o estabelecimento inicial da planta (Garai; Sabyasach, 2024).

O processo de condicionamento possui diferentes modelos, como hidrocondicionamento, condicionamento osmótico, biocondicionamento e condicionamento em matriz sólida, cada um com características específicas e benefícios distintos, que variam conforme o agente utilizado e as condições de cultivo. O hidrocondicionamento utiliza apenas água para ativar os processos metabólicos da semente, sendo uma abordagem simples e eficaz para melhorar o vigor germinativo, principalmente em condições adversas de clima e solo (Dhage *et al.*, 2020).

O biocondicionamento, por sua vez, é uma técnica que envolve a imersão das sementes junto de microrganismos benéficos, como bactérias e fungos (Dhage *et al.*, 2020). A incorporação de bioinsumos ao biocondicionamento de sementes tem sido associada à potencialização dos efeitos do condicionamento fisiológico, especialmente pela integração de interações microbianas benéficas. Microrganismos como bactérias promotoras de crescimento de plantas (PGPR) estimulam o desenvolvimento radicular, aumentam a absorção de nutrientes e contribuem para a indução de resistência a estresses bióticos e abióticos. Ao colonizarem a superfície das sementes, esses microrganismos favorecem maior vigor das plântulas e melhor estabelecimento inicial da cultura. Além disso, o uso de bioinsumos pode otimizar a eficiência na absorção de água e nutrientes, reduzindo a dependência de fertilizantes químicos no início do desenvolvimento vegetal (Jha *et al.* 2025).

2.5 Potencial de *Chromobacterium subtsugae* na germinação de sementes

As bactérias estão sendo selecionadas para tratamento de sementes, especialmente o biocondicionamento, devido suas propriedades bioestimulantes e ação biocontrole na germinação de sementes que promove o aumento do crescimento resultando em maior vigor das plantas. A expansão no uso de tem intensificado em razão das contribuições para o desempenho produtivo, a viabilidade econômica e a sustentabilidade ambiental nos sistemas produtivos (Rouphael; Colla, 2020).

Dentre os microrganismos com ação biocontrole estão a bactéria *Chromobacterium subtsugae*, conhecida principalmente por sua ação bioinseticida. Essa bactéria, tem sido promissora por possuir propriedades inseticidas e pode servir como base para a formulação de bioinsumos com alta toxicidade para uma ampla variedade de insetos, associados a

práticas agrícolas sustentáveis com a redução de fertilizantes químicos (Martins et al., 2007).

A *Chromobacterium subtsugae* utilizada para o controle biológico de pragas em culturas agrícolas diminuiu a incidência de lagartas nas folhas em comparação com outros tratamentos utilizando produtos químicos, indicando como uma alternativa sustentável e eficiência de bioinsumos a base de *Chromobacterium subtsugae* a ser aplicado também a cultura do feijão (Borges et al., 2023).

Os promotores de crescimento desempenham um papel importante na agricultura, atuando por diferentes mecanismos que variam entre as espécies. Isso inclui microrganismos epífitos e endofíticos naturalmente presentes na natureza, os quais produzem substâncias bioativas capazes de ativar o metabolismo vegetal e, consequentemente, favorecer o seu crescimento das plantas (Queiroz, 2023).

Os microrganismos como as bactérias têm a capacidade de sintetizar e liberar fitormônios essenciais tanto para o processo germinativo quanto para o desenvolvimento inicial das plantas. Entre esses fitormônios reguladores de crescimento destacam-se a giberelina, e auxina (IAA) e as citocininas, que atuam de maneira integrada na regulação da germinação, na diferenciação celular, no alongamento radicular e na formação de tecidos, favorecendo o crescimento e o estabelecimento mais vigoroso das culturas (Marques; Correa, 2025).

2.6 Testes de vigor e viabilidade e o teste de tetrazólio

O teste de tetrazólio tem como finalidade principal distinguir sementes viáveis das não viáveis. Por meio de uma avaliação detalhada, baseada nos padrões de coloração e no estado dos tecidos, torna-se possível classificar diferentes categorias dentro desses dois grupos. Esse método bioquímico é especialmente indicado para sementes recalcitrantes, dormentes ou com germinação lenta, além de permitir a detecção de danos ocasionados por fatores como secagem, ataque de insetos, excesso de umidade ou processos de colheita e beneficiamento. Sua aplicação é recomendada em situações de dormência, necessidade de semeadura imediata ou dificuldades na interpretação do teste de germinação, oferecendo resultados rápidos e confiáveis sobre a viabilidade e o vigor das sementes (Brasil, 2009).

O teste de tetrazólio avalia a viabilidade das sementes com base na atividade das enzimas desidrogenases, que reduzem o tetrazólio (TCT) nos tecidos vivos, que reage com a solução de cloreto de 2,3,5-trifenil tetrazólio, resultando em uma coloração entre um rosa claro ao vermelho intenso. Quando a semente é imersa no TCT, a reação de redução forma um composto de coloração vermelho claro, indicando atividade respiratória e viabilidade celular. Tecidos viáveis geram uma coloração vermelha clara, enquanto tecidos deteriorados apresentam um vermelho mais intenso, e tecidos não viáveis não reagem, permanecendo brancos. Esse teste permite avaliar rapidamente a viabilidade e o vigor das sementes, comparado a um teste de germinação (Neto; Krzyzanowski; Costa, 1998).

O teste de tetrazólio oferece um diagnóstico rápido ao detectar a redução do sal de tetrazólio por enzimas desidrogenases em tecidos vivos, resultando em coloração avermelhada. A interpretação leva em conta a intensidade, uniformidade e localização dos danos, permitindo estimar a viabilidade e, em alguns casos, o vigor das sementes. A digitalização e a visão computacional aprimoram o processo, tornando a avaliação mais precisa e objetiva, além de aumentar a rastreabilidade e a consistência dos resultados (Saldaña et al., 2013).

Ou seja, o teste de tetrazólio fornece diagnóstico rápido por meio da redução do sal de tetrazólio por enzimas desidrogenases em tecidos vivos, resultando em coloração avermelhada. A interpretação considera intensidade, uniformidade e localização de danos em regiões vitais do embrião, permitindo estimar viabilidade e, em alguns protocolos, vigor. A digitalização e a aplicação de visão computacional podem aprimorar ainda mais esse processo, ao reduzir a variação entre avaliadores humanos, garantindo uma avaliação mais precisa e objetiva. Além disso, essas tecnologias aumentam a rastreabilidade do processo, permitindo um monitoramento mais detalhado e uma análise mais consistente dos resultados, o que é especialmente importante para garantir a qualidade e a confiabilidade dos testes realizados (Saldaña *et. al.*, 2013).

2.7 Tecnologias de imagem e GroundEye na análise de sementes

A utilização de sistema de software tem sido muito expressivo para análise de imagens de sementes e plântulas para avaliação de vigor, já que permite a medição precisa e rápida identificação de diferença de vigor entre lotes de sementes ou crescimento de plântulas, já que é um processo que se destaca pela redução de tempo necessário para

análise, sendo assim mais rápida e objetiva que os métodos tradicionais evitando assim variações nos resultados devido a interpretação humana (Filho *et. al.*, 2009).

O GroundEye® é um equipamento desenvolvido pela Tbit Tecnologias e Sistemas, composto por um módulo de captação de imagens e um software de análise integrado. Esse sistema permite a captura de imagens de sementes e plântulas, proporcionando uma análise visual detalhada e precisa do objeto de estudo a ser avaliado. O sistema realiza capturas de imagens de alta resolução em que durante a análise são extraídas características das sementes como cor, textura e geometria, além de danos causados por insetos. O GroundEye® disponibiliza resultados individualmente ou em porcentagem e fornece índices de vigor (Manual GroundEye®, 2016).

O equipamento, possui um sistema de análise de imagens composto por uma esteira transportadora acoplada a uma câmara de captação, operando em conjunto com o software GE. O processamento digital das imagens segue quatro etapas principais: etapa 1- captura da imagem; etapa 2- pré-processamento; etapa 3- segmentação; e etapa 4- análise (Andriazzi *et al.*, 2020).

A análise detalhada da estrutura de organismos biológicos e de seus componentes apresenta elevado potencial de impacto para o avanço das pesquisas na área das ciências biológica e agrícola. No contexto agrícola, essa tecnologia apresenta-se particularmente significativa, ao fornecer subsídios para o desenvolvimento de metodologia de classificação de imagens para a identificação precoce de anomalias que passariam despercebidas e demais aplicações voltadas ao monitoramento e à otimização de processos produtivos (Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018).

A utilização da análise de imagens na seleção de sementes tem se mostrado uma ferramenta eficaz, sobretudo por permitir a automação e padronização das etapas de caracterização biométrica das sementes, uma vez que quando feito manualmente, geralmente trata-se de lotes com centenas de sementes que torna um trabalho extenso e suscetíveis a erros humanos. Essa abordagem possibilita a avaliação simultânea de múltiplas repetições e variáveis fenotípicas e de qualidade das sementes de forma precisa e objetiva, que contribui significativamente para a identificação de características morfológicas que podem influenciar na produtividade (A. Loddo; Loddo, Di Ruberto, 2021).

3. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Laboratório de Ensino em Tecnologia de Sementes (LENTES), no Departamento de Engenharia Agrônômica (DEA) da Universidade Federal de Sergipe (UFS), em São Cristóvão-SE (10°55'S, 37°11'W).

A metodologia adotada seguiu rigorosamente as especificações técnicas descritas nas Regras para Análise de Sementes-RAS (Brasil, 2009), bem como protocolos específicos para a condução de testes de germinação e tetrazólio em leguminosas. Para o experimento foram utilizadas sementes comerciais de feijão-guandu (cv. Caqui/Fava Larga), provenientes de um único lote, safra de 2024, armazenadas em local com temperatura ambiente. As sementes foram inspecionadas visualmente e selecionadas com base em critérios de uniformidade para sementes com aproximadamente 5 mm de diâmetro, forma arredondada e superfície lisa (Figura 1).



Figura 1. Sementes de feijão- guandu (*Cajanus cajan*) utilizadas no experimento.
Fonte: Acervo da autora, 2026.

3.1 Delineamento experimental e tratamentos

O Delineamento experimental utilizado foi inteiramente casualizado (DIC), em esquema fatorial 2 x 4, sendo o primeiro fator constituído por dois tempos de duração da embebição (T0 = 1 minuto; T2 = 120 minutos); o segundo fator correspondente a quatro volume 0, 15, 25 e 50 mL do bioinsumo contendo a bactéria *Chromobacterium subtsugae* em 500 mL de água destilada, representando uma concentração de 0, 3, 5 e 10 % (v/v),

respectivamente. Adicionalmente, um tratamento controle sem embebição e aplicação do bioinsumo. Sendo assim, foram avaliados nove tratamentos com quatro repetições, formando 36 unidades experimentais (Tabela 1).

Tabela 1. Tratamentos do experimento (fatorial 2 x 4 + controle).

Tratamento	Tempo (min.)	Concentração % (v/v)	Descrição
T0C0	1	0	Condicionamento/ Biocondicionamento
T0C3	1	3	
T0C5	1	5	
T0C10	1	10	
T2C0	120	0	
T2C3	120	3	
T2C5	120	5	
T2C10	120	10	
TT	Sem embebição	0	Controle

Fonte: Dados elaborados pela autora, 2026.

3.2 Tratamento pré-germinativo

Os tratamentos pré-germinativos consistiram em duas abordagens distintas, porém simultâneas. No condicionamento fisiológico (Hidrocondicionamento), as sementes foram acondicionadas em sacos confeccionados com tecido poroso e submetidas à embebição controlada em água destilada, mantida sob oxigenação contínua, em recipientes do tipo aquário.



Figura 2. Sementes separadas em saco para embebição.

Fonte: Acervo da autora, 2026.

Para o biocondicionamento, as sementes foram tratadas com uma solução contendo diferentes concentrações de suspensão bacteriana *Chromobacterium subtsugae* (0, 3, 5 e 10 % (v/v), sendo essas soluções utilizadas para o tratamento das sementes no processo de imersão, como parte da abordagem biológica. Dessa forma, no hidrocondicionamento, a água destilada foi utilizada sem a presença das bactérias, enquanto no biocondicionamento, as sementes foram imersas na solução contendo as concentrações específicas da suspensão bacteriana. Ambos os tratamentos foram realizados nas sementes durante os tempos

experimentais de 1 minuto e 120 minutos. Após o tempo de imersão estabelecido para cada tratamento, as sementes foram retiradas, escorridas e imediatamente direcionadas para a execução dos testes fisiológicos de qualidade, que compreenderam o teste de germinação e o teste de tetrazólio (Figura 3).



Figura 3. Sementes em biocondicionamento com oxigenação.
Fonte: Acervo da autora, 2026.

3.3 Teste de germinação

O teste de germinação foi conduzido seguindo as recomendações descritas nas Regras para Análise de Sementes - RAS (BRASIL, 2009) para a espécie feijão-guandu, com adaptações específicas para o lote utilizado. Foram utilizadas quatro repetições de 25 sementes, totalizando 100 sementes por tratamento. Embora o procedimento padrão preveja a desinfestação das sementes com solução de hipoclorito de sódio por um minuto, essa etapa foi omitida, uma vez que as sementes já haviam recebido tratamento prévio.

Para a instalação do teste, as sementes foram dispostas de forma intercalada, em cinco fileiras de cinco sementes, em folhas de papel *germitest* previamente umedecidas com água destilada 2,5 vezes a massa dos papéis, a massa das nove folhas utilizadas foi de 64,9 g, resultando na necessidade de 163 mL de água destilada, medida em proveta e distribuída uniformemente sobre os papéis *germitest* (Figura 4). Ao todo, foram utilizadas nove folhas de papel para cada tratamento, sendo duas folhas destinadas a cada repetição, para cobrir as sementes na parte superior e inferior, e uma folha adicional utilizada para envolver todo o conjunto de repetições em cada tratamento. As repetições foram identificadas, sendo repetição (R) e tratamento (T).

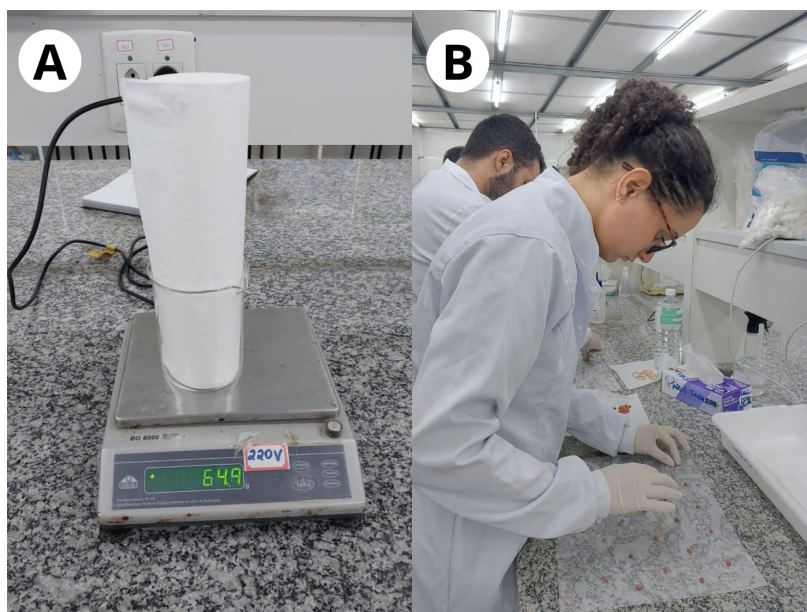


Figura 4. Papel *Germitest* sendo pesado (A), montagem do teste de germinação (B).
Fonte: Acervo da autora, 2026.

Após a distribuição, as sementes foram cobertas com a segunda folha de papel correspondente à repetição, e os conjuntos foram enrolados cuidadosamente para formar rolos compactos, fixados nas extremidades com elásticos. Os quatro rolos resultantes foram agrupados e envolvidos pela folha de papel *germitest* adicional, garantindo maior proteção e manutenção da umidade, e posteriormente acondicionados em bolsas plásticas vedadas com fita adesiva.

O material foi então colocado em câmara de germinação do tipo BOD, regulada a 25°C, onde permaneceu pelo período de condução do teste. As avaliações foram realizadas em dois momentos: a primeira contagem ao quarto dia e a segunda contagem ao décimo dia após a instalação, contabilizando-se as plântulas normais, plântulas anormais, sementes mortas e sementes duras, conforme os critérios estabelecidos pela RAS (BRASIL, 2009).

3.4 Teste de tetrazólio e digitalização

O teste de tetrazólio foi conduzido em conformidade com as Regras para Análise de Sementes - RAS (BRASIL, 2009), seguindo os padrões estabelecidos para avaliação de viabilidade e vigor de sementes de feijão-guandu. Para isso, foram utilizadas 50 sementes para cada tratamento e para a testemunha, totalizando 450 sementes. As sementes foram

selecionadas com base na uniformidade em tamanho e aparência, garantindo a homogeneidade entre os tratamentos e a testemunha.

Inicialmente o procedimento foi realizado em duas etapas. A primeira consistiu na embebição das sementes em água destilada por 18 horas, a $25 \pm 2^\circ\text{C}$, sendo estas acondicionadas entre duas folhas de papel germitest umedecidas, de modo a favorecer a hidratação uniforme e a ativação do metabolismo. Após a embebição, as sementes foram submetidas aos respectivos tratamentos pré-germinativos (hidrocondicionamento e biocondicionamento, descritos anteriormente), e então cortadas longitudinalmente no sentido do eixo embrionário para expor os cotilédones e demais estruturas internas.

A segunda etapa correspondeu à coloração pela solução de tetrazólio a 0,075%, na qual as sementes permaneceram imersas por 24 horas, em recipientes opacos, a temperatura controlada de $30 \pm 1^\circ\text{C}$ em B.O.D.

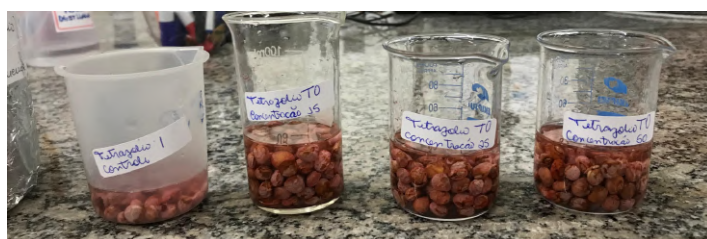


Figura 5. Sementes de feijão- guandu em contato com solução de sal de tetrazólio.
Fonte: Acervo da autora, 2026

Após o período de contato com a solução de tetrazólio, a semente foi removida com o auxílio de peneiras e os cotilédones foram separados, totalizando cem partes de cada tratamento. A partir disso, cinquenta cotilédones foram selecionados e dispostos no equipamento GroundEye, para obtenção da imagem e dados para análise estatística.

As plântulas (5 plântulas/repetições/tratamentos) e sementes analisadas no tetrazólio foram submetidas à análise de imagens no equipamento GroundEye, disponível no Laboratório de Sementes. Por meio da captura de imagens em alta resolução, fornecendo dados precisos e em tempo real. Para isto, as plântulas e as sementes foram dispostas em uma bandeja de fundo azul e acrílico transparente, organizados a uma distância mínima de 1 cm entre si, e analisados sob calibração no modelo HSV (matiz de 202,5 a 263, saturação de 0,0 a 1,0 e brilho de 0,0 a 1,0) (Figura 6).



Figura 6. Equipamento de imagem GroundEye.
Fonte: Tbit.com.br

Os dados resultantes da análise de imagens foram salvos em arquivo para posterior análise estatística de correlação, possibilitando a interpretação objetiva dos resultados quanto à viabilidade e ao vigor das sementes, com base na intensidade e uniformidade da coloração vermelha dos tecidos. A correlação entre as imagens do teste de tetrazólio e o vigor da germinação foi avaliada para estabelecer padrões de coloração e, assim, desenvolver uma escala visual para a avaliação da integridade das estruturas embriônicas.

Os dados obtidos dos testes foram anotados e submetidos à análise de variância, com as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, utilizando o programa SISVAR. Além disso, foi realizada a análise de correlação de Pearson entre as imagens do teste de tetrazólio e o vigor da germinação para validar os padrões de coloração.

3.5 Análises estatísticas

Os dados foram organizados em planilha eletrônica e analisados considerando como unidade experimental a repetição ($n = 4$ por combinação de tratamentos). Em cada repetição foram separadas cinco plântulas, e para evitar falsa repetição foi utilizada a média das cinco plântulas por repetição.

As variáveis analisadas (em cm) foram: tamanho das raízes secundárias, tamanho do hipocótilo, tamanho da raiz primária e tamanho total. Os fatores experimentais foram tempo de imersão/exposição (min) e concentração (%). Como o nível tempo = 0 min ocorreu apenas no controle (0%), a análise foi conduzida em dois blocos:

1. ANOVA fatorial 2×4 , considerando Tempo = 1 vs 120 min e Concentração = 0, 3, 5 e 10 % (v/v), incluindo o termo de interação (Tempo $\times$ Concentração).
2. Análise específica do controle, comparando os tempos 0, 1 e 120 min.

Os modelos foram ajustados por modelo linear (OLS) e submetidos à ANAVA tipo II para avaliação dos efeitos principais e da interação. A significância foi avaliada ao nível de 5% ($\alpha = 0,05$). Quando a ANAVA indicou efeito significativo de concentração, as médias foram comparadas por pós-teste de Tukey com controle de erro do tipo I.

Os pressupostos do modelo foram avaliados por:

- (i) normalidade dos resíduos, por teste de Shapiro-Wilk e inspeção visual por QQ-plot; e
- (ii) homogeneidade de variâncias, por teste de Levene.

Para a variável raízes secundárias, observou-se assimetria e valores extremos na escala original; por isso, antes da inferência foi aplicada transformação Box-Cox e a ANAVA foi conduzida na escala transformada, com reavaliação dos resíduos após a transformação. Quando houve indicação de violações dos pressupostos, os resultados foram interpretados com cautela e complementados por análises exploratórias por testes não paramétricos quando aplicável.

Os resultados foram apresentados por médias $\pm$ erro-padrão e por boxplots, além de gráficos de interação entre fatores. Os diagnósticos de resíduos (QQ-plots) foram utilizados para apoiar a adequação dos modelos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como o nível TEMPO=0 min ocorreu apenas no controle (0%), a análise foi conduzida em dois blocos: (i) ANOVA fatorial 2×4 considerando TEMPO = 1 vs 120 min e concentrações = 0, 3, 5 e 10%; e (ii) análise no controle (0%) comparando tempo=0, 1 e 120 min.

Tabela 2. Síntese dos efeitos na ANOVA fatorial (p-valores) e interpretação aplicada.

Variável	Tempo	Conc. (P)	Interação (P)	Observação Aplicada
Raízes secundárias (Box-Cox)	0,134	0,467	0,450	Sem efeitos consistentes; na escala original houve alta variabilidade e outliers.
Hipocótilo	0,002	0,009	0,255	120 min > 1 min; 10% superior a 3% (Tukey).
Raiz primária	0,487	0,174	0,280	Sem efeito detectável no intervalo de tempo e concentrações testadas.
Tamanho total	0,476	0,040	0,508	Efeito de concentração; 10% superior a 3% (Tukey).

Fonte: Dados elaborados pela autora, 2026.

Observou-se que as respostas mais consistentes aos tratamentos ocorreram em hipocótilo quando correlacionado com tempo e concentração e no tamanho total com relacionado a concentração. Raiz primária e raízes secundárias não apresentaram efeitos estatisticamente detectáveis na comparação tempo=1 vs 120 min, sendo que, para raízes secundárias, a inferência foi feita na escala transformada (Box-Cox) devido a violações de pressupostos na escala original.

Os tratamentos pré-germinativos, como condicionamento e exposição a soluções, não promovem respostas imediatas no crescimento das plântulas, uma vez que seus efeitos dependem da ativação progressiva do metabolismo e da retomada dos processos de alongação celular, os benefícios desses tratamentos tornam-se evidentes apenas após determinado período de exposição (Paparella *et. al.* 2015). O tempo de hidratação das sementes é um fator crítico para a modulação das respostas fisiológicas associadas à germinação e ao crescimento inicial. A ativação de mecanismos relacionados à expansão celular e ao alongamento dos tecidos ocorre somente após um período mínimo de exposição à água ou a soluções como bioinsumos (Bradford, 1986). Esse conceito sustenta os resultados observados neste estudo, nos quais o aumento do tempo de exposição para 120 minutos resultou em maior crescimento das estruturas da plântula, enquanto tempos curtos não foram suficientes para promover alterações morfológicas consistentes.

Na Tabela 3 apresenta-se os p-valores dos efeitos, bem como diagnósticos de pressupostos (Shapiro-Wilk para normalidade dos resíduos e Levene para homogeneidade).

Quando os pressupostos foram violados ($p < 0,05$), os resultados foram interpretados como exploratórios e contrastados com teste de Kruskal-Wallis.

Tabela 3. Análises de normalidade e homogeneidade a 5% de probabilidade.

Variável	p (Conc.)	p (Repet.)	p (Inter.)	p Shapiro	p Levene	p Kruskal
Tamanho raízes secundárias	0,2735	0,3010	0,3831	3,33e-14	0,3233	0,6449
Tamanho do hipocótilo	0,2877	0,2609	0,00323	0,0321	0,00152	0,9251
Tamanho da raiz primária	0,0938	0,0219	0,4394	0,9380	0,6644	0,05137
Tamanho total	0,1486	0,1031	0,0267	0,7288	0,8555	0,1614

Fonte: Dados elaborados pela autora, 2026.

De modo geral, no tempo inicial (1 minuto) não se observou efeito principal de concentração para as variáveis de comprimento ($p > 0,05$). Entretanto, houve sinais de violações de pressupostos, especialmente para raízes secundárias (não normalidade acentuada dos resíduos) e para hipocótilo (heterocedasticidade pelo teste de Levene). Além disso, a interação concentração×repetição foi significativa para hipocótilo e para o comprimento total, indicando que a resposta às concentrações variou entre repetições, possivelmente por variação experimental (microambiente, umidade do papel, posicionamento/incubação ou diferenças entre lotes). Assim, os resultados de T0 devem ser interpretados como exploratórios, priorizando-se as conclusões do modelo fatorial (tempo 1 vs 120 × concentração) e as comparações robustas.

Conforme descrito por Taiz et al. (2017), os estímulos externos aplicados às plantas necessitam de um intervalo de tempo para serem percebidos e convertidos em respostas fisiológicas, de modo que alterações visíveis no crescimento ocorrem apenas em etapas posteriores do desenvolvimento. Além disso, nas fases iniciais da germinação predominam processos como a absorção de água e a ativação metabólica, que ainda não resultam em aumento mensurável do comprimento das estruturas da plântula, justificando a ausência de diferenças entre as concentrações avaliadas nesse momento inicial.

As estruturas secundárias das plântulas apresentam elevada variabilidade morfológica, especialmente nas fases iniciais do desenvolvimento, o que pode comprometer a normalidade dos dados e dificultar a detecção de efeitos estatísticos (Abud et al., 2018). Esse comportamento corrobora os resultados apresentados na Tabela 3, na qual se observou alta dispersão dos dados e presença de outliers na escala original,

justificando a aplicação da transformação Box-Cox e a necessidade de interpretação cautelosa dos resultados.

Nesse sentido, diversos estudos relatam que variáveis associadas à arquitetura do sistema radicular, particularmente aquelas relacionadas à formação de raízes secundárias, tendem a apresentar elevada variabilidade biológica e metodológica, resultando em altos coeficientes de variação. Essa característica reduz o poder dos testes estatísticos convencionais e, frequentemente, demanda o uso de abordagens analíticas mais robustas para uma interpretação adequada dos resultados (Lynch, 1995; Fitter et al., 2002; Atkinson et al., 2014). Tal comportamento foi igualmente observado na Figura 10, na qual, mesmo após a correção dos pressupostos por meio da transformação Box-Cox, não foram detectados efeitos significativos de tempo ou concentração para raízes secundárias, reforçando o caráter exploratório dessas análises.

Para raízes secundárias, na escala original, observou-se elevada variabilidade e presença de valores extremos, especialmente no controle e em alguns tratamentos, o que distorce medidas de tendência central e compromete a normalidade dos resíduos (Figura 7). Por esse motivo, a inferência foi conduzida após transformação Box-Cox ($\lambda=-0,4746$). Na escala transformada, os resíduos apresentaram melhor aderência à normalidade (Figura 8) e não foram detectados efeitos significativos de tempo, concentração ou da interação ($p>0,05$).

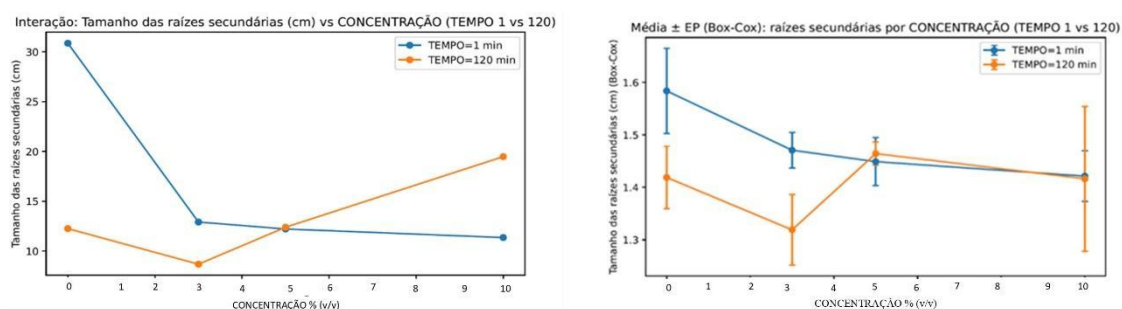


Figura 7 Interação: tamanho das raízes secundárias vs concentração (tempo 1 vs 120); média $\pm$ EP: tamanho das raízes secundárias por concentração (tempo 1 vs 120).
Fonte: Dados elaborado pela autora, 2026.

A Figura 7 apresenta a interação entre o tamanho das raízes secundárias e a concentração, comparando os efeitos para dois tempos de exposição: 1 minuto e 120 minutos. O gráfico de interação mostra que, enquanto o tamanho das raízes secundárias

diminui à medida que a concentração aumenta no tratamento de 1 minuto, para o tempo de 120 minutos, observou-se um aumento no tamanho das raízes com o aumento da concentração, sugerindo que um tempo maior de exposição pode ter estimulado o crescimento das raízes. O gráfico com a média $\pm$ erro padrão (EP) corrobora essa tendência, mostrando que o tamanho das raízes foi significativamente maior para 120 minutos em comparação a 1 minuto, especialmente nas concentrações mais altas. Esses resultados indicam que tanto a concentração quanto o tempo de exposição influenciam de maneira distinta o desenvolvimento das raízes secundárias, com o tempo prolongado de exposição favorecendo o crescimento radicular.

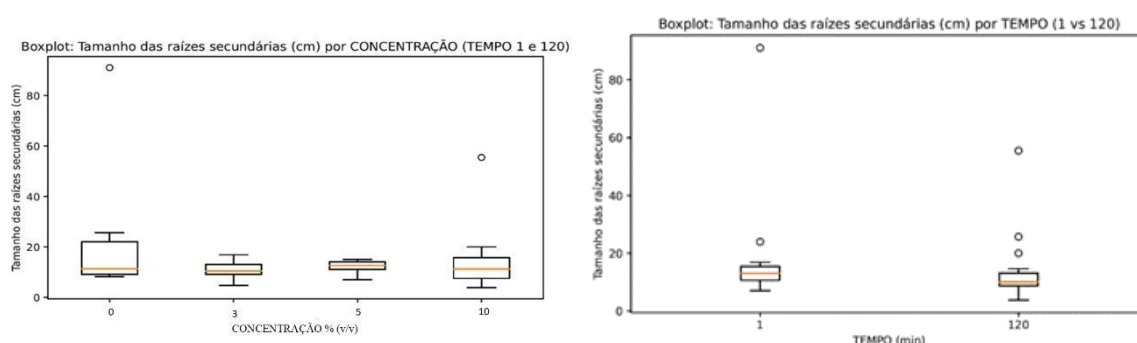


Figura 8. Boxplot: tamanho das raízes secundárias por concentração (Tempo 1 e 120); tamanho das raízes secundárias por tempo (1 vs 120).

Fonte: Dados elaborado pela autora, 2026.

Os gráficos apresentados (Figura 8) mostram a interação entre o tamanho das raízes secundárias e as variáveis concentração e tempo de exposição. Em relação às concentrações, observa-se que as medianas permaneceram relativamente próximas entre os tratamentos, variando aproximadamente entre 10 e 14 cm. A concentração 0% apresentou mediana em torno de 11–12 cm, com maior dispersão dos dados e presença de um valor discrepante superior próximo de 90 cm. Na concentração de 3%, a mediana situou-se próxima de 11 cm, com valores variando aproximadamente de 5 a 17 cm. Para 5%, a mediana foi ligeiramente superior, em torno de 13 cm, com menor amplitude interquartilica. Já na concentração de 10%, a mediana ficou próxima de 12 cm, com maior variabilidade e presença de outlier em torno de 55 cm. Quanto ao fator tempo, no Tempo 1 minuto a mediana foi aproximadamente 13 cm, enquanto no Tempo 120 minutos foi levemente inferior, cerca de 10–11 cm, embora ambos apresentem amplitudes semelhantes e valores discrepantes elevados (aproximadamente 90 cm no Tempo 1 e 55 cm no Tempo 120).

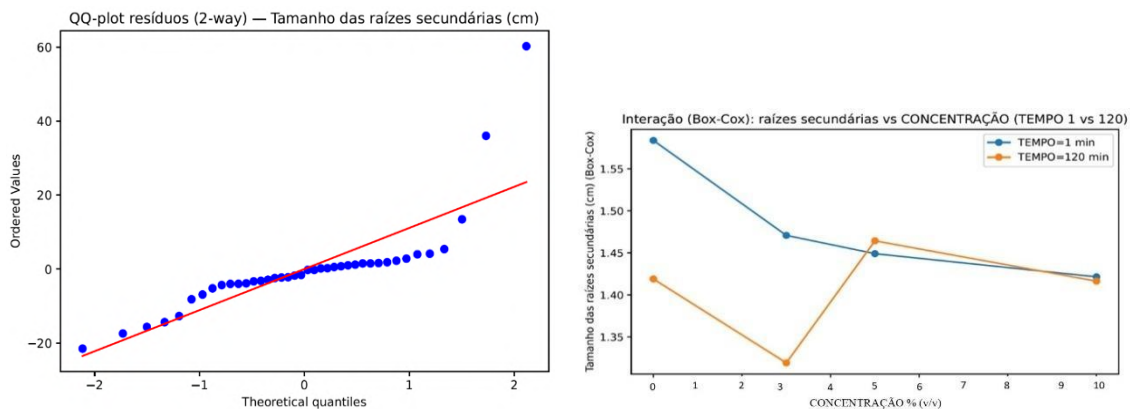


Figura 9. Tamanho das raízes secundárias por tempo (1 vs 120); QQ-plot dos resíduos (2-way) para raízes secundárias (escala original).
Fonte: Dados elaborado pela autora, 2026.

A Figura 9 apresenta o QQ-plot dos resíduos e a interação Box-Cox entre o tamanho das raízes secundárias, concentração e tempo de exposição. O QQ-plot revela que, embora a maior parte dos resíduos esteja próxima de uma distribuição normal, há alguns desvios, sugerindo que a normalidade dos dados pode não ser totalmente atendida. Para corrigir isso, foi aplicada a transformação Box-Cox, que ajustou os dados, permitindo uma análise mais precisa. O gráfico de interação mostra que, após a transformação, os efeitos do tempo de 120 minutos e da concentração no crescimento das raízes secundárias se apresentam de forma distinta em comparação ao tempo de 1 minuto, confirmando que o tempo de exposição prolongado tem um efeito positivo no crescimento das raízes.

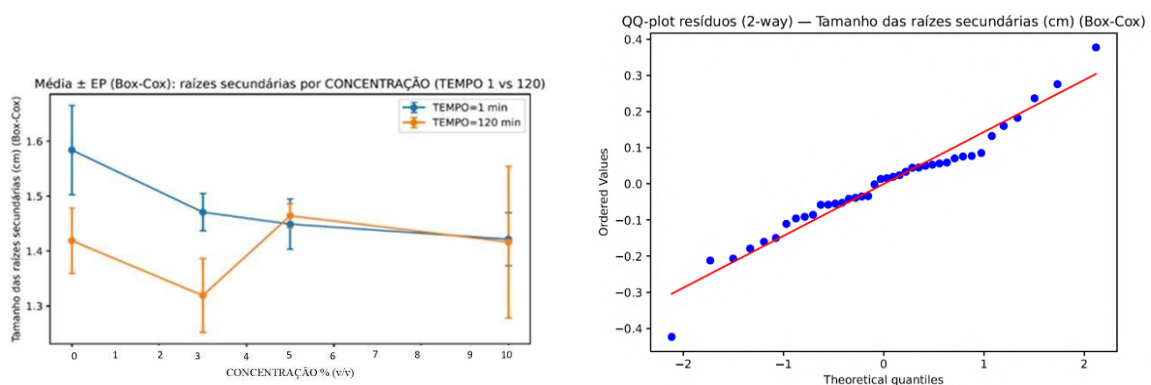


Figura 10. Interação (Box-Cox): raízes secundárias vs concentração (TEMPO 1 vs 120), Média $\pm$ EP (Box-Cox): raízes secundárias por concentração (TEMPO 1 vs 120).
Fonte: Dados elaborado pela autora, 2026.

A Figura 10 apresenta a interação entre o tamanho das raízes secundárias e a concentração, após a transformação Box-Cox, para os tempos de 1 minuto e 120 minutos. A análise mostra que, enquanto para 1 minuto o crescimento das raízes diminui com o

aumento da concentração, para 120 minutos, o crescimento das raízes aumenta significativamente com a concentração. O QQ-plot dos resíduos também confirmou que, após a transformação, os dados seguem uma distribuição normal, o que válida a eficácia da correção realizada e reforça a confiabilidade dos resultados obtidos.

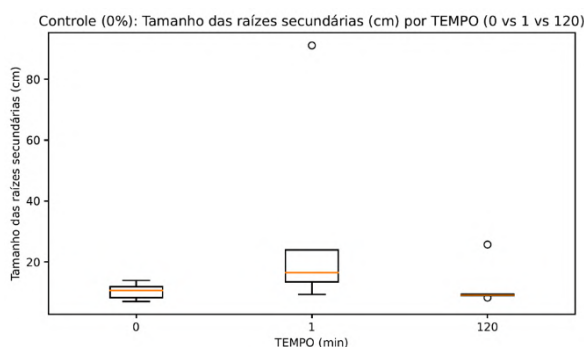


Figura 11. Controle (0%): boxplot de raízes secundárias por tempo (0 vs 1 vs 120).
Fonte: Dados elaborado pela autora, 2026.

A Figura 11 mostra a interação entre o tamanho das raízes secundárias e o tempo de exposição (0, 1 e 120 minutos) no controle (0%). Para 0 minutos (controle), as raízes apresentaram crescimento baixo e homogêneo, enquanto após 1 minuto de exposição, houve um leve aumento, mas com maior variabilidade e presença de outliers. Após 120 minutos, o tamanho das raízes aumentou significativamente, indicando que o tempo prolongado favoreceu o crescimento, embora com maior dispersão nos dados. Esses resultados sugerem que o tempo de exposição tem um efeito positivo no crescimento das raízes, mas com variabilidade significativa.

Para hipocótilo, houve efeito significativo de TEMPO (120 min > 1 min) e de concentração ($p < 0,05$), sem interação significativa. O pós-teste de Tukey indicou diferença entre 10 % (v/v) e 3% (v/v), sendo 10% (v/v) superior. Visualmente, as curvas não se cruzam de forma marcante e a separação entre tempos é relativamente consistente ao longo das concentrações (Figuras 13).

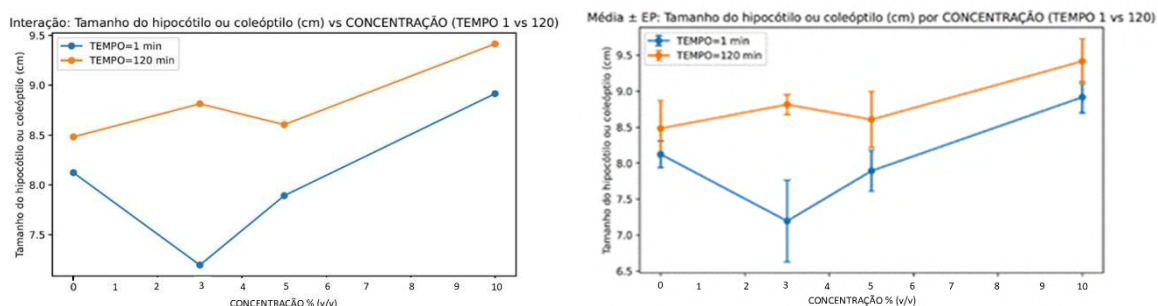


Figura 12. Interação: hipocótilo vs concentração (TEMPO 1 vs 120); Média $\pm$ EP: hipocótilo por concentração (TEMPO 1 vs 120).

Fonte: Dados elaborado pela autora, 2026.

Na Figura 12, a análise da interação entre o tamanho do hipocótilo e a concentração nos diferentes tempos de exposição (1 minuto e 120 minutos) mostrou um efeito significativo do tempo ($p < 0,05$), com o tempo de 120 minutos resultando em um aumento considerável no crescimento do hipocótilo, especialmente nas concentrações mais altas. O gráfico de interação revela que, enquanto no tempo de 1 minuto, o aumento da concentração resultou em redução no tamanho das raízes, no tempo de 120 minutos, o crescimento foi proporcional ao aumento da concentração, indicando que o tempo mais longo de exposição tem um efeito positivo e consistente no crescimento do hipocótilo. Essa tendência foi corroborada pelos pós-testes de Tukey, que indicaram que as concentrações de 10% (v/v) e 3% (v/v) foram as que apresentaram as maiores diferenças no crescimento.

No gráfico de média $\pm$ erro padrão (EP) da Figura 12, a diferença no crescimento do hipocótilo entre os tempos de exposição é ainda mais evidente. Para 120 minutos, o tamanho das raízes aumentou com a concentração, especialmente nas concentrações mais altas, enquanto para 1 minuto, o crescimento foi mais uniforme e com menores variações. Isso confirma que o tempo prolongado favorece um crescimento mais expressivo das raízes, o que sugere que 120 minutos é o tempo ideal para maximizar o crescimento do hipocótilo sob as condições experimentais avaliadas.

Os boxplots da Figura 13 também reforçam essas observações, mostrando uma maior dispersão e crescimento para o tempo de 120 minutos, particularmente nas concentrações mais altas. A distribuição do tamanho das raízes foi mais ampla para o tempo prolongado, com algumas observações indicativas de outliers, sugerindo variações no crescimento. O tempo de 1 minuto apresentou uma menor variabilidade, com valores mais concentrados e uma mediana menor para o tamanho das raízes. Esses resultados

reforçam que o tempo de exposição tem um impacto substancial no crescimento do hipocótilo, sendo o tempo de 120 minutos mais eficaz para promover o desenvolvimento das raízes secundárias.

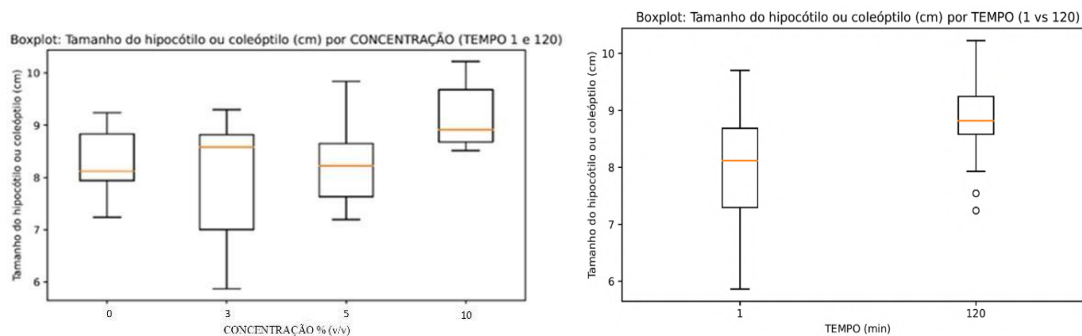


Figura 13. Boxplot: hipocótilo por concentração (TEMPO 1 e 120), Boxplot: hipocótilo por tempo (1 vs 120).

Fonte: Dados elaborado pela autora, 2026.

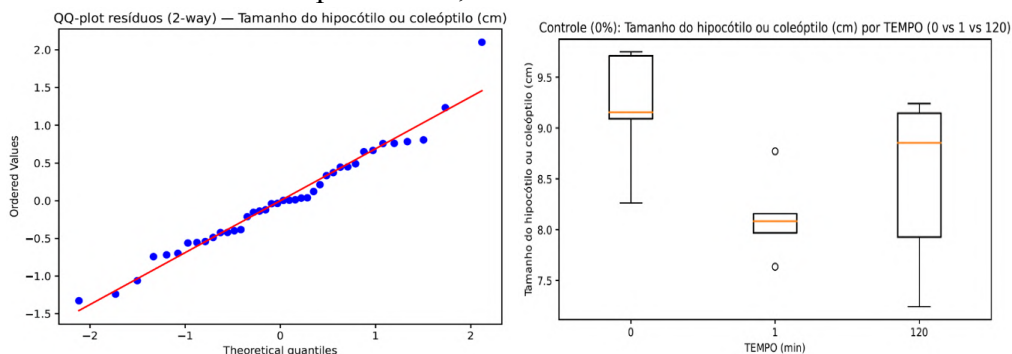


Figura 14. QQ-plot dos resíduos (2-way) para hipocótilo, Controle (0%): boxplot de hipocótilo por tempo (0 vs 1 vs 120).

Fonte: Dados elaborado pela autora, 2026.

A Figura 14 apresenta o QQ-plot dos resíduos e o boxplot para o tamanho do hipocótilo no controle (0%), em diferentes tempos de exposição (0, 1 e 120 minutos). O QQ-plot confirma que os dados seguem uma distribuição normal, indicando a eficácia da transformação aplicada. O boxplot revela que, embora o tamanho das raízes no controle imediato (0 minutos) seja pequeno e homogêneo, o tempo de 120 minutos favoreceu o crescimento, com aumento no tamanho do hipocótilo, embora com maior variabilidade nos dados, evidenciada pelos outliers. Esses resultados indicam que o tempo prolongado de exposição tem um efeito positivo no crescimento, mas com variações significativas entre as amostras.

Durante os estágios iniciais do desenvolvimento das plântulas, o eixo aéreo, representado pelo hipocótilo, tende a responder de forma mais rápida e sensível aos

estímulos ambientais do que o sistema radicular (Marcos-Filho, 2015). Essa maior sensibilidade está relacionada à prioridade fisiológica do estabelecimento da parte aérea. Tal abordagem explica por que, a partir dos dados observados (Figura 12 a 14), o hipocótilo apresentou efeitos significativos de tempo e concentração, enquanto a raiz primária não respondeu de forma estatisticamente consistente aos tratamentos avaliados.

Para raiz primária, não foram detectados efeitos significativos de Tempo, Concentração ou interação ($p > 0,05$), embora os gráficos surgiram variações pontuais e até cruzamento entre linhas (Figura 14), a sobreposição das barras de erro e das distribuições indica que as diferenças são pequenas frente à variabilidade (Figuras 15 a 17).

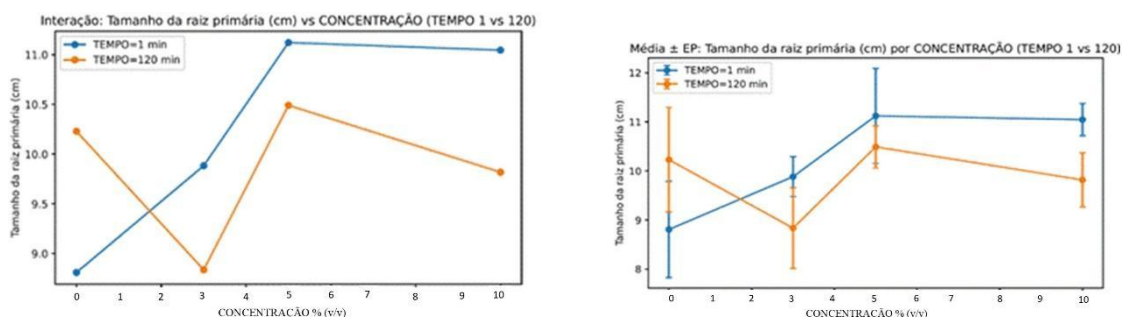


Figura 15. Interação: raiz primária vs concentração (TEMPO 1 vs 120), Média $\pm$ EP: raiz primária por concentração (Tempo 1 vs 120).
Fonte: Dados elaborado pela autora, 2026.

A Figura 15 ilustra a interação entre o tamanho da raiz primária e a concentração, com tempos de exposição de 1 minuto e 120 minutos. Embora o gráfico de interação mostra uma tendência de aumento do tamanho das raízes após 120 minutos, em comparação com 1 minuto, os testes estatísticos não indicaram efeitos significativos de tempo, concentração ou interação ($p > 0,05$). As barras de erro amplas e a variabilidade dos dados indicam que as diferenças observadas são pequenas em relação à dispersão natural dos dados, sugerindo que, embora visíveis, as variações no crescimento das raízes primárias não são suficientemente consistentes para gerar conclusões definitivas sobre os efeitos das variáveis.

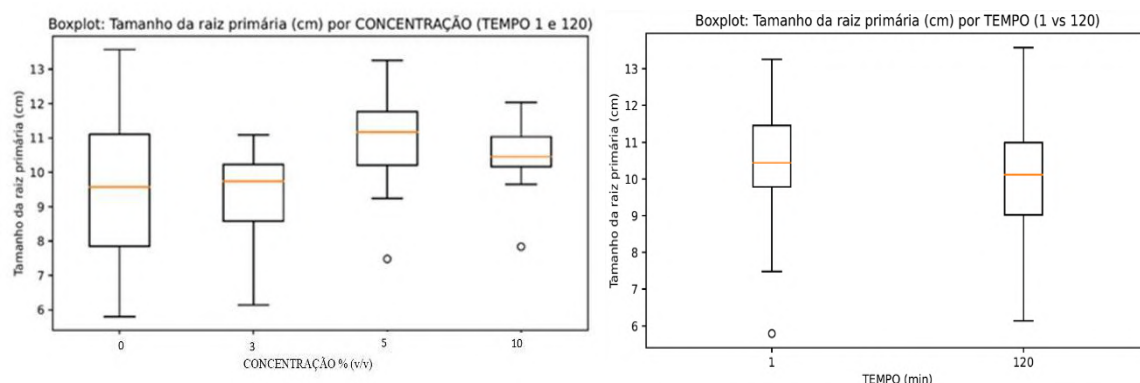


Figura 16. Boxplot: raiz primária por concentração (Tempo 1 e 120), raiz primária por tempo (1 vs 120).

Fonte: Dados elaborado pela autora, 2026.

A Figura 16 apresenta dois boxplots que avaliam o tamanho da raiz primária em função da concentração e do tempo de exposição (1 minuto e 120 minutos). O gráfico de concentração mostra que, para o tempo de 1 minuto, o crescimento das raízes é mais uniforme, com mediana mais baixa e pouca variação nas concentrações mais baixas, enquanto para 120 minutos, o tamanho das raízes aumenta, principalmente nas concentrações mais altas, evidenciando que o tempo prolongado favorece o crescimento. Já o gráfico de tempo confirma que o tempo de 120 minutos resulta em raízes maiores e com maior dispersão, sugerindo que o tempo de exposição tem um impacto positivo no crescimento da raiz primária, mas com variações entre as amostras.

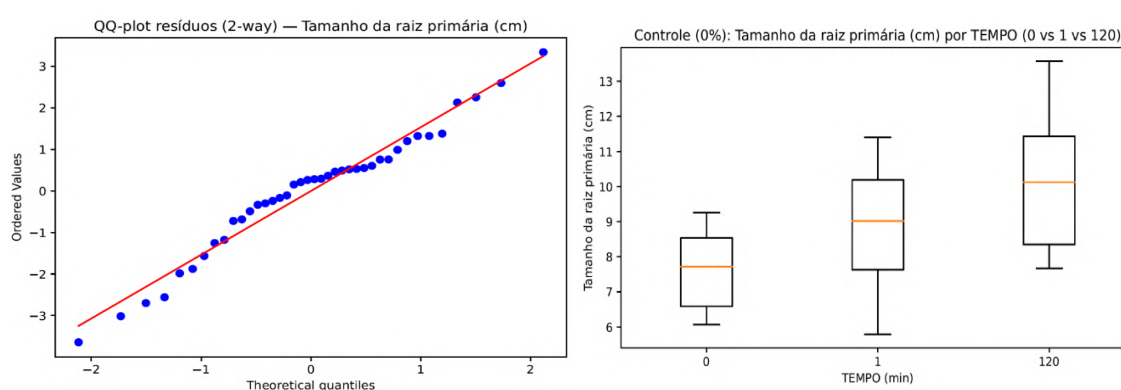


Figura 17. QQ-plot dos resíduos (2-way) para raiz primária, Controle (0%): boxplot de raiz primária por tempo (0 vs 1 vs 120).

Fonte: Dados elaborado pela autora, 2026.

A Figura 17 mostra o QQ-plot dos resíduos e o boxplot para o tamanho da raiz primária no controle (0 %). O QQ-plot confirma que os dados seguem uma distribuição normal, validando os pressupostos estatísticos para a análise. Já o boxplot revela que, no tempo de 0 minutos, o tamanho das raízes foi baixo e homogêneo, enquanto, após 1 minuto

de exposição, observou-se um aumento moderado no crescimento das raízes. Após 120 minutos, o tamanho das raízes aumentou significativamente, com maior variabilidade, sugerindo que o tempo de exposição prolongado tem um impacto positivo no crescimento da raiz primária, embora com variações nas respostas individuais.

Com relação ao tamanho total ocorreu um efeito significativo de concentração, sem efeito de tempo e sem interação. O pós-teste indicou 10% (v/v) superior a 3% (v/v), apontando que o ganho de crescimento global é mais dependente do nível de concentração do que do tempo entre 1 e 120 min (Figuras 17 e 18), O QQ-plot sugere normalidade dos resíduos aceitável para essa variável (Figura 19).

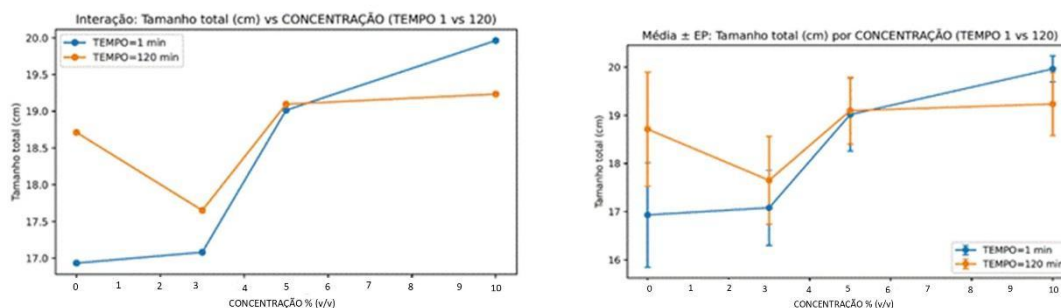


Figura 18. Interação: tamanho total vs concentração (Tempo 1 vs 120), Média $\pm$ EP: tamanho total por concentração (Tempo 1 vs 120).

Fonte: Dados elaborado pela autora, 2026.

A Figura 18 ilustra a interação entre o tamanho total das raízes e a concentração, comparando os tempos de 1 minuto e 120 minutos de exposição. O gráfico de interação mostra que o tamanho total aumentou significativamente com a concentração para 120 minutos, enquanto para 1 minuto, o tamanho das raízes diminuiu à medida que a concentração aumentava. O gráfico de média $\pm$ erro padrão (EP) confirma que o tempo prolongado favoreceu o crescimento das raízes, especialmente nas concentrações mais altas, embora com maior variabilidade nos dados. O pós-teste de Tukey indicou que as diferenças significativas ocorreram entre concentrações de 10% (v/v) e 3% (v/v), sugerindo que o ganho de crescimento é mais dependente da concentração do que do tempo de exposição. Isso reforça que o efeito da concentração é mais forte no crescimento total das raízes, com o tempo prolongado apenas amplificando esse efeito.

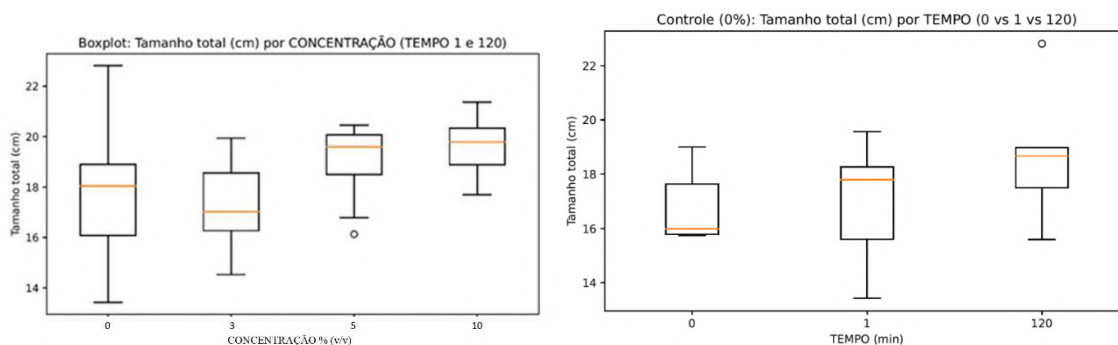


Figura 19. Boxplot: tamanho total por concentração (Tempo 1 e 120).

Fonte: Dados elaborado pela autora, 2026.

A Figura 19 apresenta dois boxplots que avaliam o tamanho total das raízes em função da concentração e do tempo de exposição (1 minuto e 120 minutos). No gráfico de concentração, observa-se que, para 1 minuto, o tamanho das raízes é relativamente baixo, com variação limitada nas concentrações mais baixas, enquanto, para 120 minutos, o crescimento das raízes foi mais expressivo, especialmente nas concentrações de 5% (v/v) e 10% (v/v). No gráfico do controle (0%), o tempo de 120 minutos favoreceu um aumento significativo no tamanho das raízes, com maior dispersão nos dados e presença de outliers, refletindo que o tempo de exposição prolongado tem um efeito positivo no crescimento total das raízes.

O crescimento inicial das plântulas tende a ser mais influenciado pela intensidade do tratamento, expressa pela concentração da solução utilizada, do que por variações moderadas no tempo de exposição, desde que este seja suficiente para a ativação dos processos fisiológicos iniciais da germinação (Bradford, 1986; Paparella et al., 2015). Esse resultado está em concordância com os resultados obtidos neste estudo, no qual o tamanho total apresentou efeito significativo de concentração, com superioridade da concentração de 10% (v/v) em relação a 3% (v/v), independentemente do tempo entre 1 e 120 minutos.

Esses comportamentos também podem ser observados visualmente nas imagens das plântulas capturadas pelo sistema GroundEye, apresentadas nas Figuras 20 e 21, nas quais se evidencia o maior desenvolvimento das estruturas radiculares no tempo de 120 minutos, sobretudo nas concentrações mais elevadas da suspensão bacteriana, em comparação ao tempo inicial de 1 minuto.

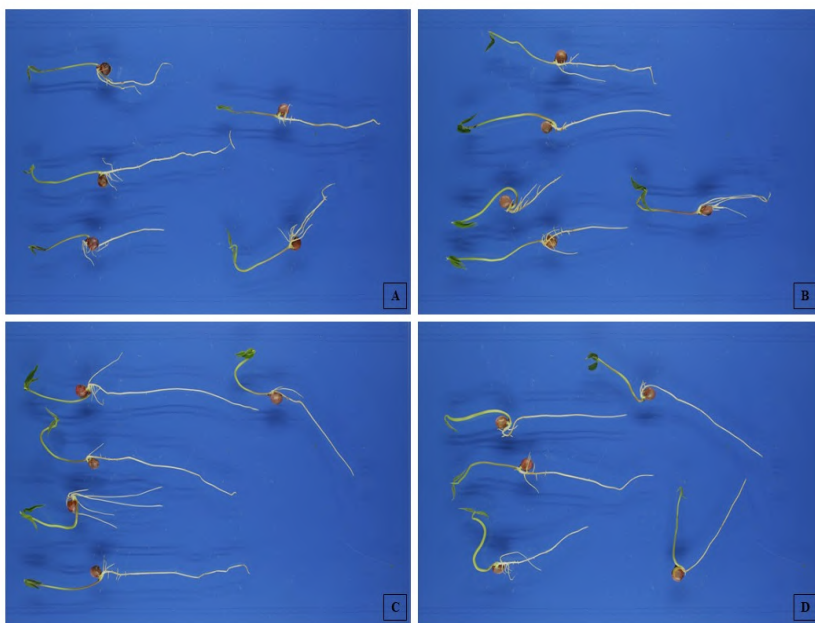


Figura 20. Imagens das plântulas capturadas no GroundEye no tempo 1 min com diferentes concentrações da suspensão bacteriana *Chromobacterium subtsugae*: Concentração 0 % (A), Concentração 3% (v/v) (B), Concentração 5% (v/v) (C), Concentração 50% (v/v) (D).

Fonte: Acervo da autora, 2026.

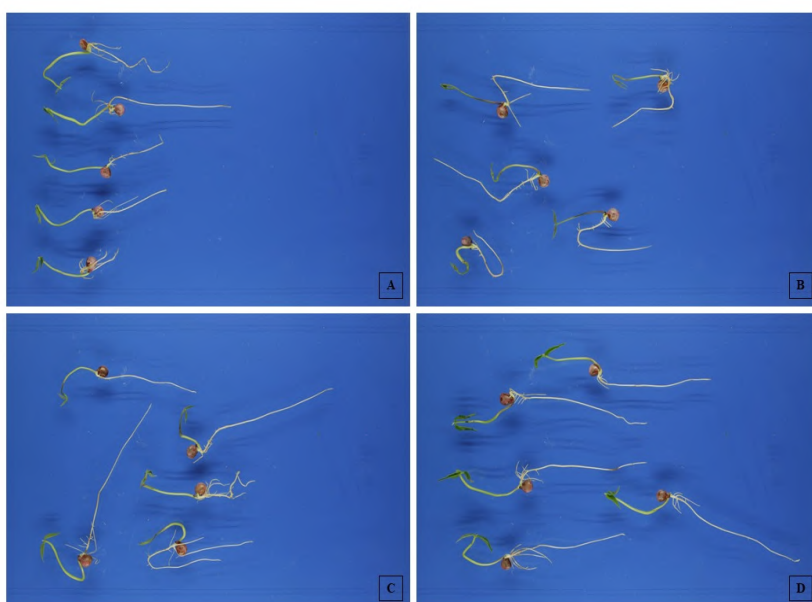


Figura 21. Imagens das plântulas capturadas no GroundEye no tempo 120 min com diferentes concentrações da suspensão bacteriana *Chromobacterium subtsugae*: Concentração 0 % (A), Concentração 3% (v/v) (B), Concentração 5% (v/v) (C), Concentração 50% (v/v) (D).

Fonte: Acervo da autora, 2026.

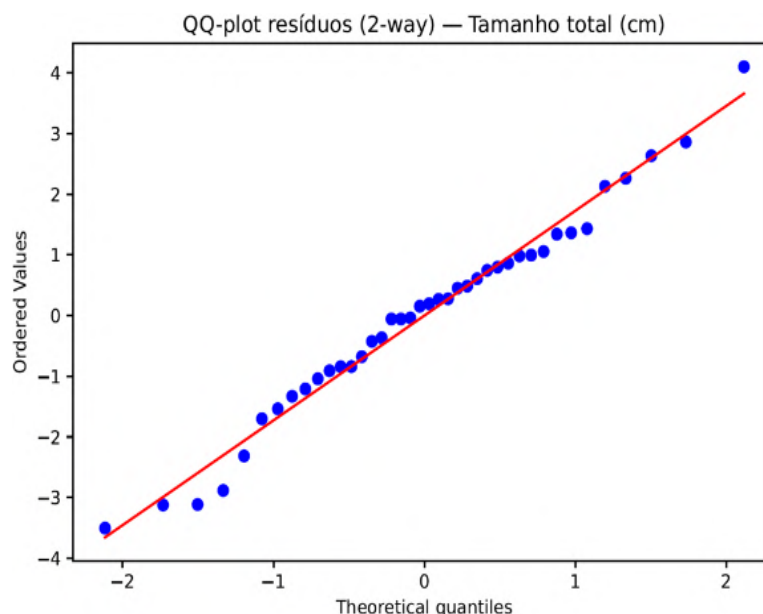


Figura 22. QQ-plot dos resíduos (2-way) para tamanho total, Figura 26 - Controle (0%): boxplot de tamanho total por tempo (0 vs 1 vs 120).
Fonte: Dados elaborado pela autora, 2026.

A Figura 22 apresenta o QQ-plot dos resíduos para o tamanho total das raízes, mostrando que os dados seguem uma distribuição normal. A distribuição dos resíduos ao longo da linha de tendência indica que os dados estão bem ajustados aos pressupostos de normalidade, validando a aplicação das análises estatísticas realizadas. Isso confirma que os resultados obtidos, como os mostrados nos boxplots e gráficos de interação, são confiáveis e não foram distorcidos por desvios significativos na distribuição dos dados.

Nesta análise exploratória, os tratamentos foram agrupados por tempo de imersão: testemunha (TT), T0 e T2. Nos tratamentos T0 e T2, as sementes foram agrupadas considerando todas as concentrações (C0, C3, C5, C10 % (v/v)) em cada tempo. Essa abordagem permite uma comparação global entre tempos, porém não isola os efeitos individuais de cada concentração; por isso, seus resultados devem ser interpretados como complementares.

Tabela 4. Médias e desvios-padrão por grupo (TT, T0 e T2) em características selecionadas

Características	Média T0	Média T2	Média TT	DP T0	DP T2	DP TT
Distorção da raiz primária	82,42	90,88	80,21	19,58	11,57	14,33
Número de ramificações	11,80	17,35	18,80	9,458	8,77	8,78
Tamanho da raiz primária	10,22	9,844	7,636	3,338	2,95	2,67
Tamanho do hipocótilo	8,032	8,829	9,195	2,021	1,61	1,25
Tamanho total	18,25	18,67	16,83	3,958	3,56	3,06

Fonte: Dados elaborados pela autora, 2026.

A comparação exploratória sugere maior comprimento médio da raiz primária em T0 e T2 em relação à testemunha, enquanto a testemunha apresentou maior número médio de ramificações e maior hipocótilo. O tamanho total foi maior em T2, sugerindo possível efeito cumulativo do tempo sobre o desenvolvimento inicial.

Tabela 5. Teste t de Welch (exploratório) e tamanho de efeito em características selecionadas

Comparação	Variável	Diferença	p (Welch)	q (FDR)	g (Hedges)
T0 vs T2	N. de ramificações	-5,55	0,00017	0,002065	-0,6057
T0 vs T2	Distorção da raiz primária	-8,46	0,00114	0,006837	-0,5238
T0 vs T2	Tamanho do hipocótilo	-0,79	0,00646	0,02586	-0,4346
T0 vs T2	Tamanho da raiz primária	0,37	0,45710	0,5181	0,1173
T0 vs T2	Tamanho total	-0,42	0,47490	0,5181	-0,1127
TT vs T0	Tamanho da raiz primária	-2,57	0,00082	0,008754	-0,7948
TT vs T0	Tamanho do hipocótilo	1,16	0,00218	0,008754	0,6089
TT vs T0	N. de ramificações	7	0,00371	0,01113	0,7445
TT vs T0	Tamanho total	-1,42	0,09081	0,1557	-0,3696
TT vs T0	Distorção da raiz primária	-2,21	0,57290	0,6875	-0,1172
TT vs T2	Tamanho da raiz primária	-2,21	0,002862	0,01717	-0,7566
TT vs T2	Distorção da raiz primária	-10,67	0,004807	0,01923	-0,8713
TT vs T2	Tamanho total	-1,842	0,02628	0,05256	-0,5268
TT vs T2	Tamanho do hipocótilo	0,366	0,2773	0,3697	0,2352
TT vs T2	Número de ramificações	1,45	0,514	0,5607	0,1641

Fonte: Dados elaborados pela autora, 2026.

Os testes robustos (Welch) reforçam diferenças principalmente para número de ramificações, distorção da raiz primária e hipocótilo em T0 vs T2, além de contrastes entre testemunha e tempos de imersão para características radiculares. Como esta etapa agrega concentrações, recomenda-se interpretá-la como suporte à discussão fisiológica e operacional, e não como substituto da ANOVA fatorial.

A aplicação de técnicas de análise de imagens tem se consolidado como uma ferramenta eficiente na avaliação da qualidade fisiológica de sementes, ao permitir a obtenção de informações objetivas e reprodutíveis, minimizando a influência da subjetividade da interpretação visual.

Os algoritmos computacionais para processar cores de pixels em escala de cinza a cores, são amplamente aplicados em diversos campos, como diagnósticos médicos, odontologia, medicina veterinária e estudos ambientais, incluindo o mapeamento de zonas de desmatamento. Na pesquisa agrícola, essa técnica é empregada para avaliar características fenotípicas de frutos e identificar divergências entre espécies (Martins, 2024; Santana et al., 2024).

A Figura 23, apresenta o comportamento da matriz de correlação (Person), realizada com as médias por repetição, considerando o conjunto fatorial (tempo e concentração), entre a raiz primária, raiz secundária, Hipocótilo e o tamanho total. As cores amarelas indicando valores próximo de 1.00 está relacionada a uma correlação forte positiva, enquanto ao se aproximar de -1.00 com a cor do roxa indica uma correlação forte negativa entre as variáveis.

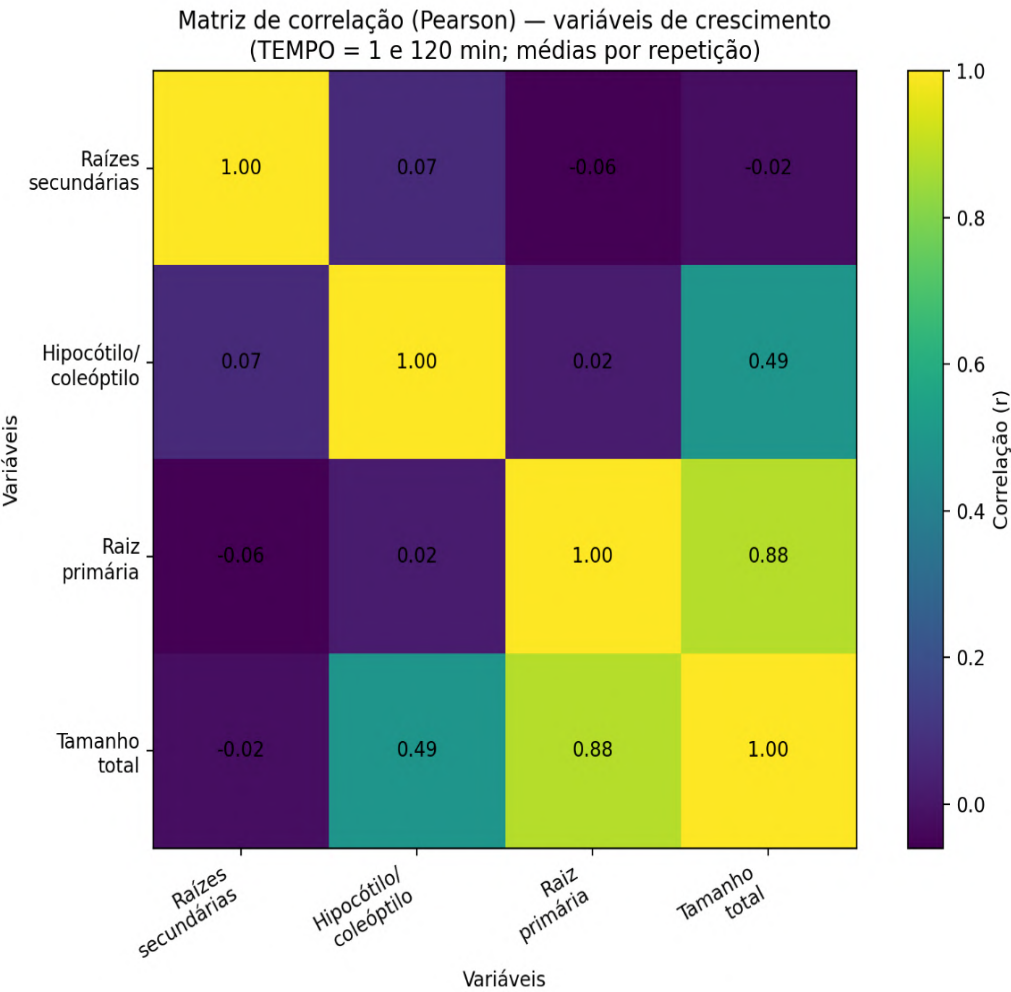


Figura 23. Matriz de correlação (Pearson) entre variáveis de crescimento (tempos 1 e 120 min; médias por repetição).

Fonte: Dados elaborado pela autora, 2026.

O tamanho total relacionou-se principalmente ao crescimento da raiz primária, apresentando correlação forte e positiva ($r = 0,88$; $p < 0,001$). Também observou correlação moderada entre hipocótilo e tamanho total ($r = 0,49$; $p = 0,001$), sugerindo que o aumento do comprimento da parte aérea influencia parcialmente para o crescimento total. Em contraste, o tamanho das raízes secundárias apresentou correlações fracas e não significativas com as demais variáveis representadas por valores menores negativos, indicando que sua contribuição para explicar o crescimento total foi limitada nas condições avaliadas.

Diante do exposto, com foco em reduzir a subjetividade da leitura visual e definir padrões de coloração associados à viabilidade e ao vigor das sementes de feijão guandu, dados gerados pelo sistema (dominância de cores) por meio do teste de tetrazólio digitalizado e analisado no equipamento de imagens GroundEye, possibilitou transformar a interpretação do tetrazólio em medidas numéricas reprodutíveis, facilitando comparar tratamentos e repetições com maior consistência. Considerando o critério fisiológico adotado, vermelho intenso como indicativo de alta respiração e deterioração, rosa como padrão de tecido viável e vigoroso e branco/amarelo como tecido morto, foi possível identificar combinações de tratamento com perfil mais favorável de qualidade fisiológica.

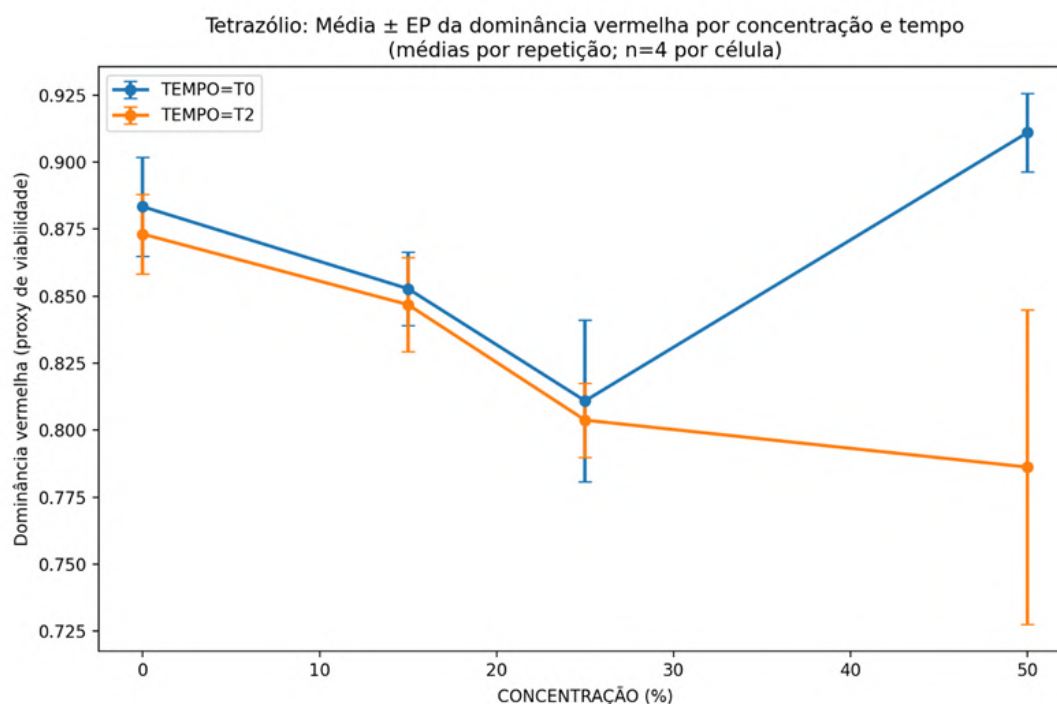


Figura 24. Tetrazólio: dominância vermelha (média $\pm$ EP) em função da concentração e do tempo (T0 vs T2; n=4 por condição).

Fonte: Dados elaborado pela autora, 2026.

O gráfico apresentado indica que a dominância vermelha varia de forma distinta com o tempo de exposição e a concentração do tratamento. No tempo de 1 minuto (T0), a dominância vermelha diminui à medida que a concentração aumenta, sugerindo que a alta concentração exerce um efeito negativo no processo em um curto período de exposição. Em contraste, no tempo de 120 minutos (T2), a dominância vermelha aumenta significativamente nas concentrações mais altas, alcançando os maiores valores em 10% (v/v) de concentração. Esses resultados indicam que o tempo de exposição mais longo favorece a dominância vermelha nas concentrações elevadas, sugerindo que os efeitos do tempo prolongado podem estar associados à intensificação do processo de dominância em resposta ao aumento da concentração.

Pesquisas conduzidas com sementes florestais demonstram que a análise digital de imagens é capaz de discriminar lotes quanto à integridade interna e ao desempenho fisiológico, apresentando forte associação com testes tradicionais de germinação e vigor (Silva *et. al.* 2020).

É possível utilizar imagens digitalizadas para avaliação da viabilidade de sementes por meio do teste de tetrazólio. Em estudo realizado em sementes de *Brachiaria brizantha*,

observaram que essa metodologia apresentou resultados equivalentes aos métodos tradicionais, permitindo a identificação adequada aos padrões de coloração dos tecidos embriogênicos (Custódio *et. al.* 2012).

Neste estudo, utilizamos o algoritmo computacional de imagens para a definição da qualidade fisiológica das sementes de feijão guandu através da coloração resultante da aplicação da solução de tetrazólio. Desse modo, o emprego do teste de tetrazólio digitalizado em sementes de feijão-guandu, associado à análise automatizada de imagens no sistema GroundEye, mostra-se uma estratégia adequada para reduzir a subjetividade da avaliação visual e estabelecer padrões de coloração relacionados à viabilidade e ao vigor das sementes de feijão guandu.



Figura 25. Imagem capturada pelo groundeye da semente de guandu após teste de tetrazólio na concentração 50 mL e tempo 120 minutos.
Fonte: Acervo da autora, 2026.



Figura 26. Imagem capturada pelo groundeye da semente de guandu após teste de tetrazólio na concentração 25 mL e tempo 120 minutos.
Fonte: Acervo da autora, 2026.

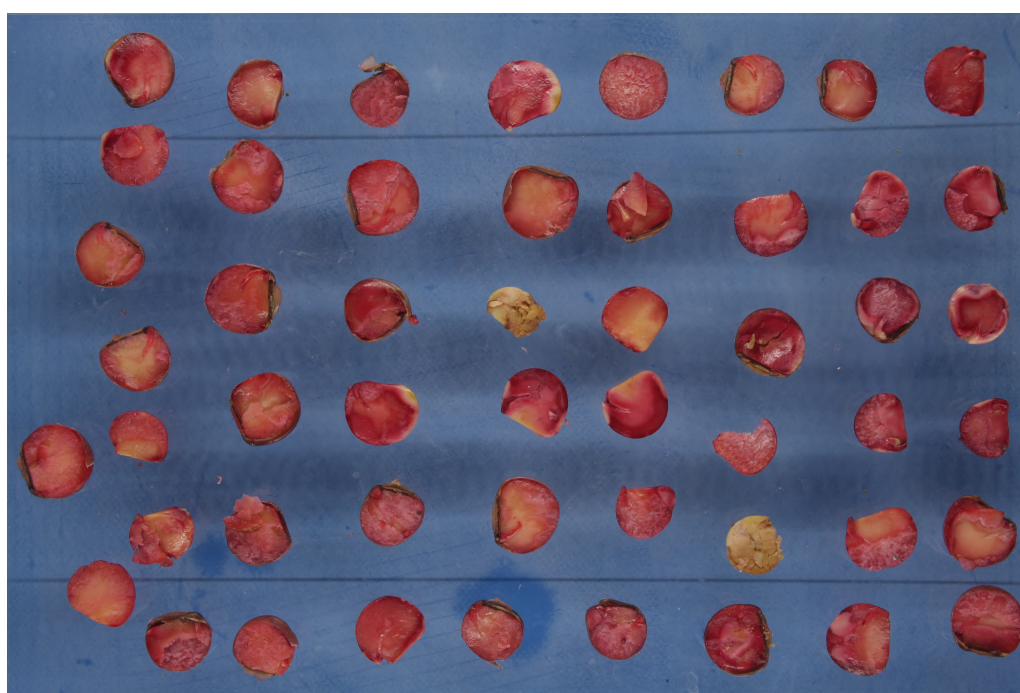


Figura 27. Imagem capturada pelo groundeye da semente de guandu após teste de tetrazólio com sementes submetidas ao tratamento com bioinsumos na concentração de 5% (v/v) e tempo 1 minuto.
Fonte: Acervo da autora, 2026.



Figura 28. Imagem capturada pelo groundeye da semente de guandu após teste de tetrazólio e sementes submetidas ao tratamento com bioinsumos na concentração de 10% (v/v) e tempo 1 minuto.

Fonte: Acervo da autora, 2026.

Em termos aplicados, o tratamento T2 (120 min) com 10 % (Figura 25) apresentou o conjunto mais promissor, por associar menor dominância rosa (menor sinal de deterioração) com manutenção de coloração compatível com viabilidade; em seguida destacaram-se T2 com 5% (v/v) e T0 5% (v/v) (Figuras 26 e 27 respectivamente), também com valores relativamente mais baixos de rosa. Por outro lado, embora T0 com 10% (v/v) (Figura 28) tenha exibido maior dominância rosa, essa condição apresentou simultaneamente maior dominância vermelha, indicando que o aumento de rosa, quando acompanhado de vermelho intenso, pode refletir um padrão menos desejável do ponto de vista de vigor.

5. CONCLUSÃO

O teste de tetrazólio digitalizado associado ao sistema GroundEye demonstrou ser uma ferramenta eficiente para avaliar objetivamente a qualidade fisiológica das sementes de feijão-guandu, possibilitando padronização das análises e redução da subjetividade inerente à interpretação visual tradicional. A análise digital da coloração permitiu distinguir de forma consistente os diferentes estados fisiológicos das sementes,

confirmando sua aplicabilidade como método complementar na identificação de viabilidade e deterioração.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEBE B., The Dietary Use of Pigeon Pea for Human and Animal Diets. ScientificWorldJournal. 2022 Jan 24;2022:4873008. doi: 10.1155/2022/4873008. PMID: 35110974; PMCID: PMC8803422.

ABUD, H. F.; CICERO, S. M.; GOMES JUNIOR, F. G. (2018). Radiographic images and relationship of the internal morphology and physiological potential of broccoli seeds. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 40, e34950. DOI:<https://doi.org/10.4025/actasciagron.v40i1.34950>

ANDRIAZZI, C. V. G.; ROCHA, D. K., DE SOUZA, I. C. P., & BICHUETTE, S. A Evaluation of physiological quality of Corn seeds by GroundEye L800® system. *Revista Agroambiente On-Line*, v. 14, 2020. DOI: <https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v14i0.6750>

ATKINSON, J. A.; POUND, M. P.; BENNETT, M. J.; WELLS, D. M. (2019). Uncovering the hidden half of plants using new advances in root phenotyping. *Current opinion in biotechnology*, 55, 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2018.06.002>

BORGES, W. L. B.; CARVALHO, A. O.; CRUZ, L. C. P.; GOMES, E. N.; FREITAS, R. S.; MICHELOTTO, M. D. Uso de inseticidas biológicos no controle de insetos pragas das culturas do sorgo e feijão. *Nucleus*. 10.3738/1982.2278.4124.

BRADFORD, K. J. *Manipulation of seed water relations via osmotic priming to improve germination under stress conditions*. HortScience, v. 21, n. 5, out. 1986.

BRANDANI, E. B. *et al.* (2022). Image analysis for the evaluation of soybean seeds vigor. *Acta Agronómica*, 70(3). DOI:<https://doi.org/10.15446/acag.v70n3.92093>

BRASIL Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Regras para análise de sementes / Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. – Brasília : Mapa/ACS, 2009. 399 p. ISBN 978-85-99851-70-8

CALVILLO-AGUILAR, F. F., *et. al.* Germination test for the evaluation of plant-growth promoting microorganisms. *J Microbiol Methods*. 2023 Apr;207:106708. doi: 10.1016/j.mimet.2023.106708. Epub 2023 Mar 20. PMID: 36940917.

CUSTÓDIO, C. C.; DAMASCENO, R. L.; MACHADO NETO, N. B.. (2012). Imagens digitalizadas na interpretação do teste de tetrazólio em sementes de *Brachiaria brizantha*. *Revista Brasileira De Sementes*, 34(2), 334–341. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0101-31222012000200020>

DHAGE, S. S.; ANISHETTAR, S. Seed Priming: An Approach to Enhance Weed Competitiveness and Productivity in Aerobic Rice: A Review. *Agricultural Reviews*, n. OF, 16 maio 2020

FAO. Green manure/cover crops and crop rotation in conservation agriculture. Food and Agriculture Organization, 2011.

FILHO, J. M.; KIKUTI, A. L. P.; LIMA, L. B. (2009). Métodos para avaliação do vigor de sementes de soja, incluindo a análise computadorizada de imagens. *Revista Brasileira De Sementes*, 31(1), 102–112. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0101-31222009000100012>

FILHO, O. F. L.; AMBROSANO, E. J.; WUTKE, E. B.; ROSSI, F.; CARLOS, J. A. D. (ed.). *Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil: fundamentos e prática*. 2. ed. rev. e atual. Brasília, DF: Embrapa, 2023. v. 1. p. 79–83. ISBN 978-65-86056-63-1.

FITTER, A.; WILLIAMSON, L.; LINKOHR, B.; LEYSER, O. (2002). Root system architecture determines fitness in an *Arabidopsis* mutant in competition for immobile phosphate ions but not for nitrate ions. *Proceedings. Biological sciences*, 269(1504), 2017–2022. DOI: <https://doi.org/10.1098/rspb.2002.2120>

FONSECA, W. da S.; MARTINS, S. V.; & VILLA, P. M. (2023). Green Manure as an Alternative for Soil Recovery in a Bauxite Mining Environment in Southeast Brazil. *Floresta E Ambiente*, 30(1), e20220041. DOI: <https://doi.org/10.1590/2179-8087-FLORAM-2023-0041>

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. *Seed and seed quality: technical notes for emergency seed interventions*. Rome: FAO, 2006. 24 p. (Appendix 14). Disponível em:

https://www.fao.org/fileadmin/templates/tc/tce/pdf/Appendix_14_Seed_and_Seed_Quality_for_Emg.pdf

FRANÇA-NETO, J. B.; KRZYZANOWSKI, F. C. Use of the tetrazolium test for estimating seed viability and vigour (material técnico ISTA). 2022.

FRANÇA-NETO, J.B.; KRZYZANOWSKI, F.C. Fisiologia de sementes: vigor de sementes. Informativo ABRATES, Londrina, v. 11, n. 3, p. 81-84, dez. 2001.

FULLER, D.Q., MURPHY, C., KINGWELL-BANHAM, E. *et al.* *Cajanus cajan* (L.) Millsp. origins and domestication: the South and Southeast Asian archaeobotanical evidence. *Genet Resour Crop Evol* 66, 1175–1188 (2019). DOI:<https://doi.org/10.1007/s10722-019-00774-w>

GARAI, U.; PATRA, S. (2024). Review of the effects of seed priming for improving seed germination, seedling establishment and yield on several pulse crops. 20. 63-79.

HAJI, A.; TEKA, T.; YIRGA, B. T.; NEGASA, A. K.; DESALEGN N. K.; GELETA, A. G.; LEMA, A. A.; MAKISO, U. M. (2024), Composição Nutricional, Compostos Bioativos, Aplicações Alimentares, e Benefícios para a Saúde da Ervilha Pombo (*Cajanus Cajan* L. Millsp.): Uma Revisão. *Ciência das Leguminosas*, 6: e233. DOI:<https://doi.org/10.1002/leg3.233>

HEDGE, R. B.; KUDVA, V.; NAYAK, S.; SAMPATHILA, N.; THALENGALA, A.; Advanced techniques for seed quality assessment and germination monitoring. *Discover Applied Sciences Review*, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42452-025-07284-8>

JHA, R.; VELUSAMY, M.; SUNDARALINGAM, K.; S. VANITHA, *et al.*, Synergistic role of biopriming in boosting legume crop performance: A review, *Physiological and Molecular Plant Pathology*, Volume 142, 2026, 103038, ISSN 0885-5765, DOI:<https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2025.103038>.

KAMILARIS, A.; PRENAFETA-BOLDÚ, F. X. Deep learning in agriculture: a survey. *Computers and Eletronics in Agriculture*, v. 147, p. 70-90, 2018.

LODDO, A.; LODDO, M.; DI RUBERTO, C. A novel deep learning based approach for seed image classification and retrieval. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 187, p. 106269, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106269>

LYNCH, J. Root Architecture and Plant Productivity. *Plant Physiology*, v. 109, p. 7-13, 1995. Disponível em:

<https://scispace.com/pdf/root-architecture-and-plant-productivity-2ccmkod0e8.pdf>

Manual Groundeye®. 2016. Tbit Tecnologia e Sistemas, Lavras.

MARCOS-FILHO,, J., *Fisiologia de sementes de plantas cultivadas*. Londrina: ABRATES, 2015. 659 p. ISBN 978-85-64895-03-4.

MARTIN, P. AW.; GUNDERSEN-RINDAL, D.; BLACKBURN, M.; BUYER, J. *Chromobacterium subtsugae* sp. nov., uma betaproteobactéria tóxica para besouro da batata do colorado e outras pragas de insetos. *Systematic and evolutionary microbiology*, v. 57, n. 5, 2007.

MARTINS, S. P. Análise textural e classificação digital de imagens SAR para discriminação de alvos agrícolas. *Geociências*, v. 43, n. 1, p. 29-45, 2024.

MARQUES, H. G. Correa, P. R. R. Reguladores de crescimento na cultura do feijão. *Agroveterinária, Varginha, MG*, v. 7, n. 1, p. 30-46, 2025

MCDONALD, M. B. Seed quality assessment. *Seed Science Research*, 1998. DOI:10.1017/S0960258500004165

NETO, J.B.F.; KRZYZANOWSKI, F.C.; COSTA, N.P. da. O teste de tetrazólio em sementes de soja. Londrina: EMBRAPA-CNPSo, 1998. 72 p. (EMBRAPA-CNPSo. Documentos, 116), p. 12-22.

PAPARELLA, S.; ARAÚJO, S.S.; ROSSI, G. et al. Seed priming: state of the art and new perspectives. *Plant Cell Rep* 34, 1281–1293 (2015). DOI: <https://doi.org/10.1007/s00299-015-1784-y>

QUEIROZ, A. T. S. Ação de microrganismos promotores do crescimento de plantas: uma revisão sistemática da literatura. *Revista PsiPro*, v. 2, n. 5, p. 98-112, 2023.

REED, R.C.; BRADFORD, K.J.; KHANDAY, I. Germinação e vigor das sementes: garantindo a sustentabilidade das culturas em um clima em mudança. *Hereditariiedade* 128450–459 (2022). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41437-022-00497-2>

RIBEIRO, L. K. M., Análise de imagens de plântulas para a avaliação do potencial fisiológico de sementes de soja. 2021. Dissertação (Mestrado Profissional em Bioenergia e Grãos) — Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ifgoiano.edu.br/handle/prefix/1948>.

RIBEIRO, W. N.; GUIMARÃES, G. A. M.; DIAS, M. A. Potencialidades do uso de *Cajanus cajan* no Cerrado: uma revisão. Revista Agrotecnologia, Ipameri, v. 13, n. 2, p. 24-36, 2022. DOI: <https://doi.org/10.31668/agrotec.v13i2.12886>

ROUPHAEL, Y.; COLLA, G. Toward a Sustainable Agriculture Through Plant Biostimulants: From Experimental Data to Practical Applications. *Agronomy* 2020, 10, 1461. <https://doi.org/10.3390/agronomy10101461>

SALDAÑA, E.; SICHE, R.; LUJÁN, M.; QUEVEDO, R.. (2013). Revisão: visão computacional aplicada à inspeção e controle de qualidade de frutas e verduras. *Revista Brasileira de Tecnologia de Alimentos*, 16(4), 254–272. DOI:<https://doi.org/10.1590/S1981-67232013005000031>

SANTANA, N. A.; NUNES, V. V.; SILVA, M. S. O.; SILVA-MANN, R. (2024). *Spondias tuberosa* Arr. Câm.: a natural population in Sergipe-contributions to the understanding of genetic variability and conservation of the species, 2024. DOI: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs3835713/v1>

SOWJANYA, S. & PRASAD, S. R. Effect of green synthesized and chemical nanoparticles on seed quality parameters in Pigeonpea (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.). *Mysore J. Agric. Sciences*, v. 57, n. 2, p. 310-316, 2023.

TAIZ, L. *et al.*, Fisiologia e desenvolvimento vegetal [recurso eletrônico] / [tradução: Alexandra Antunes Mastroberti ... et al.] ; revisão técnica: Paulo Luiz de Oliveira. — 6. ed. — Porto Alegre : Artmed, 201 ISBN 978-85-8271-367-9 Acesso 06/01 PAG 519 - 522. Disponível em: <https://archive.org/details/taiz-zeiger-fisiologia-vegetal-6a-ed/page/XXIV/mode/2up>

TBIT. GroundEye Series S: Advanced and Reliable Seed Analysis. Material institucional, 2025.

TEIXEIRA, E. M. G. F.; SILVA-LÓPEZ, R. E. (*Cajanus cajan* (L.) Millsp.) Fabaceae: uma revisão dos principais constituintes químicos e atividades farmacológicas. *Revista Fitos*, v. 16 n. 2, p. 215-230, v. 16 n. 2 2022. DOI: <https://doi.org/10.32712/2446-4775.2022.847>