



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA
MESTRADO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA

FRANCISCA DAS CHAGAS DE OLIVEIRA

FORMAS DE APLICAÇÃO DE SILÍCIO EM VARIEDADES CRIOULAS DE
FEIJÃO-CAUPI CULTIVADAS EM SOLO SALINO

MOSSORÓ

2025

FRANCISCA DAS CHAGAS DE OLIVEIRA

**FORMAS DE APLICAÇÃO DE SILÍCIO EM VARIEDADES CRIOULAS DE
FEIJÃO-CAUPI CULTIVADAS EM SOLO SALINO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semiárido como requisito para obtenção do título de Mestre em Manejo de Solo e Água.

Linha de Pesquisa: Tecnologia em Nutrição de Plantas e Soluções para Convivência com a Seca e Salinidade

Orientador: Prof. Dr. Francisco Vanies da Silva Sá

Coorientador: Prof. Dr. Miguel Ferreira Neto

Coorientador: Prof. Dr. Tayd Dayvison Custódio Peixoto

MOSSORÓ

2025

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semiárido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

d048f de Oliveira, Francisca das Chagas.
Formas de Aplicação de Silício em Variedades
Crioulas de Feijão-Caupi Cultivadas em Solo
Salino / Francisca das Chagas de Oliveira, - 2025.
59 f. : il.

Orientador: Francisco Vanies da Silva Sá.
Coorientador: Tayd Dayvison Custódio Peixoto.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido. Programa de Pós-graduação em
Manejo de Solo e Água, 2025.

I. Estresse abiótico. 2. Adubação silicatada. 3.
Eficiência fotossintética. 4. Sustentabilidade
agrícola. 5. Variedades tradicionais. I. da Silva
Sá, Francisco Vanies, orient. II. Custódio
Peixoto, Tayd Dayvison, co-orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência

Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva

CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semiárido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

FRANCISCA DAS CHAGAS DE OLIVEIRA

**FORMAS DE APLICAÇÃO DE SILÍCIO EM VARIEDADES CRIOULAS DE
FEIJÃO-CAUPI CULTIVADAS EM SOLO SALINO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semiárido como requisito para obtenção do título de Mestre em Manejo de Solo e Água.

Aprovada em: 30 / 01 / 2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco Vanies da Silva Sá (UEPB)

Orientador

Prof. Dr. Tayd Dayvison Custódio Peixoto (UVA)

Coorientador

Dr. Paulo Cássio Alves Linhares

Dr. Luderlândio de Andrade Silva

AGRADECIMENTOS

A Deus, por sua graça imerecida e infinita misericórdia.

Ao meu orientador, prof. Francisco Vanies e coorientadores professores Tayd Peixoto e Miguel Ferreira, que me auxiliaram do começo ao fim deste trabalho.

À banca avaliadora, pelas valiosas contribuições e melhorias do trabalho em todos os sentidos.

À minha família, por me apoiar em todas as situações, em especial meu filho Henrique, motivo para eu lutar.

Aos colegas que contribuíram significativamente para realização do trabalho, podendo citá-los em especial Sávio, colega de pesquisa que não largou minha mão, também Ricardo, Kariolânia, Paula Cristina, Clara, Joyce, Mirna e Luany, minha amiga de infância.

Aos colegas do LASAPSA, que sempre se dispuseram a me ajudar e me receberam com alegria.

A CAPES, pelo fornecimento da bolsa de mestrado.

Ao prof. Daniel Valadão, coordenador do programa pelo apoio constante.

Ao PPGMSA e UFERSA, por toda a contribuição em minha formação acadêmica.

RESUMO

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp), amplamente cultivado em regiões tropicais e subtropicais, é uma cultura de grande relevância socioeconômica, especialmente para pequenos agricultores no Nordeste brasileiro. O objetivo deste trabalho foi avaliar a eficácia da adubação com silício, na forma de silicatos de cálcio e potássio, na aclimação de variedades crioulas de feijão-caupi submetidas ao estresse salino. Foram analisados os efeitos da aplicação sobre o crescimento, parâmetros fisiológicos e produtividade das variedades. O experimento foi realizado em casa de vegetação, no campus leste da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), no município de Mossoró-RN. A pesquisa foi conduzida em delineamento de blocos casualizados, em esquema fatorial 5x5, com quatro repetições. Foram avaliadas cinco variedades crioulas de feijão-caupi: Pingo de Ouro, Costela de Vaca, Paulistinha, Sempre verde e Ceará submetidas a cinco tratamentos: T1 – solo não salino (controle); T2 – solo salino com 6,0 dS m⁻¹; T3 – solo salino + 1,3 g planta⁻¹ de Si (via solo), na forma de CaSiO₃; T4 – solo salino + 0,15 g L⁻¹ de Si (via foliar), na forma de K₂SiO₃; e T5 – solo salino com a combinação dos tratamentos T3 e T4.. A aplicação foliar de silicato de cálcio apresentou resultados promissores para a produção por planta nas variedades Paulistinha e Sempre verde sob estresse salino. A aplicação combinada de silicatos atenuou parcialmente os efeitos adversos da salinidade sobre o número de vagens por planta e produção por planta da variedade Ceará. A aplicação foliar de silicato de potássio atenuou os efeitos da salinidade na clorofila b na variedade Paulistinha. O uso de silicatos, independentemente do modo de aplicação, reduziu os efeitos adversos da salinidade sobre a taxa de assimilação de CO₂.

Palavras-chave: Estresse abiótico. Adubação silicatada. Eficiência fotossintética. Sustentabilidade agrícola. Variedades tradicionais.

ABSTRACT

Cowpea (*Vigna unguiculata* (L.) Walp), widely cultivated in tropical and subtropical regions, is a crop of great socioeconomic relevance, especially for small farmers in Northeastern Brazil. The objective of this study was to evaluate the effectiveness of silicon fertilization, in the form of calcium and potassium silicates, in the acclimatization of cowpea landraces subjected to saline stress. The effects of the application on growth, physiological parameters and productivity of the varieties were analyzed. The experiment was carried out in a greenhouse, on the east campus of the Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), in the city of Mossoró-RN. The research was conducted in a randomized block design, in a 5x5 factorial scheme, with four replications. Five cowpea landraces were evaluated: Pingo de Ouro, Costela de Vaca, Paulistinha, Sempre verde and Ceará subjected to five treatments: T1 – non-saline soil (control); T2 – saline soil with 6.0 dS m⁻¹; T3 – saline soil + 1.3 g plant⁻¹ of Si (via soil), in the form of CaSiO₃; T4 – saline soil + 0.15 g L⁻¹ of Si (via foliar), in the form of K₂SiO₃; and T5 – saline soil with the combination of treatments T3 and T4.. The foliar application of calcium silicate showed promising results for production per plant in the Paulistinha and Sempre verde varieties under saline stress. The combined application of silicates partially attenuated the adverse effects of salinity on the number of pods per plant and production per plant in the Ceará variety. The foliar application of potassium silicate attenuated the effects of salinity on chlorophyll b in the Paulistinha variety. The use of silicates, regardless of the application method, reduced the adverse effects of salinity on the CO₂ assimilation rate.

Keywords: Abiotic stress. Silicon fertilization. Photosynthetic efficiency. Agricultural sustainability. Traditional varieties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Dados de temperatura máxima, mínima e umidade relativa coletados de dezembro a março de 2024.	21
Figura 2. Croqui do experimento com a disposição das parcelas e seus respectivos tratamentos.	22

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Atributos químicos do extrato de saturação dos solos utilizados antes do experimento	23
Tabela 2. Caracterização química da fontes hídrica utilizada.	24
Tabela 3. Caracterização química do fertilizante foliar Liqui-Plex Fruit®.....	25
Tabela 4. Resumo da análise de variância para as variáveis comprimento do ramo principal (CRP), diâmetro do caule (DC), número de folhas (NF) e massa seca da parte aérea (MSPA) e produção por planta (PROD).....	28
Tabela 5. Médias de condutividade elétrica (CE) e pH do solo em vasos submetidos a diferentes tratamentos com silício.	28
Tabela 6. Resumo da análise de variância para as variáveis diâmetro do caule (DC), comprimento do ramo principal (CRP) e número de folhas (NF).	29
Tabela 7. Médias do diâmetro do caule (DC), comprimento do ramo principal (CRP) e número de folhas (NF) de feijão-caupi submetido a diferentes tratamentos com silício.	29
Tabela 8. Médias do diâmetro do caule (DC) e comprimento do ramo principal (CRP) de variedades de feijão-caupi.	30
Tabela 9. Resumo da análise de variância para as variáveis taxa de assimilação de CO ₂ (AN), transpiração (E), condutância estomática (gs), clorofila a (Chl a), clorofila b (Chl b) e clorofila total (Chl t).....	31
Tabela 10. Médias da taxa de assimilação de CO ₂ (AN) de feijão-caupi submetido a diferentes tratamentos com silício.	31
Tabela 11. Médias de condutância estomática (gs) de variedades crioulas de feijão-caupi submetidas a diferentes tratamentos.	32
Tabela 12. Médias de clorofila a (Chl a) (ICF) de variedades crioulas de feijão-caupi submetidas a diferentes tratamentos.	33
Tabela 13. Médias de clorofila b (Chl b) de variedades crioulas de feijão-caupi submetidas a diferentes tratamentos.	34
Tabela 14. Médias de clorofila total (Chl T) de variedades crioulas de feijão-caupi submetidas a diferentes tratamentos.	36
Tabela 15. Resumo da análise de variância para as variáveis teores foliares de sódio (Na), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), silício (Si), relações sódio/potássio (Na/K), sódio/cálcio (Na/Ca), sódio/magnésio (Na/Mg) e sódio/silício (Na/Si).....	37

Tabela 16. Médias dos teores foliares de sódio (Na) (g kg^{-1}) de variedades crioulas de feijão-caupi submetidas a diferentes tratamentos.	37
Tabela 17. Médias dos teores foliares de potássio (K) (g kg^{-1}) de variedades crioulas de feijão-caupi submetidas a diferentes tratamentos.	38
Tabela 18. Médias dos teores foliares de cálcio (Ca) (g kg^{-1}) de variedades crioulas de feijão-caupi submetidas a diferentes tratamentos.	39
Tabela 19. Médias dos teores foliares de silício (Si) (g kg^{-1}) de variedades crioulas de feijão-caupi submetidas a diferentes tratamentos.	41
Tabela 20. Médias dos teores foliares de Magnésio (Mg) (g kg^{-1}) de feijão-caupi submetido a diferentes tratamentos.	42
Tabela 21. Médias dos teores foliares de Magnésio (Mg) (g kg^{-1}) de variedades de feijão-caupi.	43
Tabela 22. Médias da relação sódio/cálcio (Na/Ca) de variedades de feijão-caupi submetidas a diferentes tratamentos.	44
Tabela 23. Médias da relação sódio/magnésio (Na/Mg) de variedades de feijão-caupi submetidas a diferentes tratamentos.	45
Tabela 24. Médias da relação sódio/silício (Na/Si) de variedades de feijão-caupi submetidas a diferentes tratamentos.	46
Tabela 25. Médias da relação sódio/potássio (Na/K) de feijão-caupi submetido a diferentes tratamentos.	46
Tabela 26. Resumo da análise de variância para as variáveis número de vagens por planta (NVP), produção por planta (PROD), comprimento de vagem (CVAG), comprimento de sementes (COM), largura de sementes (LAR) e espessura de sementes (ESP).	47
Tabela 27. Teste de médias para produção por planta (PROD) de variedades crioulas de feijão-caupi submetidas a diferentes tratamentos.	48
Tabela 28. Médias de número de vagens por planta (NVP) de variedades crioulas de feijão-caupi submetidas a diferentes tratamentos.	49
Tabela 29. Médias de comprimento de vagem (CVAG) de variedades crioulas de feijão-caupi submetidas a diferentes tratamentos.	50
Tabela 30. Médias de comprimento de sementes (COM) de variedades crioulas de feijão-caupi submetidas a diferentes tratamentos.	51
Tabela 31. Médias de espessura de sementes (ESP) de variedades crioulas de feijão-caupi submetidas a diferentes tratamentos.	52

Tabela 32. Médias de largura de sementes (LAR) de variedades crioulas de feijão-caupi.....	53
--	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1 SALINIDADE NO SOLO	14
2.2 EFEITO DOS SAIS NAS PLANTAS	14
2.3 SEMENTES CRIOULAS: IMPORTÂNCIA	16
2.4 O FEIJÃO-CAUPI	Erro! Indicador não definido.
2.5 TOLERÂNCIA DO FEIJÃO-CAUPI À SALINIDADE	18
2.6 SILÍCIO COMO ATENUANTE NO ESTRESSE SALINO.....	18
2.7 FORMAS DE APLICAÇÃO DE SILÍCIO	19
3 MATERIAL E MÉTODOS	21
3.1 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	21
3.2 CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO	22
3.3 MANEJO DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM.....	23
3.4 ADUBAÇÃO	24
3.4.1 Adubação silicatada	24
3.4.2 Adubação com macro e micronutrientes	24
3.5 VARIÁVEIS ANALISADAS.....	25
3.5.1 Condutividade elétrica e Ph do extrato de saturação do solo	25
3.5.2 Trocas gasosas foliares e pigmentos fotossintetizantes	25
3.5.3 Variáveis de crescimento	26
3.5.4 Concentrações foliares de nutrientes e sódio	26
3.5.5 Análise de silício foliar	27
3.5.6 Componentes de produção	27
3.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	27
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	28

4.1 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DO EXTRATO DE SATURAÇÃO E PH DO SOLO	28
4.2 COMPONENTES DE CRESCIMENTO	29
4.3 TROCAS GASOSAS FOLIARES E PIGMENTOS FOTOSSINTETIZANTES	31
4.4 TEORES FOLIARES DE NUTRIENTES, SÓDIO E SILÍCIO	37
4.5 COMPONENTES DE PRODUÇÃO	47
5 CONCLUSÕES.....	54
REFERÊNCIAS.....	55

1 INTRODUÇÃO

O feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp), amplamente cultivado em regiões tropicais e subtropicais, é uma cultura de grande relevância socioeconômica, especialmente para pequenos agricultores no Nordeste brasileiro. Além de sua importância como fonte alimentar, com alto teor de proteínas, vitaminas e minerais, o feijão-caupi se destaca por sua capacidade de fixar nitrogênio atmosférico, contribuindo para a melhoria da fertilidade do solo. No entanto, a salinidade do solo é um dos principais fatores limitantes para o cultivo dessa leguminosa, reduzindo sua produtividade devido ao estresse osmótico, à toxicidade de íons como sódio (Na^+) e cloro (Cl^-), bem como à interferência na absorção de nutrientes essenciais (Praxedes *et al.*, 2022).

O feijão-caupi, por ser moderadamente tolerante à salinidade, apresenta um limite crítico para a produtividade quando exposto a níveis elevados de sais no solo. De acordo com Ayers e Westcot (1999), a salinidade da água de irrigação acima de $3,3 \text{ dS m}^{-1}$ e do extrato de saturação do solo acima de $4,9 \text{ dS m}^{-1}$ pode comprometer significativamente o desempenho da cultura. Nesse sentido, a aplicação de silício constitui alternativa viável para mitigar os efeitos deletérios da salinidade, especialmente em sistemas agrícolas de baixa tecnologia, onde a cultura é amplamente cultivada.

A salinidade do solo é um dos principais problemas encontrados na agricultura em regiões de clima árido e semiárido. Esse fenômeno, caracterizado pelo acúmulo excessivo de sais no solo, compromete a produtividade agrícola ao afetar diretamente o crescimento e o desenvolvimento das plantas. Além da salinidade natural, práticas inadequadas de manejo, como o uso de água de baixa qualidade para irrigação e a ausência de sistemas de drenagem eficientes, intensificam a salinização, colocando em risco milhões de hectares de áreas agricultáveis no mundo (FAO, 2021). Nesse cenário, a busca por estratégias que mitiguem os efeitos adversos da salinidade é essencial à segurança alimentar e à sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

Nesse contexto, o uso de elementos benéficos, como o silício (Si), tem ganhado destaque como estratégia promissora para atenuar os efeitos negativos do estresse salino em plantas. Apesar de não ser considerado um nutriente essencial, o silício exerce papel relevante na melhoria da tolerância das plantas aos estresses abióticos e bióticos. Sua aplicação pode ocorrer via solo ou foliar, promovendo benefícios como maior rigidez das estruturas vegetais, redução da toxicidade de íons, aumento da eficiência fotossintética e melhoria da homeostase iônica

(Bakhat *et al.*, 2018; Ullah *et al.*, 2024). Estudos demonstram que o Si pode atuar na preservação da integridade das membranas celulares, na mitigação de danos oxidativos e na redução do vazamento de eletrólitos, contribuindo para o crescimento e a produtividade das plantas sob condições adversas (Stefanov *et al.*, 2024).

O uso do silício em sistemas agrícolas, além de potencializar a tolerância ao estresse salino, destaca-se como ferramenta importante para culturas de grande relevância socioeconômica, como o feijão-caupi. A aplicação de silicatos, especialmente de cálcio e potássio, contribui não apenas para a redução dos impactos do estresse salino, como também para a correção de propriedades químicas do solo, como a acidez e a capacidade de troca catiônica (Neves *et al.*, 2019). Esses benefícios tornam o silício uma alternativa acessível e sustentável, particularmente em sistemas de cultivo sob condições adversas, onde a cultura do feijão-caupi é amplamente explorada.

Pesquisas realizadas com diferentes culturas, como arroz, trigo e cana-de-açúcar, têm evidenciado os efeitos positivos do silício na mitigação do estresse salino, destacando seu potencial para a melhoria da eficiência do uso da água, da fotossíntese e da resistência a pragas e doenças (Khanghahi *et al.*, 2019; Hassan *et al.*, 2024). No caso do feijão-caupi, embora estudos ainda sejam limitados, os resultados indicam que a aplicação de silício pode minimizar os impactos da salinidade, melhorando parâmetros fisiológicos e de crescimento, como condutância estomática, fluorescência da clorofila e produção de biomassa (Oliveira *et al.*, 2018; Praxedes *et al.*, 2022).

A utilização de silício na agricultura pode ocorrer por meio de diferentes fontes, como silicatos de cálcio e potássio, que além de fornecerem Si às plantas, contribuem para a correção da acidez do solo e o aumento da capacidade de troca catiônica (Neves *et al.*, 2019). A aplicação foliar, por sua vez, tem se mostrado eficaz na ativação de mecanismos de defesa das plantas, promovendo maior resistência a estresses ambientais e redução da dependência de insumos químicos (Debona *et al.*, 2017; Souri *et al.*, 2021). No entanto, a eficiência desses métodos depende de fatores como concentração utilizada, frequência de aplicação e condições edafoclimáticas, o que torna imprescindíveis estudos específicos para cada cultura.

O objetivo deste trabalho foi avaliar a adubação com silício, na forma de silicatos de cálcio e potássio, para a aclimatação de variedades crioulas de feijão-caupi submetidas ao estresse salino. Para isso, avaliou-se os efeitos dessa aplicação sobre o crescimento, parâmetros fisiológicos e produtividade das variedades.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SALINIDADE NO SOLO

A salinidade do solo é um problema global que prejudica o crescimento e o desenvolvimento das plantas, resultando em baixos rendimentos para as culturas agrícolas. Além da salinidade natural, a salinização tem aumentado devido a práticas inadequadas de irrigação, como o uso de água salina ou a irrigação sem drenagem adequada, o que impede a remoção eficiente dos sais do solo (Van Zelm *et al.*, 2020).

Nesse contexto, a seca e a salinidade figuram como os principais estresses abióticos que limitam a produtividade e a qualidade das culturas em todo o mundo, tornando ainda mais desafiadora a agricultura em regiões afetadas por esses estresses, sendo, portanto, essencial, melhorar a produção de alimentos nessas áreas para atender à crescente demanda alimentar global (Rizwan *et al.*, 2015).

Segundo a FAO (2021), estima-se que a salinidade do solo afete de 0,3 a 1,5 milhão de hectares de terras agrícolas anualmente, além de reduzir a produtividade em outros 20 a 46 milhões de hectares. O Departamento de Agricultura dos Estados Unidos também alerta que cerca de 10 milhões de hectares de terras aráveis são perdidos anualmente devido à salinização, sodificação e desertificação. Ainda segundo a FAO (2021), 34% das terras agrícolas já estão degradadas por atividades humanas, agravando a pressão sobre os recursos de solo, terra e água.

A salinização dos solos afeta as plantas de maneiras variadas, dependendo da espécie ou cultivar. Esse processo é impulsionado por fatores ambientais naturais e por ações humanas, como práticas de irrigação inadequadas. Estudos de Walter *et al.* (2018) e Van Zelm *et al.* (2020) destacam que a salinidade excessiva reduz o crescimento das plantas, comprometendo a produtividade agrícola. Azevedo *et al.* (2018) afirmam que a salinização dos solos e das águas subterrâneas e superficiais é um problema sério de degradação ambiental, especialmente em regiões áridas e semiáridas. Esses processos têm causado impactos negativos crescentes na produtividade agrícola em várias partes do mundo, levando à redução da fertilidade do solo e dificultando o cultivo, comprometendo a segurança alimentar e o desenvolvimento sustentável nessas regiões.

2.2 EFEITO DOS SAIS NAS PLANTAS

A salinidade afeta o crescimento das plantas principalmente por meio de efeitos osmóticos, tóxicos e pela interferência na absorção de nutrientes essenciais, conforme Hasanuzzaman (2022). A salinidade do solo reduz a disponibilidade de água para as plantas, diminuindo o potencial osmótico da solução do solo e impactando negativamente as trocas gasosas foliares das plantas. Como resultado, há menos eficiência na fotossíntese e no crescimento das plantas. Além disso, Ahluwalia (2021) destaca que a redução da água disponível contribui para o estresse hídrico, comprometendo ainda mais o desenvolvimento vegetal.

A exposição de plantas a altos níveis de sais na solução do solo pode inibir o crescimento e retardar os processos de desenvolvimento de várias maneiras, incluindo desequilíbrio osmótico, citotoxicidade induzida pelo acúmulo de Na^+ e Cl^- , bem como inconsistências nutricionais (El-Taher *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2024). Todos os principais processos fisiológicos, como a fotossíntese e a produção de energia, também são afetados pelo estresse salino. A salinidade reduz a capacidade das plantas de absorver água, causando diminuição do crescimento e prejuízos metabólicos semelhantes aos causados pelo estresse hídrico e térmico (El-Taher *et al.*, 2022).

O estresse salino provoca o fechamento dos estômatos, reduzindo a transpiração das plantas como estratégia para minimizar a perda de água para o ambiente (Pereira Filho *et al.*, 2019). Esse fenômeno também afeta diretamente o Fotossistema II (PSII), inibindo a fotólise da água, essencial à obtenção de elétrons na fotossíntese. Isso compromete o processo fotoquímico (Stefanov *et al.*, 2024). Além disso, há redução do teor de pigmentos fotossintéticos, agravando os impactos no crescimento e desenvolvimento das plantas, como observado por Oliveira (2018). Corroborando esse ponto, Stefanov *et al.* (2024) descrevem que o estresse salino tem efeitos variados na composição de pigmentos em diferentes espécies vegetais.

O estresse salino também restringe a absorção de água e nutrientes minerais pelas plantas, afetando o metabolismo, a expansão celular e a produção de fotoassimilados, o que leva à redução no crescimento e na produtividade agrícola (Guilherme *et al.*, 2021; Sousa *et al.*, 2021). Quando presente de forma contínua ao longo das fases fenológicas, o estresse salino impacta negativamente a altura das plantas, a fotossíntese, a transpiração, a condutância estomática e a temperatura foliar, como observado em cultivos de feijão-caupi (Souza *et al.*, 2023).

Estresses abióticos, como o déficit hídrico e a salinidade, representam grandes desafios

para a agricultura global. Esses fatores afetam tanto o desenvolvimento das plantas quanto a produtividade das culturas. Sob estresse salino, as plantas enfrentam dificuldades em absorver água do solo e reduzem a perda de água, fechando os estômatos, o que diminui a transpiração. A fotossíntese, por sua vez, é prejudicada devido ao estomático, à redução da assimilação de carbono e à diminuição de pigmentos fotossintéticos, fluorescência da clorofila e equilíbrio iônico (Praxedes *et al.*, 2022).

2.3 SEMENTES CRIOULAS: IMPORTÂNCIA

As sementes crioulas são aquelas multiplicadas artesanalmente por comunidades tradicionais do campo, conservando não apenas seu patrimônio genético, como também o conhecimento acumulado ao longo de gerações pela seleção e cuidado de seus guardiões. Essas sementes apresentam alta diversidade, sendo consideradas um recurso regenerativo e de grande diversidade genética, proveniente da riqueza cultural e da relação estreita e dinâmica que diversas comunidades estabelecem com o ambiente e o território em que vivem. Além disso, representam um patrimônio genético e cultural dos povos tradicionais, que atuam como conservadores da agrobiodiversidade (Araújo *et al.*, 2013).

As variedades tradicionais ou locais são altamente adaptadas aos ambientes onde são manejadas e conservadas, desempenhando papel crucial na autonomia das famílias agricultoras e constituindo fator essencial de segurança alimentar (Praxedes *et al.*, 2022). Essas sementes garantem autonomia aos agricultores, promovendo geração de renda, redução de custos produtivos e soberania alimentar e nutricional. Tais características são fundamentais para estimular a permanência das famílias no campo, aliadas à diversificação produtiva (Lima; Forti, 2020).

As sementes, como garantia de sobrevivência para as espécies vegetais, representam diversidade e continuidade genética (Lima, 2020). A Lei nº 13.123, de 20 de maio de 2015, sobre o Patrimônio Genético, reconhece que as variedades tradicionais, cultivadas e preservadas por comunidades tradicionais, agricultores familiares e povos indígenas, são transmitidas entre gerações e adaptadas aos ambientes onde são cultivadas (Brasil, 2015).

Por não serem geneticamente modificadas, as sementes crioulas possuem maior variabilidade genética, resultando em diferentes formas, tamanhos e cores ao longo do tempo, fruto da seleção realizada por seus guardiões (Brasil, 2015). Essa variabilidade, aliada à

adaptação ao ecossistema em que são cultivadas, reduz a dependência dos agricultores em relação a insumos externos, especialmente os sintéticos (Silva; Sant'ana, 2022).

A adaptação ao solo, clima e práticas de manejo das comunidades rurais torna as sementes crioulas um recurso estratégico, abrangendo questões ambientais, sociais e econômicas (Silva; Sant'ana, 2022). Portanto, essas sementes representam um patrimônio essencial da biodiversidade, integrando características naturais e culturais moldadas por um processo consciente de seleção realizado pelos agricultores, refletindo seu modo de vida (Pereira; Dal Soglio, 2020).

Dentre as culturas de destaque no contexto das sementes crioulas está o feijão-caupi. Devido à sua importância como fonte de emprego e renda, aliada ao alto valor nutricional – com teores elevados de proteínas, energia, fibras alimentares e minerais – e à facilidade de produção e acessibilidade, o feijão-caupi se destaca como uma das principais culturas alimentares. Esse cultivo é especialmente relevante em regiões tropicais e subtropicais com instabilidade pluviométrica e baixo nível tecnológico, como ocorre em algumas localidades do Nordeste brasileiro (Bezerra *et al.*, 2014).

O feijão-caupi é uma leguminosa de grande relevância social e econômica, amplamente cultivada na região Nordeste do Brasil, assim como em outras regiões tropicais e subtropicais do mundo. Adaptado às condições semiáridas, é cultivado tanto em sistemas de sequeiro quanto irrigados, destacando-se como importante fonte proteica. Suas vagens verdes e sementes secas fornecem proteínas, vitaminas e minerais, sendo também utilizadas como forragem e adubo verde (Prazeres *et al.*, 2015; Oliveira *et al.*, 2018).

Além de sua relevância alimentar para humanos e animais, as sementes secas do feijão-caupi possuem alto valor nutricional, com níveis de proteína variando entre 20,0% e 39,4%, e baixo teor de gordura (3,1% a 30,4%) (El-Taher *et al.*, 2022). A cultura ocupa aproximadamente 14 milhões de hectares globalmente, com produção anual de 4,5 milhões de toneladas concentrada na África, Ásia e América. O feijão-caupi apresenta notável capacidade de fixar nitrogênio atmosférico, o que lhe confere maior tolerância a condições áridas e semiáridas em comparação com outras culturas (Conab, 2024).

A semelhança entre as condições edafoclimáticas da região Nordeste brasileira e o local de origem do feijão-caupi, a África, torna essa região a principal área de cultivo da espécie no Brasil (Jesus *et al.*, 2023). Dados da CONAB (2024) indicam que o Brasil ocupa a terceira posição mundial na produção de feijão-caupi, com 94,5% da área cultivada concentrada nas regiões Norte e Nordeste. Durante a colheita de 2023/2024, a produtividade média nacional foi

de 0,449 t ha⁻¹, com destaque para o estado de Mato Grosso, no Centro-Oeste, onde a produtividade alcançou 1,1 t ha⁻¹, apesar da área plantada ser relativamente pequena (5,4 mil hectares).

2.5 TOLERÂNCIA DO FEIJÃO-CAUPI À SALINIDADE

O feijão-caupi é moderadamente tolerante à salinidade, com limites de salinidade da água de irrigação entre 3,3 dS m⁻¹ e 4,9 dS m⁻¹ no extrato de saturação (Ayers e Westcot, 1999). Contudo, a cultura é predominantemente manejada por pequenos agricultores, que muitas vezes negligenciam aspectos técnicos de manejo (Romanoski *et al.*, 2022).

Sob condições de estresse salino, há redução da produtividade do feijão-caupi devido à diminuição do potencial hídrico, menor taxa de sobrevivência, redução do vigor inicial, do crescimento, da atividade fotossintética e ao acúmulo excessivo de íons Cl⁻ e Na⁺, bem como de espécies reativas de oxigênio. A redução das taxas fotossintéticas em variedades sensíveis está associada principalmente à diminuição da condutância estomática (Praxedes *et al.*, 2022).

Estudos também indicam que o estresse salino pode intensificar a eficiência do fotossistema II em variedades mais tolerantes, aumentando a assimilação de CO₂ e a eficiência de carboxilação (Praxedes *et al.*, 2022). O manejo adequado da água disponível no solo é essencial para compreender as perdas de produtividade em condições de déficit hídrico, conforme observado por Hara *et al.* (2022). Oliveira *et al.* (2018) destacaram os impactos negativos da salinidade na condutância estomática do feijão-caupi, evidenciando a influência direta do aumento da salinidade sobre a redução dessa variável fisiológica. Esses dados reforçam a importância do conhecimento técnico para mitigar os efeitos adversos da salinidade sobre a cultura.

2.6 SILÍCIO COMO ATENUANTE NO ESTRESSE SALINO

O silício (Si) tem se destacado como estratégia promissora para mitigar os efeitos adversos do estresse salino em plantas. Embora não seja considerado um nutriente essencial, é amplamente reconhecido como elemento benéfico devido ao seu papel na proteção contra condições de estresse abiótico e biótico (Kurdali *et al.*, 2018; Campos *et al.*, 2020). O Si é comumente encontrado na natureza como dióxido de silício (SiO₂) e em formas mais acessíveis

às plantas, como silicatos de cálcio e de potássio, que têm se mostrado eficazes no manejo agrícola em ambientes adversos (Bakhat *et al.*, 2018).

Dentre os mecanismos de ação, o silício promove a rigidez estrutural das plantas, auxiliando na interceptação de luz e na eficiência da fotossíntese por meio da deposição de sílica amorfa na parede celular (Hassan *et al.*, 2024). Além disso, estudos têm demonstrado que a aplicação de Si reduz o impacto do estresse salino em plantas como feijão, trigo, soja e quinoa, favorecendo o aumento da área foliar, a síntese de clorofilas e a atividade fotossintética (Tahir *et al.*, 2012). No feijão, por exemplo, a suplementação com Si foi eficaz em mitigar os efeitos negativos do NaCl, aumentando a porcentagem de germinação e reduzindo o impacto na condutância estomática e na área foliar (Nunes *et al.*, 2013).

A aplicação de silicatos de cálcio e de potássio tem ganhado relevância devido à sua eficácia em melhorar a integridade das membranas celulares, a eficiência no uso da água e a estabilidade fisiológica em condições de salinidade e déficit hídrico (Neves *et al.*, 2019; Khanghahi *et al.*, 2019). Estudos específicos também apontam que o Si aplicado via solo melhora a arquitetura das plantas, ao passo que a aplicação foliar contribui para a ativação de enzimas e a síntese de proteínas e amidos, além de atuar como barreira física contra pragas (Debona *et al.*, 2017; Souri *et al.*, 2021).

Embora os benefícios do silício em condições de estresse sejam amplamente documentados, ainda há lacunas no entendimento mecanístico de sua ação, especialmente em nível celular e molecular. Investigações adicionais são necessárias para explorar completamente o potencial do Si na agricultura, contribuindo para a formulação de práticas agronômicas mais resilientes (Ullah *et al.*, 2024).

Portanto, o uso de silício, seja na forma de silicatos ou como suplemento direto, emerge como estratégia crucial no manejo do estresse salino em culturas moderadamente tolerantes, como o feijão-caupi, favorecendo o aumento da produtividade e a resiliência das plantas em ambientes agrícolas adversos.

2.7 FORMAS DE APLICAÇÃO DE SILÍCIO

O silício pode ser aplicado às plantas por diferentes vias, como solo, foliar ou fertirrigação, sendo a escolha dependente do tipo de fertilizante disponível e das necessidades específicas da cultura. A aplicação via fertirrigação apresenta a vantagem de reduzir a demanda por mão de obra, ao passo que a aplicação via solo, frequentemente em forma de silicato de

cálcio (CaSiO_3), contribui significativamente para a melhoria da qualidade do solo, como no aumento da capacidade de troca de cátions e correção da acidez, além de fornecer cálcio para as plantas (Ponce *et al.*, 2022;).

O silício aplicado no solo é absorvido pelas raízes juntamente com a água e transportado pela planta no fluxo transpiratório, acumulando-se na cutícula e formando uma barreira física contra pragas e doenças (Bakhat *et al.*, 2018). Essa via também tem mostrado efeitos positivos na redução da transferência de metais pesados, pela elevação do pH do solo ou pela formação de complexos com a sílica, além de aliviar o estresse salino por meio da diminuição do dano oxidativo e da peroxidação lipídica, melhorando a capacidade fotossintética e a homeostase iônica (Kafi; Rahimi, 2011; Neves *et al.*, 2019). A suplementação com silicatos no solo, por sua vez, atua de maneira mais abrangente, neutralizando íons H^+ presentes na solução do solo por meio da formação de hidroxilas, o que favorece o desempenho das plantas em condições adversas (Schmitt, 2022). Esse efeito de neutralização é particularmente útil em solos ácidos ou salinos, onde a aplicação de silício pode melhorar o crescimento e a produtividade das plantas.

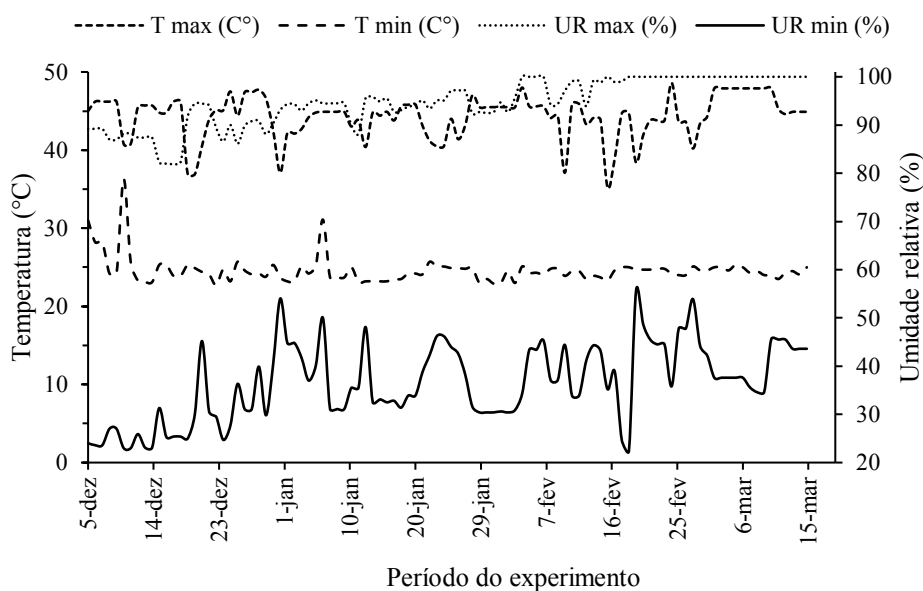
A aplicação de silício via foliar é especialmente eficaz para culturas sensíveis, como o feijão-caupi, sendo uma estratégia relevante para ambientes com estresse salino. Essa prática regula o crescimento e aumenta a produção de grãos, além de potencialmente reduzir a necessidade de defensivos agrícolas devido ao efeito protetor do Si contra insetos e doenças (Ponce *et al.*, 2022).

Dessa forma, a escolha da forma de aplicação do Si deve considerar tanto as características do solo quanto as necessidades da cultura, com base em estudos específicos sugerem variações na dose e na resposta das plantas ao tratamento (Etesami; Jeong, 2018).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em ambiente protegido (casa de vegetação), em vasos, no campus leste da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), localizado na BR 110, km 47, no município de Mossoró-RN. De acordo com Alvares *et al.* (2013), o clima da região é quente e seco, classificado como semiárido BSh (Koppen-Geiger), com precipitação média de 673,9 mm por ano, temperatura média anual de 27,4 °C e umidade relativa do ar média de 68,9%. Durante o ciclo da cultura, as condições ambientais foram monitoradas com o auxílio de um termohigrômetro instalado dentro da casa de vegetação.

Figura 1. Dados de temperatura máxima, mínima e umidade relativa coletados dentro da casa de vegetação de dezembro a março de 2024.



Fonte: Autoria própria (2025)

3.1 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

A pesquisa foi conduzida em delineamento de blocos casualizados (DBC), em um esquema fatorial 5x5, com quatro repetições. Foram avaliadas cinco variedades crioulas de feijão-caupi: Pingo de Ouro, Costela de Vaca, Paulistinha, Sempre verde e Ceará submetidas a cinco tratamentos: T1 – solo não salino (controle); T2 – solo salino com 10,34 dS m⁻¹; T3 – solo salino + 1,3 g planta⁻¹ de Si (via solo), na forma de CaSiO₃; T4 – solo salino + 0,15 g L⁻¹ de Si (via foliar), na forma de K₂SiO₃; e T5 – solo salino com os tratamentos combinados de

T3 e T4.

Figura 2. Croqui do experimento com a disposição das parcelas e seus respectivos tratamentos.

B3V2T2	B3V4T4	B3V1T5	B3V3T1	B3V5T5	B3
B3V4T5	B3V1T3	B3V2T4	B3V4T1	B3V3T4	
B3V1T2	B3V4T3	B3V3T5	B3V1T1	B3V5T2	
B3V3T3	B3V2T5	B3V3T2	B3V5T1	B3V5T4	
B3V1T4	B3V2T3	B3V4T2	B3V2T1	B3V5T3	
B1V4T3	B1V1T3	B1V4T5	B1V1T1	B1V5T4	B1
B1V1T2	B1V3T2	B1V5T5	B1V2T1	B1V5T3	
B1V3T5	B1V2T3	B1V2T2	B1V5T1	B1V2T4	
B1V5T2	B1V3T4	B1V1T4	B1V4T1	B1V2T5	
B1V4T4	B1V3T3	B1V1T5	B1V3T1	B1V4T2	
B2V3T3	B2V5T3	B2V3T2	B2V5T1	B2V4T4	B2
B2V4T3	B2V1T2	B2V3T4	B2V1T1	B2V3T5	
B2V4T2	B2V1T3	B2V1T4	B2V2T1	B2V5T4	
B2V2T5	B2V1T5	B2V5T5	B2V3T1	B2V4T5	
B2V2T4	B2V2T2	B2V2T3	B2V4T1	B2V5T2	
B4V5T2	B4V2T2	B4V1T4	B4V3T1	B4V1T2	B4
B4V1T3	B4V4T2	B4V3T5	B4V4T1	B4V4T4	
B4V3T2	B4V5T3	B4V5T4	B4V1T1	B4V2T5	
B4V3T3	B4V5T5	B4V4T3	B4V5T1	B4V2T4	
B4V3T4	B4V2T3	B4V4T5	B4V2T1	B4V1T5	

TRATAMENTOS	
T1	Controle
T2	10,34 dS m ⁻¹
T3	T2 + 1,30 g planta ⁻¹ de Si (solo)
T4	T2 + 0,15 g L ⁻¹ de Si (foliar)
T5	T2 + T3 + T4

VARIEDADES	
V1	Pingo de ouro
V2	Costela de vaca
V3	Paulistinha
V4	Sempre verde
V5	Ceará

B1	Bloco 1
B2	Bloco 2
B3	Bloco 3
B4	Bloco 4

Fonte: Autoria própria (2025)

3.2 CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO

As sementes utilizadas no experimento foram adquiridas de coleções mantidas por guardiões de sementes crioulas, pertencentes a comunidades rurais localizadas em municípios da região Oeste do estado do Rio Grande do Norte. Na semeadura, foram utilizadas dez sementes por vaso. Aos quatro dias após a germinação, foi realizado o primeiro desbaste, deixando três plantas por vaso. O segundo desbaste ocorreu quinze dias após a semeadura, reduzindo para apenas uma planta por vaso.

O experimento foi acompanhado diariamente para monitorar, de forma preventiva, o surgimento de pragas e/ou doenças nas plantas. Durante o período experimental, foi observada a presença de mosca-branca (*Bemisia tabaci*) e *Xanthomonas axonopodis* pv., ambas com baixa incidência.

A semeadura foi realizada em vasos com capacidade para 20 kg de solo, contendo solo

não salino ou solo salino, conforme os tratamentos. O solo utilizado foi um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico argissólico (EMBRAPA, 2018), coletado na profundidade de 0–30 cm na Fazenda Experimental Rafael Fernandes, pertencente à Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), localizada no distrito de Lagoinha, zona rural do município de Mossoró-RN. O solo foi coletado, seco ao ar, destorroado, peneirado em malha de 2,0 mm e amostrado para análises físicas e químicas, conforme metodologia descrita por Teixeira *et al.* (2017) (Tabela 1).

Tabela 1. Atributos químicos do extrato de saturação dos solos utilizados antes do experimento.

Solo	pH	CEbes	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	CL ⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ³⁻	RAS
	(água)	dS m ⁻¹	mmolc L ⁻¹							(mmol L ⁻¹) ^{0,5}
Salino	7,4	10,34	0,6	65,9	0,52	0,42	24	0	0,81	96,75
Não salino	8,4	1,59	0,3	12,9	0,24	0,39	2	1,66	0,93	23

Fonte: Autoria própria (2025). Potencial hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes, dS m⁻¹), potássio (K⁺, mmolc L⁻¹), sódio (Na⁺, mmolc L⁻¹), cálcio (Ca²⁺, mmolc L⁻¹), magnésio (Mg²⁺, mmolc L⁻¹), cloreto (Cl⁻, mmolc dm⁻³), bicarbonato (HCO₃³⁻, mmolc dm⁻³), sulfato (SO₄²⁻, mmolc dm⁻³) e razão de adsorção de sódio (RAS, (mmolc dm⁻³)_{0,5}) do extrato de saturação do solo utilizados no experimento.

A salinização do solo foi realizada antes da semeadura, por meio da dissolução de NaCl (sem iodato) aplicado via irrigação nos tratamentos com condutividade elétrica de 10,34 dS m⁻¹. A dose de sal necessária foi calculada utilizando a equação 1, proposta por Rhoades *et al.* (2000):

$$C = 640 (CEes - CEesi) Ms \quad \text{Eq. 1}$$

Onde:

C – quantidade de sal (mg L⁻¹);

CEes – valor pré-estabelecido da condutividade elétrica do extrato de saturação do solo (dS m⁻¹);

CEesi – valor inicial da condutividade elétrica do extrato de saturação do solo (dS m⁻¹);

Ms – massa do solo em peso seco (kg).

A dose de sal foi ajustada com base na massa total de solo para atender a todos os tratamentos com solo salino.

3.3 MANEJO DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM

O sistema de irrigação foi composto por eletrobombas do modelo BAV1118-02UC, invensys[®] 220 V, 60 Hz e 34 W. Esse sistema foi instalado em um reservatório com capacidade

para 100 L e conectado em mangueiras de 16 mm equipadas com gotejadores autocompensantes de vazão de 1,3 L h⁻¹.

A irrigação foi realizada utilizando água de abastecimento local (Tabela 2). A lâmina de irrigação foi determinada por lisimetria de pesagem, medindo-se a variação do peso do solo no vaso, ajustada para 23 kg. Esse manejo considerou a entrada de água irrigada, bem como as saídas por consumo das plantas e evaporação.

Tabela 2. Caracterização química da fonte hídricas utilizadas.

Fontes Hídricas	pH	CE dS m ⁻¹	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	RAS ²	Dureza mg l ⁻¹
				----- mmol _{cL} ⁻¹ -----							
Abastecimento	7,65	0,54	0,22	3,72	0,63	0,41	2,40	0,68	3,11	5,18	51,75

Fonte: Autoria própria (2025). Potencial hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica do extrato de saturação (CEes, dS m⁻¹), potássio (K⁺, mmolc L⁻¹), sódio (Na⁺, mmolc L⁻¹), cálcio (Ca²⁺, mmolc L⁻¹), magnésio (Mg²⁺, mmolc L⁻¹), cloreto (Cl⁻, mmolc dm⁻³), bicarbonato (HCO₃⁻, mmolc dm⁻³), sulfato (SO₄²⁻, mmolc dm⁻³) e razão de adsorção de sódio (RAS, (mmolc dm⁻³)_{0,5}) do extrato de saturação do solo utilizados no experimento.

3.4 ADUBAÇÃO

3.4.1 Adubação silicatada

A adubação silicatada via solo foi realizada com silicato de cálcio puro (CaSiO₃), contendo 22,00% de cálcio, 36,49% de silício e 41,51% de oxigênio. Foi aplicada uma dose equivalente a 1,3 g planta⁻¹ de Si, correspondendo a 3,6 g planta⁻¹ de CaSiO₃, ao redor do caule das plantas, conforme recomendação de Souza *et al.* (2020). A dose foi dividida em três parcelas de 1,3 g planta⁻¹, aplicadas 15, 32 e 38 dias após a semeadura, correspondendo às fases fenológicas V1, V5 e V9 do feijão-caupi (Santos *et al.*, 2022).

A adubação silicatada via foliar foi realizada nos mesmos dias da adubação via solo, utilizando o silicato de potássio do produto comercial Prosilicon®, com densidade de 1,31 g mL⁻¹ e contendo 10% de Si e 10% de K₂O. A concentração aplicada foi de 0,15 g L⁻¹ de Si, na forma de K₂SiO₃ (Santos *et al.*, 2022). A solução foi pulverizada sobre as folhas das plantas, utilizando 50 ml planta⁻¹, divididos em três aplicações de 10 ml, 20 ml e 20 ml, respectivamente (Sá *et al.*, 2015b).

3.4.2 Adubação com macro e micronutrientes

A fertilização com nitrogênio, potássio e fósforo (NPK) foi realizada via fertirrigação, parcelada em quatro aplicações mensais. A dose aplicada seguiu a recomendação de Novais *et*

al. (1991), ajustada para 50% da dose, correspondendo a 50 mg de N, 150 mg de P₂O₅ e 75 mg de K₂O por dm³ de solo. As fontes de nutrientes foram ureia, MAP e cloreto de potássio.

A adubação com micronutrientes foi feita via foliar, em cinco aplicações quinzenais, utilizando o fertilizante Liqui-Plex Fruit®, na proporção de 3 ml L⁻¹ de calda, conforme a recomendação do fabricante (Tabela 3).

Tabela 3. Caracterização química do fertilizante foliar Liqui-Plex Fruit®.

Composição nutricional								
N	Ca	S	B	Cu	Mn	Mo	Zn	C.O
g l ⁻¹								%
73,5	14,7	77,91	14,7	0,74	73,5	1,47	73,5	2,35

Fonte: Autoria própria (2025). N – Nitrogênio; Ca - Cálcio; S – Enxofre; B – Boro; Cu – Cobre; Mn – Manganês; Mo – Molibdênio; Zn – Zinco; CO – carbono orgânico.

3.5 VARIÁVEIS ANALISADAS

3.5.1 Condutividade elétrica e pH do extrato de saturação do solo

A análise da condutividade elétrica (CE) e do pH do extrato de saturação foi conduzida para avaliar as condições químicas do solo submetido aos diferentes tratamentos experimentais. Para isso, amostras de solo representativas de cada parcela foram coletadas ao fim do experimento.

As amostras de solo foram devidamente homogeneizadas e submetidas à extração do extrato de saturação, conforme metodologia descrita por Teixeira *et al.* (2017). Esse procedimento consistiu em adicionar água destilada ao solo até alcançar o ponto de saturação, caracterizado pela formação de um brilho superficial sem excesso de água livre. O material saturado foi deixado em repouso por 24 horas para estabilização, seguido da sucção a vácuo do extrato de saturação do solo (Richards, 1954).

A CE foi determinada no extrato de saturação utilizando um condutivímetro calibrado com soluções padrão de KCl. A CE foi expressa em decisiemens por metro (dS m⁻¹), sendo interpretada como um indicativo do nível de salinidade do solo.

Na mesma amostra, foi medido o pH com o auxílio de um pHmetro digital previamente calibrado com soluções tampão de pH 4,0 e 7,0. Essa análise forneceu informações sobre a acidez ou alcalinidade do solo em cada tratamento.

3.5.2 Trocas gasosas foliares e pigmentos fotossintetizantes

Aos 45 dias após a semeadura, durante a fase de floração, foram analisadas as trocas gasosas das plantas no período entre 6h00 e 9h00 da manhã. As avaliações foram realizadas em folhas maduras localizadas no terço superior de cada planta, utilizando um analisador portátil de gás carbônico por infravermelho (IRGA), modelo LCPro+ Portable Photosynthesis System® (ADC Bio Scientific Limited, UK), com controle de temperatura ajustado para 25 °C, irradiância de 1200 $\mu\text{mol f\acute{o}tons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e fluxo de ar de 200 mL min^{-1} . Foram mensuradas a Taxa de assimilação de CO_2 (A) ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$); Transpiração (E) ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$); Condutância estomática (gs) ($\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$); Concentração interna de CO_2 (Ci) e Temperatura foliar. A partir desses dados, foram calculadas a eficiência no uso da água ($\text{EUA} = \text{A/E}$) [$(\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}) (\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1})^{-1}$] e a eficiência instantânea da carboxilação ($\text{EICi} = \text{A/Ci}$) (Fernandes *et al.*, 2020).

Juntamente com as trocas gasosas, foram feitas as determinações dos teores de clorofila *a*, *b* e total (*t*) pelo método indireto utilizando um clorofilômetro marca ClorofiLOG modelo CFL1030, operado conforme as instruções do fabricante (FALKER® Automação Agrícola, Brasil). Nesse aparelho, as unidades de mensuração denominadas Índice de Clorofila Falker (ICF) são produtos de fotodiodos que emitem em 635, 660 e 880 nm. As determinações foram feitas sempre numa mesma folha. Em cada folha, foram feitas três leituras, no terço médio da lâmina, para se obter um valor médio.

3.5.3 Variáveis de crescimento

Após as análises fisiológicas, foram avaliadas as seguintes variáveis de crescimento: Comprimento do ramo principal (CRP), medido com trena do colo da planta até a última inserção foliar; Diâmetro do caule (DC), medido a 1,0 cm do colo com paquímetro digital e Número de folhas (NF) totalmente expandidas.

3.5.4 Concentrações foliares de nutrientes e sódio

A matéria seca das folhas foi triturada em moinho de aço tipo Willey e armazenada em sacos plásticos etiquetados. No laboratório, o material passou por digestão em ácido nítrico (HNO_3 98% p.a.) em forno micro-ondas para obtenção do extrato. As concentrações foliares totais de potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e sódio (Na^+) foram determinadas conforme EMBRAPA (2009), utilizando Espectrômetro de chama para análises de Na e K e

Espectrômetro de Absorção Atômica (AAS) para Ca e Mg. Com os dados, foram calculadas as relações Na^+/K^+ , $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ e $\text{Na}^+/\text{Mg}^{2+}$.

3.5.5 Análise de silício foliar

A extração de silício nas folhas secas trituradas foi realizada utilizando o método de oxidação da matéria orgânica por digestão com ácido nítrico (HNO_3 98% p.a.), conforme protocolo de Korndörfer (2004). A leitura do silício foi realizada em espectrofotômetro UV-Vis a 410 nm. Após a preparação das amostras, foi adicionada uma solução de molibdato de amônio e HCl, cuja reação gerou coloração amarela nas amostras contendo silício. A intensidade da cor, medida entre 5 e 15 minutos após a reação, foi diretamente proporcional à concentração de silício na solução.

3.5.6 Componentes de produção

Quando as variedades crioulas atingiram o estágio fenológico R9 (maturação) e as vagens adquiriram cor e brilho característicos, foi realizada a colheita. No laboratório, foram determinados: Número de vagens por planta (NVP); Produção por planta (PROD) (g) e comprimento de vagem. Também foram mensurados o comprimento de sementes (COM), largura de sementes (LAR) e espessura de sementes (ESP) com auxílio de paquímetro digital.

3.6 Análises estatísticas

Os dados foram analisados por meio da análise de variância, tanto os fatores isolados quanto a interação entre os fatores. Para os tratamentos, as médias foram comparadas pelo teste de Scott-Knott. No caso das variedades crioulas, utilizou-se o teste LSD para comparação das médias, ambos ao nível de 5% de significância, com auxílio do *software* estatístico SISVAR® (Ferreira, 2019).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DO EXTRATO DE SATURAÇÃO E PH DO SOLO APÓS O EXPERIMENTO

Houve efeito isolado do fator tratamento ($p \leq 0,05$) para as variáveis CE e pH (Tabela 4).

Tabela 4. Resumo da análise de variância para as variáveis condutividade elétrica CEes (dS m^{-1}) e pH do extrato de saturação do solo após o experimento.

FV	CE	pH
Bloco	0,2510 ^{NS}	0,3928 ^{NS}
Variedade	0,9057 ^{NS}	0,0634 ^{NS}
Tratamento	0,0000**	0,0003**
Variedade x Tratamento	0,1722 ^{NS}	0,1781 ^{NS}
CV (%)	26,86	2,12

Fonte: Autoria própria (2025). ** significativo a 1% ($p \leq 0,01$); * significativo a 5% ($p \leq 0,05$); ^{NS} não significativo. Variedade – corresponde as cinco variedades estudadas: Pingo de Ouro, Costela de vaca, Paulistinha, Sempre verde e Ceará; Tratamento – Corresponde aos cinco tratamentos estudados: T1 – solo não salino (controle); T2 – solo salino com $6,0 \text{ dS m}^{-1}$; T3 – solo salino + $1,3 \text{ g planta}^{-1}$ de Si (via solo), na forma de CaSiO_3 ; T4 – solo salino + $0,15 \text{ g L}^{-1}$ de Si (via foliar), na forma de K_2SiO_3 ; e T5 – solo salino com os tratamentos combinados de T3 e T4. ; CV – coeficiente de variação.

A CE do solo variou entre os tratamentos (Tabela 5), refletindo a presença de sais e o efeito das diferentes formas de aplicação de silício. O menor valor de CE foi observado no T1, registrando média de $2,89 \text{ dS m}^{-1}$, inferior aos demais tratamentos. Entre os solos salinos, o maior valor foi encontrado em T3, com média de $9,61 \text{ dS m}^{-1}$, superando T2 e T5.

Tabela 5. Médias de condutividade elétrica (CEes) e pH do solo em vasos submetidos a diferentes tratamentos com silício.

Tratamento	CE	pH
T1	$2,89 \pm 0,88 \text{ C}$	$7,97 \pm 0,05 \text{ A}$
T2	$8,31 \pm 0,67 \text{ B}$	$7,59 \pm 0,11 \text{ B}$
T3	$9,61 \pm 0,63 \text{ A}$	$7,56 \pm 0,08 \text{ B}$
T4	$8,45 \pm 0,65 \text{ AB}$	$7,51 \pm 0,07 \text{ B}$
T5	$7,86 \pm 0,65 \text{ B}$	$7,69 \pm 0,08 \text{ B}$

Fonte: Autoria própria (2025). Letras maiúsculas na coluna comparam os tratamentos pelo teste LSD ao nível de 5% de probabilidade. T1 – solo não salino (controle); T2 – solo salino com $6,0 \text{ dS m}^{-1}$; T3 – solo salino + $1,3 \text{ g planta}^{-1}$ de Si (via solo), na forma de CaSiO_3 ; T4 – solo salino + $0,15 \text{ g L}^{-1}$ de Si (via foliar), na forma de K_2SiO_3 ; e T5 – solo salino com os tratamentos combinados de T3 e T4. Média $\pm$ Erro padrão.

No que se refere ao pH, o solo não salino (T1) apresentou o valor mais alto, com média de 7,97, sugerindo condição mais alcalina em comparação aos solos salinos. Todos os tratamentos com solo salino (T2, T3, T4 e T5) apresentaram valores de pH aproximados, variando entre 7,51 e 7,69, sem diferir estatisticamente. Esses dados evidenciam que a

salinidade e as aplicações de silício não alteraram expressivamente o pH do extrato de saturação solo, mantendo-o alcalino, característica comum em solos afetados pela salinidade (Richards, 1954).

4.2 COMPONENTES DE CRESCIMENTO

Houve efeito isolado do fator variedade ($p \leq 0,01$) para as variáveis DC e CRP. Houve efeito isolado do fator tratamento para as variáveis DC, CRP e NF ($p \leq 0,01$) (Tabela 6).

Tabela 6. Resumo da análise de variância para as variáveis diâmetro do caule (DC, mm), comprimento do ramo principal (CRP, cm) e número de folhas (NF).

FV	DC	CRP	NF
Bloco	0,4428 ^{NS}	0,3314 ^{NS}	0,5570 ^{NS}
Variedade	0,0000**	0,0000**	0,0517 ^{NS}
Tratamento	0,0000**	0,0005**	0,0000**
Variedade x Tratamento	0,5193 ^{NS}	0,8506 ^{NS}	0,8119 ^{NS}
CV(%)	6,00	19,51	11,84

Fonte: Autoria própria (2025). ** significativo a 1% ($p \leq 0,01$); * significativo a 5% ($p \leq 0,05$); ^{NS} não significativo. Variedade – corresponde as cinco variedades estudadas: Pingo de Ouro, Costela de vaca, Paulistinha, Sempre verde e Ceará; Tratamento – Corresponde aos cinco tratamentos estudados: T1 – solo não salino (controle); T2 – solo salino com 6,0 dS m⁻¹; T3 – solo salino + 1,3 g planta⁻¹ de Si (via solo), na forma de CaSiO₃; T4 – solo salino + 0,15 g L⁻¹ de Si (via foliar), na forma de K₂SiO₃; e T5 – solo salino com os tratamentos combinados de T3 e T4. CV – Coeficiente de variação.

As variáveis de crescimento do feijão-caupi, incluindo diâmetro do caule (DC), comprimento do ramo principal (CRP) e número de folhas (NF), foram influenciados pelos diferentes tratamentos com silício. No T1, observaram-se as maiores médias para todas as variáveis: DC (8,65 mm), CRP (162,45 cm) e NF (11,90 folhas) (Tabela 7). Esses resultados refletem as condições favoráveis ao crescimento vegetativo em solo não salino, confirmando a maior eficiência do metabolismo sob condições de menor estresse ambiental (Taiz; Zeiger, 2017).

Tabela 7. Médias do diâmetro do caule (DC), comprimento do ramo principal (CRP) e número de folhas (NF) de feijão-caupi submetido a diferentes tratamentos com silício.

Tratamento ¹	DC	CRP	NF
T1	8,65±0,25 A	162,45±13,00 A	11,90±0,47 A
T2	6,47±0,22 B	102,62±9,41 B	7,70±0,54 B
T3	5,95±0,16 C	106,10±12,37 B	7,70±0,69 B
T4	6,74±0,23 B	110,37±14,12 B	7,65±0,46 B
T5	6,56±0,21 B	116,90±11,08 B	7,30±0,68 B

Fonte: Autoria própria (2025). Letras maiúsculas na coluna comparam os tratamentos pelo teste LSD ao nível de 5% de probabilidade. ¹T1 – solo não salino (controle); T2 – solo salino com 6,0 dS m⁻¹; T3 – solo salino + 1,3 g planta⁻¹ de Si (via solo), na forma de CaSiO₃; T4 – solo salino + 0,15 g L⁻¹ de Si (via foliar), na forma de K₂SiO₃; e T5 – solo salino com os tratamentos combinados de T3 e T4.

O estresse salino, representado pelo aumento da CEEs, apresentou efeitos sobre o DC, CRP e NF. A redução do DC reflete o impacto do estresse osmótico e da toxicidade iônica, que comprometem a divisão e expansão celular, além de causar danos às membranas e ao aparato fotossintético (Arif *et al.*, 2020; Taiz; Zeiger, 2017).

Nos tratamentos salinos, ocorreram reduções expressivas do crescimento das plantas em comparação ao controle, evidenciando os efeitos adversos do estresse salino. O menor DC foi registrado no T3 (5,95 mm), sugerindo que a aplicação de silício via solo isoladamente não foi suficiente para mitigar os danos causados pela salinidade. De forma semelhante, o CRP apresentou médias menores, variando entre 102,62 cm (T2) e 116,90 cm (T5). Para NF, as médias nos tratamentos salinos oscilaram entre 7,30 e 7,70 folhas, diminuindo o rendimento quando comparado com o controle. A redução do NF foi particularmente evidente com o aumento da CEEs, atribuída à menor produção de biomassa e ao aumento da abscisão foliar sob estresse salino. Esse impacto é explicado pela redução da eficiência da fotossíntese causada pelo fechamento estomático e pelo desequilíbrio osmótico, que inibem a absorção de água e nutrientes essenciais (Munns; Tester, 2008; Praxedes *et al.*, 2022).

A aplicação de silício nos tratamentos T4 e T5 resultou em médias ligeiramente superiores de CRP em comparação com o tratamento salino sem aplicação de silício, embora não tenha havido diferenças significativas entre os tratamentos com silício. Apesar de apresentar médias inferiores ao controle, há indícios de que o silício possa mitigar os efeitos da salinidade nessa variável. No entanto, sua eficácia pode ser influenciada por fatores como dose, método de aplicação e severidade da salinidade (Bakhat *et al.*, 2018; Hassan *et al.*, 2024).

Tabela 8. Médias do diâmetro do caule (DC) e comprimento do ramo principal (CRP) de variedades de feijão-caupi.

Variedade	DC	CRP
Pingo de ouro	6,56±0,23 c	142,20±10,25 a
Costela de vaca	7,81±0,26 a	86,06±7,43 b
Paulistinha	6,25±0,29 c	84,63±10,46 b
Sempre verde	6,63±0,25 c	123,66±10,22 a
Ceará	7,14±0,34 b	161,88±15,48 a

Fonte: Autoria própria (2025). Letras minúsculas comparam na coluna variedades de feijão-caupi pelo teste de Skott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

A Tabela 8 destaca diferenças entre as variedades no que diz respeito ao DC e CRP. A variedade Costela de vaca obteve o maior valor médio de DC (7,81 mm), ao passo que a Paulistinha registrou o menor (6,25 mm), não diferindo estatisticamente das variedades Ceará (7,14 mm) e Pingo de Ouro (6,56 mm).

Observou-se menores médias de CRP para as variedades Paulistinha e Costela de Vaca, ao passo que as variedades Pingo de ouro, Sempre verde e Ceará obtiveram os maiores valores, indicando maior vigor desses genótipos para essas variáveis. De forma geral, os dados destacam a influência da variabilidade genética entre as variedades no crescimento vegetativo, evidenciando a relevância de selecionar variedades com maior tolerância ao estresse salino.

4.3 TROCAS GASOSAS FOLIARES E PIGMENTOS FOTOSSINTETIZANTES

Houve diferença significativa para a interação entre os fatores variedade e tratamento ($p \leq 0,05$) para as variáveis gs, Chl b e Chl t e Chl a ($p \leq 0,01$). Houve efeito isolado do fator tratamento ($p \leq 0,05$) para a taxa de assimilação de CO_2 (AN) (Tabela 9).

Tabela 9. Resumo da análise de variância para as variáveis taxa de assimilação de CO_2 (AN), transpiração (E), condutância estomática (gs), clorofila a (Chl a), clorofila b (Chl b) e clorofila total (Chl t).

FV	AN	E	gs	Chl a	Chl b	Chl t
Bloco	0,0205*	0,7120 ^{NS}	0,5910 ^{NS}	0,0172*	0,4243 ^{NS}	0,1969 ^{NS}
Variedade	0,8299 ^{NS}	0,5884 ^{NS}	0,7283 ^{NS}	0,0000**	0,0000**	0,0000**
Tratamento	0,0000**	0,1390 ^{NS}	0,0412*	0,0000**	0,0000**	0,0000**
Variedade x Tratamento	0,1116 ^{NS}	0,3643 ^{NS}	0,0348*	0,0007**	0,0293*	0,0149*
CV (%)	22,47	23,28	1,73	4,52	10,18	10,46

Fonte: Autoria própria (2025). ** significativo a 1% ($p \leq 0,01$); * significativo a 5% ($p \leq 0,05$); ^{NS} não significativo. Variedade – corresponde as cinco variedades estudadas: Pingo de Ouro, Costela de vaca, Paulistinha, Sempre verde e Ceará; Tratamento – Corresponde aos cinco tratamentos estudados: T1 – solo não salino (controle); T2 – solo salino com 6,0 dS m^{-1} ; T3 – solo salino + 1,3 g planta^{-1} de Si (via solo), na forma de CaSiO_3 ; T4 – solo salino + 0,15 g L^{-1} de Si (via foliar), na forma de K_2SiO_3 ; e T5 – solo salino com os tratamentos combinados de T3 e T4. CV – Coeficiente de variação.

O tratamento T1 apresentou o maior valor médio de assimilação de CO_2 (AN), alcançando 16,04 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, superior aos tratamentos submetidos ao estresse salino (Tabela 10). Esse resultado reflete as condições favoráveis do solo não salino para a fotossíntese, corroborando estudos que indicam que ambientes com menor salinidade favorecem a eficiência fotossintética e o metabolismo das plantas (Taiz; Zeiger, 2017).

Tabela 10. Médias da taxa de assimilação de CO_2 (AN) de feijão-caupi submetido a diferentes tratamentos com silício.

Tratamento ¹	AN
T1	16,04±0,61 A
T2	9,05±0,79 C
T3	11,00±0,44 B
T4	12,15±0,72 B
T5	11,30±0,59 B

Fonte: Autoria própria (2025). Letras maiúsculas na coluna comparam os tratamentos pelo teste LSD ao nível de 5% de probabilidade. ¹T1 – solo não salino (controle); T2 – solo salino com 6,0 dS m⁻¹; T3 – solo salino + 1,3 g planta⁻¹ de Si (via solo), na forma de CaSiO₃; T4 – solo salino + 0,15 g L⁻¹ de Si (via foliar), na forma de K₂SiO₃; e T5 – solo salino com os tratamentos combinados de T3 e T4.

Nos tratamentos com solo salino, houve reduções expressivas da AN, sendo o tratamento T2 o mais prejudicado, com 9,05 µmol m⁻² s⁻¹, o que evidencia o impacto negativo da salinidade sobre a capacidade fotossintética. A utilização de silício não apresentou diferenças quanto à forma de aplicação. No entanto, os tratamentos que incluíram o fornecimento de silício às plantas mostraram resultados superiores em comparação ao tratamento T2 na ausência de silício. Esses resultados indicam que o silício pode atenuar parcialmente os efeitos prejudiciais da salinidade, corroborando estudos que destacam seu papel na melhoria da fotossíntese sob condições adversas (Bakhat *et al.*, 2018; Hassan *et al.*, 2024). A redução da AN em ambientes salinos é atribuída ao fechamento parcial dos estômatos, uma estratégia das plantas para minimizar a perda de água em resposta ao aumento da CEes. Sob estresse salino, a alta concentração de íons, como Na⁺ e Cl⁻, reduz o potencial hídrico, dificultando a absorção de água pelas plantas e promovendo desequilíbrios osmóticos e iônicos (Munns; Tester, 2008; Praxedes *et al.*, 2022).

As médias de gs (Tabela 11) variaram entre os tratamentos e genótipos, destacando diferenças no comportamento estomático. No T1, as médias de gs foram semelhantes, com a variedade Ceará apresentando o menor gs (0,057 mol m⁻² s⁻¹). Essa redução pode estar associada à menor demanda de troca gasosa para esse genótipo. No entanto, no T2, a mesma variedade apresentou o maior gs (0,177 mol m⁻² s⁻¹), possivelmente em uma tentativa de manter as trocas gasosas em um ambiente salino inicial (Oliveira *et al.*, 2018).

Tabela 11. Médias de condutância estomática (gs) de variedades crioulas de feijão-caupi submetidas a diferentes tratamentos.

Tratamento ¹	gs				
	Variedade				
	Pingo de ouro	Costela de vaca	Paulistinha	Sempre verde	Ceará
T1	0,075±0,004 aA	0,080±0,014 aA	0,067±0,016 aA	0,080±0,012 aA	0,057±0,017 aB
T2	0,072±0,018 bA	0,082±0,020 bA	0,100±0,022 bA	0,112±0,024 bA	0,177±0,010 aA
T3	0,115±0,011 aA	0,072±0,018 aA	0,067±0,027 aA	0,062±0,019 aA	0,085±0,025 aB
T4	0,070±0,022 aA	0,092±0,022 aA	0,087±0,015 aA	0,110±0,030 aA	0,070±0,014 aB
T5	0,077±0,003 aA	0,062±0,026 aA	0,115±0,024 aA	0,090±0,006 aA	0,072±0,012 aB

Fonte: Autoria própria (2025). Letras minúsculas comparam na linha variedades dentro de tratamento pelo teste de Skott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. Letras maiúsculas na coluna comparam tratamento dentro de variedades crioulas pelo teste LSD ao nível de 5% de probabilidade. ¹T1 – solo não salino (controle); T2 – solo salino com 6,0 dS m⁻¹; T3 – solo salino + 1,3 g planta⁻¹ de Si (via solo), na forma de CaSiO₃; T4 – solo salino + 0,15 g L⁻¹ de Si (via foliar), na forma de K₂SiO₃; e T5 – solo salino com os tratamentos combinados de T3 e T4.

As variedades também apresentaram respostas genótipo-dependentes aos tratamentos salinos. A variedade Ceará exibiu menores médias de gs nos tratamentos com silício, sugerindo estratégia conservadora para minimizar a perda de água. Por outro lado, as demais variedades mantiveram médias semelhantes entre si, com os tratamentos que incluíram silício demonstrando resultados superiores à ausência de silício, exceto no caso da variedade Ceará (Tabela 11).

Para as variáveis supracitadas, os tratamentos com aplicação de silício apresentaram médias semelhantes ao controle, evidenciando o papel do silício na regulação estomática e na proteção do aparato fotossintético. Trabalhos têm demonstrado que o silício contribui para a integridade das membranas celulares e reduz a peroxidação lipídica, melhorando a eficiência do uso da água e preservando a funcionalidade estomática (Debona *et al.*, 2017; Souri *et al.*, 2021).

As respostas estomáticas refletem as adaptações das plantas ao ambiente salino. Médias elevadas de gs, como as observadas na variedade Ceará em T2, indicam maior potencial de assimilação de CO₂, ao passo que médias menores sugerem uma estratégia de conservação hídrica para lidar com o estresse ambiental (Oliveira *et al.*, 2018; Bakhat *et al.*, 2018). O uso de silício mostrou-se um importante aliado na manutenção de gs para a maioria das variedades sob estresse salino, contribuindo para a estabilidade dos parâmetros fisiológicos e, conseqüentemente, para a resiliência das plantas em condições adversas.

Os resultados reforçam que o aumento da CE limita a AN e gs, impactando negativamente a fotossíntese e a produtividade do feijão-caupi. A aplicação de silício, independentemente da forma de aplicação, mostrou-se uma estratégia promissora para mitigar esses efeitos, embora sua eficácia varie entre os genótipos.

Os teores de clorofila a (Chl a) variaram entre as variedades e os tratamentos, evidenciando diferenças na eficiência fotossintética sob diferentes condições experimentais (Tabela 12). No T1, a variedade Costela de Vaca destacou-se com o maior teor de Chl a (50,95 ICF), ao passo que as demais variedades apresentaram médias inferiores e relativamente próximos, variando entre 42,42 e 45,10 ICF.

Tabela 12. Médias de clorofila a (Chl a) (ICF) de variedades crioulas de feijão-caupi submetidas a diferentes tratamentos.

Tratamento ¹	Chl a				
	Variedade				
	Pingo de ouro	Costela de vaca	Paulistinha	Sempre verde	Ceará
T1	42,42±3,22 bA	50,95±1,96 aA	44,94±0,24 bA	45,08±2,96 bA	45,10±2,08 bA
T2	41,34±0,18 bA	47,31±0,71 aAB	41,70±0,99 bA	39,74±1,02 bB	29,57±1,50 cC

T3	42,64±1,82 aA	45,03±0,91 aB	41,82±1,55 aA	34,37±2,34 bC	40,20±0,79 aAB
T4	37,89±1,54 bA	44,94±2,76 aB	43,01±2,92 aA	41,01±2,18 aAB	38,06±1,82 bB
T5	39,75±2,15 bA	45,68±1,99 aB	35,95±1,21 bB	38,44±2,66 bCB	36,03±1,11 bB

Fonte: Autoria própria (2025). Letras minúsculas comparam na linha variedades dentro de tratamento pelo teste de Skott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. Letras maiúsculas na coluna comparam tratamento dentro de variedades crioulas pelo teste LSD ao nível de 5% de probabilidade. ¹T1 – solo não salino (controle); T2 – solo salino com 6,0 dS m⁻¹; T3 – solo salino + 1,3 g planta⁻¹ de Si (via solo), na forma de CaSiO₃; T4 – solo salino + 0,15 g L⁻¹ de Si (via foliar), na forma de K₂SiO₃; e T5 – solo salino com os tratamentos combinados de T3 e T4.

No tratamento T2, houve redução geral dos teores de Chl a, com destaque negativo para a variedade Ceará, que apresentou o menor valor (29,57 ICF). Apesar da redução, a variedade Costela de Vaca manteve o maior valor (47,31 ICF), confirmando que, embora o estresse salino tenha promovido a degradação da clorofila, esse genótipo apresentou maior resiliência (Tabela 12).

No tratamento T3, apenas a variedade Sempre Verde apresentou redução dos teores de Chl a (34,37 ICF), ao passo que as demais variedades mantiveram médias semelhantes aos observados no T2. Esses resultados indicam que a aplicação de silício via solo teve efeito limitado na preservação dos teores de clorofila sob salinidade. Em T4, a variedade Costela de Vaca destacou-se novamente, alcançando 44,94 ICF, ao passo que as demais variaram entre 37,89 e 43,01 ICF, sem diferenças entre si. Esses resultados sugerem que a aplicação foliar de silício foi eficaz na manutenção dos teores de chl a, especialmente na variedade Costela de Vaca (Tabela 12).

No T5, os teores de Chl a variaram de 35,95 a 45,68 ICF, sem diferenças entre as variedades. Esse padrão sugere que a aplicação combinada de silício via solo e foliar não resultou em efeito sinérgico na preservação da clorofila. De forma geral, a variedade Costela de Vaca demonstrou maior resiliência ao estresse salino, mantendo teores superiores de Chl a na maioria das condições testadas.

Os teores de clorofila b (Chl b) nas variedades crioulas de feijão-caupi variaram entre os tratamentos, refletindo a influência das condições ambientais e do manejo nutricional (Tabela 13). No T1, a variedade Costela de Vaca destacou-se com o maior valor médio (32,94 ICF), sendo superior às demais, que variaram de 19,19 a 20,39 ICF. Esse resultado evidencia o maior potencial dessa variedade para acumular Chl b na condição controle.

Tabela 13. Médias de clorofila b (Chl b) de variedades crioulas de feijão-caupi submetidas a diferentes tratamentos.

Tratamento ¹	Chl b				
	Variedade				
	Pingo de ouro	Costela de vaca	Paulistinha	Sempre verde	Ceará
T1	19,19±2,47 bA	32,94±1,43 aA	20,86±1,39 bA	20,17±2,07 bA	20,39±2,55 bA

T2	15,25±1,89 bAB	23,97±1,26 aB	12,37±1,77 bB	14,79±1,06 bB	10,06±1,45 bB
T3	17,80±1,85 bAB	23,83±0,63 aB	13,92±1,91 cB	12,75±2,00 cB	11,85±1,65 cB
T4	14,01±2,29 bB	18,78±2,15 aC	19,55±1,58 aA	15,02±0,69 bB	12,84±1,03 bB
T5	15,41±0,57 bAB	19,70±1,40 aCB	11,14±0,77 bB	13,52±1,91 bB	11,95±0,95 bB

Fonte: Autoria própria (2025). Letras minúsculas comparam na linha variedades dentro de tratamento pelo teste de Skott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. Letras maiúsculas na coluna comparam tratamento dentro de variedades crioulas pelo teste LSD ao nível de 5% de probabilidade. ¹T1 – solo não salino (controle); T2 – solo salino com 6,0 dS m⁻¹; T3 – solo salino + 1,3 g planta⁻¹ de Si (via solo), na forma de CaSiO₃; T4 – solo salino + 0,15 g L⁻¹ de Si (via foliar), na forma de K₂SiO₃; e T5 – solo salino com os tratamentos combinados de T3 e T4.

Sob T2, todas as variedades apresentaram reduções de teores de Chl b, sendo a redução mais acentuada observada na variedade Ceará, com o menor valor médio (10,06 ICF). Apesar disso, a variedade Costela de Vaca manteve o maior teor (23,97 ICF), destacando-se pela sua maior resistência à condição salina e ao estresse salino.

No T3, as médias de Chl b permaneceram baixas em todas as variedades, semelhantemente às observadas no T2. A variedade Costela de Vaca continuou apresentando o maior teor (23,83 ICF), ao passo que as variedades Paulistinha, Sempre verde e Ceará registraram as menores médias (13,92, 12,75 e 11,85 ICF, respectivamente). Esses resultados sugerem que a aplicação de silício via solo teve efeito moderado na preservação dos teores de Chl b.

Em T4, houve leve recuperação dos teores de Chl b para a variedade Paulistinha, que atingiu a maior média (19,55 ICF). As demais variedades apresentaram médias entre 12,84 e 18,78 ICF, sem diferenças em relação aos tratamentos anteriores.

No T5, os teores de Chl b não apresentaram recuperação expressiva, com médias variando de 11,14 a 19,70 ICF. Esses resultados indicam que a combinação das duas formas de aplicação de silício não foi suficientemente eficaz para preservar os teores de Chl b nas condições testadas.

De maneira geral, a variedade Costela de Vaca demonstrou maior resiliência ao estresse salino em comparação com as demais variedades, mantendo os maiores teores de Chl b em todos os tratamentos. O silício, independentemente da forma de aplicação, não apresentou resultados satisfatórios para esta variável na maioria das variedades, exceto na variedade Paulistinha, a qual se beneficiou do com o T3, apresentando resultados semelhantes ao controle, mesmo em estresse salino. Esses resultados destacam a importância de selecionar genótipos tolerantes e de adotar estratégias de manejo adequadas para mitigar os impactos da salinidade sobre os pigmentos fotossintéticos.

Os valores médios de clorofila total (Chl t) em variedades crioulas de feijão-caupi submetidas a diferentes tratamentos são apresentados na tabela 14. No tratamento T1, a

variedade Costela de Vaca destacou-se com a maior concentração de Chl T (84,92 ICF), sendo superior às demais variedades, cujos valores variaram entre 64,10 e 69,53 ICF. Esses resultados evidenciam maior capacidade fotossintética dessa variedade em condições ideais, possivelmente associada à sua eficiência no acúmulo de pigmentos fotossintéticos.

Tabela 14. Médias de clorofila total (Chl T) de variedades crioulas de feijão-caupi submetidas a diferentes tratamentos.

Tratamento ¹	Chl t				
	Variedade				
	Pingo de ouro	Costela de vaca	Paulistinha	Sempre verde	Ceará
T1	65,20±4,46 bA	84,92±3,37 aA	69,53±1,41 bA	64,10±1,53 bA	69,20±2,50 bA
T2	59,60±1,25 bAB	70,22±3,81 aB	47,59±2,16 cC	55,98±1,62 bAB	42,78±1,84 cB
T3	58,50±5,11 bAB	70,39±4,11 aB	54,63±1,84 bBC	51,77±1,99 bB	45,05±4,17 cB
T4	58,72±3,54 aAB	60,87±3,44 aC	59,84±2,11 aB	52,73±3,25 bB	51,35±4,28 bB
T5	53,06±4,82 bB	67,00±2,36 aBC	48,57±2,88 bC	52,62±2,47 bB	47,71±1,55 bB

Fonte: Autoria própria (2025). Letras minúsculas comparam na linha variedades dentro de tratamento pelo teste de Skott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. Letras maiúsculas na coluna comparam tratamento dentro de variedades crioulas pelo teste LSD ao nível de 5% de probabilidade. ¹T1 – solo não salino (controle); T2 – solo salino com 6,0 dS m⁻¹; T3 – solo salino + 1,3 g planta⁻¹ de Si (via solo), na forma de CaSiO₃; T4 – solo salino + 0,15 g L⁻¹ de Si (via foliar), na forma de K₂SiO₃; e T5 – solo salino com os tratamentos combinados de T3 e T4.

Sob T2, houve redução generalizada dos níveis de Chl T em todas as variedades, sendo as quedas mais acentuadas observadas nas variedades Paulistinha (47,59 ICF) e Ceará (42,78 ICF). A variedade Costela de Vaca, apesar da redução em relação ao T1, manteve-se como a mais eficiente nesse tratamento, com média de 70,22 ICF. Essa diminuição dos teores de Chl t reflete os efeitos negativos do estresse salino, que intensifica a degradação dos pigmentos fotossintéticos, geralmente associada ao aumento do estresse oxidativo e à redução da atividade enzimática (Tabela 14).

Nos tratamentos T3, T4 e T5, os resultados foram variados quanto à recuperação dos níveis de Chl t. Em T3, as variedades Pingo de Ouro e Costela de Vaca apresentaram os melhores desempenhos, com médias de 58,50 e 70,39 ICF, respectivamente. Em contrapartida, as variedades Paulistinha, Sempre Verde e Ceará, mais sensíveis ao estresse salino, não apresentaram incrementos significativos, registrando médias de 54,63, 51,77 e 45,05 ICF, respectivamente (Tabela 14).

No tratamento T4, os teores de Chl t mostraram-se mais homogêneos entre as variedades. A Pingo de Ouro, Costela de Vaca e Paulistinha mantiveram os maiores valores, com médias de 58,72, 60,87 e 59,84 ICF, respectivamente. Entretanto, as demais variedades continuaram com valores reduzidos, sugerindo menor eficiência na resposta ao silício aplicado

via foliar. No T5, a aplicação combinada de silício via solo e foliar não apresentou diferença para as aplicações isoladas do elemento (Tabela 14).

4.4 TEORES FOLIARES DE NUTRIENTES, SÓDIO E SILÍCIO

Houve interação entre os fatores variedade e tratamento ($p \leq 0,05$) para as variáveis Na, K, Ca, Si, Na/Ca, Na/Mg e Na/Si. Houve efeito isolado do fator variedade ($p \leq 0,05$) para a variável Mg. Houve efeito isolado do fator tratamento ($p \leq 0,05$) para variável Mg (Tabela 15).

Tabela 15. Resumo da análise de variância para as variáveis teores foliares de sódio (Na), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), silício (Si), relações sódio/potássio (Na/K), sódio/cálcio (Na/Ca), sódio/magnésio (Na/Mg) e sódio/silício (Na/Si).

FV	Na	K	Ca	Mg	Si	Na/K	Na/Ca	Na/Mg	Na/Si
Bloco	0,8868 ^{NS}	0,8985 ^{NS}	0,5263 ^{NS}	0,2923 ^{NS}	0,4475 ^{NS}	0,6535 ^{NS}	0,4159 ^{NS}	0,4417 ^{NS}	0,5506 ^{NS}
Variedade	0,2747 ^{NS}	0,2912 ^{NS}	0,0105*	0,0119*	0,8471 ^{NS}	0,3403 ^{NS}	0,3503 ^{NS}	0,2072 ^{NS}	0,6850 ^{NS}
Tratamento	0,0000**	0,0000**	0,0000**	0,0058**	0,0000**	0,0042**	0,0025**	0,0224*	0,0000**
Variedade x Tratamento	0,0021**	0,0020**	0,0001**	0,1549 ^{NS}	0,0048**	0,0548 ^{NS}	0,0026**	0,0020**	0,0023**
CV (%)	18,04	15,22	7,41	21,94	16,55	1,90	11,50	13,01	24,84

Fonte: Autoria própria (2025). ** significativo a 1% ($p \leq 0,01$); * significativo a 5% ($p \leq 0,05$); ^{NS} não significativo. Variedade – corresponde as cinco variedades estudadas: Pingo de Ouro, Costela de vaca, Paulistinha, Sempre verde e Ceará; Tratamento – Corresponde aos cinco tratamentos estudados: T1 – solo não salino (controle); T2 – solo salino com 6,0 dS m⁻¹; T3 – solo salino + 1,3 g planta⁻¹ de Si (via solo), na forma de CaSiO₃; T4 – solo salino + 0,15 g L⁻¹ de Si (via foliar), na forma de K₂SiO₃; e T5 – solo salino com os tratamentos combinados de T3 e T4. CV – coeficiente de variação.

Os resultados dos teores foliares de sódio (Na) indicam que o aumento da CE nos tratamentos salinos promoveu acúmulo de Na⁺ nas folhas, destacando-se como um dos principais efeitos do estresse salino (Tabela 16). Esse acúmulo é um reflexo do desequilíbrio iônico causado pela presença excessiva de Na⁺ no solo, que interfere no transporte e na homeostase de outros nutrientes essenciais, como Ca²⁺, Mg²⁺ e K⁺ (Rhoades *et al.*, 1992; Munns; Tester, 2008).

Tabela 16. Médias dos teores foliares de sódio (Na) (g kg⁻¹) de variedades crioulas de feijão-caupi submetidas a diferentes tratamentos.

Tratamento ¹	Na				
	Variedade				
	Pingo de ouro	Costela de vaca	Paulistinha	Sempre verde	Ceará
T1	20,79±1,39 aC	18,17±2,40 aB	21,58±1,16 aA	16,59±1,63 aD	18,43±0,79 aB
T2	27,87±1,92 aAB	20,79±3,77 bB	25,77±0,68 bA	32,72±1,54 aA	22,36±1,43 bAB
T3	20,53±2,24 aC	27,08±2,79 aA	24,72±2,40 aA	27,35±1,44 aAB	23,15±2,55 aAB
T4	30,82±1,57 aA	23,41±2,41 bAB	26,82±1,51 aA	21,05±2,07 bCD	20,40±0,68 bAB
T5	22,10±1,16 aBC	23,68±3,26 aAB	21,58±3,64 aA	22,89±1,84 aBC	25,25±1,38 aA

Fonte: Autoria própria (2025). Letras minúsculas comparam na linha variedades dentro de tratamento pelo teste de Skott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. Letras maiúsculas na coluna comparam tratamento dentro de

variedades crioulas pelo teste LSD ao nível de 5% de probabilidade. ¹T1 – solo não salino (controle); T2 – solo salino com 6,0 dS m⁻¹; T3 – solo salino + 1,3 g planta⁻¹ de Si (via solo), na forma de CaSiO₃; T4 – solo salino + 0,15 g L⁻¹ de Si (via foliar), na forma de K₂SiO₃; e T5 – solo salino com os tratamentos combinados de T3 e T4.

O T1 apresentou os menores teores de Na⁺ em todas as variedades, o que é esperado em condições sem salinidade. A Variedade Paulistinha exibiu o maior valor de Na⁺ neste tratamento, sugerindo que, mesmo em condições favoráveis, algumas variedades podem apresentar maior susceptibilidade à absorção de Na⁺, o que pode estar relacionado à menor seletividade no transporte iônico pelas membranas radiculares (Oliveira *et al.*, 2018).

Em contraste, os tratamentos T2, T3, T4 e T5 mostraram aumento expressivo dos teores de Na⁺, com destaque para Sempre Verde no T2. Este comportamento reflete a incapacidade de algumas variedades em excluir eficientemente o Na⁺ das raízes e limitar seu transporte para a parte aérea, característica frequentemente associada à menor tolerância ao estresse salino (Taiz; Zeiger, 2017).

A aplicação de silício nos tratamentos T3, T4 e T5 resultou em diferenças notáveis nos teores de Na⁺ entre as variedades. Estudos relatam que o silício pode atuar na formação de barreiras físicas e químicas nas raízes, reduzindo a entrada de Na⁺ e promovendo maior seletividade iônica (Bakhat *et al.*, 2018; Hassan *et al.*, 2024). No entanto, os resultados mostraram que a eficácia do silício é genótipo-dependente. Por exemplo, no T4, Pingo de Ouro apresentou o maior teor de Na⁺, indicando que a aplicação foliar pode ter limitado parcialmente os benefícios esperados para algumas variedades.

A relativa uniformidade nos teores de Na⁺ no T5 sugere efeito sinérgico entre as formas de aplicação do silício, resultando em melhor regulação iônica para todas as variedades. Isso corrobora estudos que indicam que a aplicação combinada de silício pode melhorar a capacidade de exclusão de Na⁺, especialmente em condições de alta salinidade (Debona *et al.*, 2017; Praxedes *et al.*, 2022).

Os teores de potássio (K⁺) também foram influenciados pelos tratamentos e variedades (Tabela 17). No T1, os valores variaram de 21,18 g kg⁻¹ (Sempre Verde) a 26,21 g kg⁻¹ (Paulistinha), com destaque para Paulistinha, em virtude do maior acúmulo de K⁺, essencial para processos como regulação osmótica e ativação enzimática (Taiz; Zeiger, 2017).

Tabela 17. Médias dos teores foliares de potássio (K⁺) (g kg⁻¹) de variedades crioulas de feijão-caupi submetidas a diferentes tratamentos.

Tratamento ¹	K ⁺				
	Variedade				
	Pingo de ouro	Costela de vaca	Paulistinha	Sempre verde	Ceará
T1	25,42±1,40 aC	22,77±2,42 aB	26,21±1,18 aA	21,18±1,56 aD	23,03±0,79 aB
T2	32,57±1,94 aAB	25,42±3,81 bB	30,45±0,68 bA	37,47±1,56 aA	27,01±1,44 bAB

T3	25,15±2,26 aC	31,78±2,82 aA	29,39±2,42 aA	32,04±1,46 aAB	27,80±2,57 aAB
T4	35,62±1,59 aA	28,07±2,43 bAB	31,51±1,52 aA	25,68±2,09 bCD	25,56±0,68 bAB
T5	26,74±1,18 aBC	28,33±3,30 aAB	26,21±3,68 aA	27,54±2,05 aBC	29,92±1,39 aA

Fonte: Autoria própria (2025). Letras minúsculas comparam na linha variedades dentro de tratamento pelo teste de Skott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. Letras maiúsculas na coluna comparam tratamento dentro de variedades crioulas pelo teste LSD ao nível de 5% de probabilidade. ¹T1 – solo não salino (controle); T2 – solo salino com 6,0 dS m⁻¹; T3 – solo salino + 1,3 g planta⁻¹ de Si (via solo), na forma de CaSiO₃; T4 – solo salino + 0,15 g L⁻¹ de Si (via foliar), na forma de K₂SiO₃; e T5 – solo salino com os tratamentos combinados de T3 e T4.

Em T2, Sempre Verde apresentou o maior valor (37,47 g kg⁻¹), ao passo que Costela de Vaca registrou um dos menores teores (25,42 g kg⁻¹). Esse comportamento evidencia diferenças na eficiência de absorção ou redistribuição de K⁺ sob condições salinas, fator determinante para a tolerância ao estresse (Khanghahi *et al.*, 2019).

Nos tratamentos T3 e T4, as variedades responderam de forma diferenciada. Em T3, Sempre Verde e Costela de Vaca apresentaram teores mais elevados de K⁺, ao passo que Pingo de Ouro registrou o menor valor (25,15 g kg⁻¹). No T4, Pingo de Ouro destacou-se com o maior teor (35,62 g kg⁻¹), indicando que a aplicação foliar de silício pode melhorar a retenção de K⁺ em algumas variedades.

No T5, os valores foram mais uniformes entre as variedades, com Ceará apresentando o maior teor (29,92 g kg⁻¹). A menor variação entre as variedades neste tratamento pode ser atribuída ao efeito combinado do silício via solo e foliar, favorecendo a manutenção de níveis adequados de K⁺ (Debona *et al.*, 2017).

O antagonismo entre Na⁺ e K⁺ foi evidente, com o aumento da CE provocando redução dos níveis de K⁺, especialmente em tratamentos mais salinos. A capacidade de manter níveis adequados de K⁺ é crucial para a fotossíntese, o transporte de assimilados e a homeostase iônica. Dentre as variedades, Costela de Vaca apresentou menor redução relativa de K⁺, sugerindo maior eficiência no transporte seletivo e na exclusão de Na⁺ (Oliveira *et al.*, 2018; Praxedes *et al.*, 2022).

Os teores foliares de cálcio (Ca) nas variedades crioulas de feijão-caupi apresentaram variações entre os tratamentos e as variedades dentro de cada tratamento (Tabela 18), evidenciando diferenças na absorção e redistribuição deste nutriente essencial em resposta às condições testadas.

Tabela 18. Médias dos teores foliares de cálcio (Ca) (g kg⁻¹) de variedades crioulas de feijão-caupi submetidas a diferentes tratamentos.

Tratamento ¹	Ca				
	Variedade				
	Pingo de ouro	Costela de vaca	Paulistinha	Sempre verde	Ceará
T1	14,44±0,06 aC	14,14±1,92 aC	14,92±2,15 aB	13,85±2,05 aC	13,80±0,77 aD

T2	22,95±0,09 aA	19,75±2,12 bB	24,55±1,54 aA	17,70±0,71 bBC	19,77±0,39 bB
T3	20,59±0,52 aAB	23,62±2,27 aAB	24,13±0,78 aA	23,92±1,94 aA	25,88±2,00 aA
T4	17,95±0,29 bBC	14,60±1,23 cC	25,65±1,17 aA	19,56±2,21 bB	14,55±0,43 cCD
T5	19,60±0,08 bAB	24,83±2,15 aA	18,56±1,62 bB	18,50±1,33 bB	18,34±1,07 bBC

Fonte: Autoria própria (2025). Letras minúsculas comparam na linha variedades dentro de tratamento pelo teste de Skott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. Letras maiúsculas na coluna comparam tratamento dentro de variedades crioulas pelo teste LSD ao nível de 5% de probabilidade. ¹T1 – solo não salino (controle); T2 – solo salino com 6,0 dS m⁻¹; T3 – solo salino + 1,3 g planta⁻¹ de Si (via solo), na forma de CaSiO₃; T4 – solo salino + 0,15 g L⁻¹ de Si (via foliar), na forma de K₂SiO₃; e T5 – solo salino com os tratamentos combinados de T3 e T4.

No T1, os teores de Ca variaram entre 13,80 g kg⁻¹ na Variedade Ceará e 14,92 g kg⁻¹ na Variedade Paulistinha, com as demais variedades apresentando valores intermediários. Esses resultados indicam que, em condições favoráveis de cultivo, todas as variedades mantêm teores adequados de cálcio, com destaque para a Paulistinha, que demonstrou maior capacidade de acumular Ca (Tabela 18).

No T2, a salinidade elevou os teores de Ca em todas as variedades. O maior valor foi registrado na Variedade Paulistinha (24,55 g kg⁻¹), ao passo que a Sempre Verde apresentou o menor acúmulo (17,70 g kg⁻¹). Esse aumento do teor de Ca pode estar relacionado à tentativa das plantas para compensar os efeitos tóxicos do Na⁺, fortalecendo suas estruturas celulares e promovendo a homeostase iônica (Cakmak *et al.*, 2008; Taiz e Zeiger, 2017).

No T3, os teores de Ca foram mais homogêneos entre as variedades, com destaque para a Ceará, que apresentou o maior valor (25,88 g kg⁻¹). Este resultado sugere que a aplicação de silício via solo contribuiu para melhorar a absorção e redistribuição de Ca, mitigando parcialmente os efeitos da salinidade. Segundo Bakhat *et al.* (2018), o silício atua na redução da toxicidade do Na⁺, facilitando a absorção de nutrientes essenciais como o Ca²⁺.

No T4, a Paulistinha destacou-se novamente, com o maior valor (25,65 g kg⁻¹), ao passo que Ceará e a Costela de Vaca apresentaram os menores teores (14,55 g kg⁻¹ e 14,60 g kg⁻¹, respectivamente). Esse desempenho reforça o potencial da Paulistinha em manter altos níveis de cálcio mesmo em condições de estresse salino, possivelmente devido à sua maior eficiência no transporte de Ca para os tecidos foliares.

No T5, o maior teor de Ca foi observado na Costela de Vaca (24,83 g kg⁻¹), evidenciando efeito positivo da aplicação combinada de silício. As demais variedades apresentaram valores mais equilibrados, com variações entre 18,34 g kg⁻¹ (Ceará) e 19,60 g kg⁻¹ (Pingo de Ouro). A menor resposta da Ceará sugere limitações no uso eficiente do cálcio sob essa condição, ao passo que Costela de Vaca demonstrou maior resiliência.

O aumento da salinidade promoveu redução da absorção de Ca em algumas variedades devido ao antagonismo com o Na⁺ nos sítios de transporte radicular, como observado em

estudos anteriores (Marschner, 2012; Rengel *et al.*, 2015). Essa competição pode comprometer diversas funções fisiológicas dependentes do Ca, resultando em maior susceptibilidade ao estresse salino.

Os teores foliares de silício (Si) nas variedades crioulas de feijão-caupi apresentaram variações entre os tratamentos e entre as variedades dentro de cada tratamento, refletindo diferenças na absorção e acúmulo desse elemento em resposta às condições testadas (Tabela 19).

Tabela 19. Médias dos teores foliares de silício (Si) (g kg^{-1}) de variedades crioulas de feijão-caupi submetidas a diferentes tratamentos.

Tratamento ¹	Si				
	Variedade				
	Pingo de ouro	Costela de vaca	Paulistinha	Sempre verde	Ceará
T1	0,87±0,06 aA	0,88±0,11 aA	0,91±0,13 aA	0,86±0,11 aA	0,75±0,08 aA
T2	0,54±0,05 aBC	0,50±0,05 aB	0,58±0,06 aB	0,47±0,04 aB	0,41±0,13 aB
T3	0,59±0,04 aBC	0,75±0,13 aAB	0,63±0,08 aB	0,47±0,05 aB	0,51±0,11 aAB
T4	0,40±0,06 bC	0,21±0,07 bC	0,58±0,12 aB	0,58±0,07 aB	0,63±0,09 aAB
T5	0,70±0,13 aB	0,58±0,03 aB	0,39±0,09 bB	0,44±0,11 bB	0,69±0,08 aA

Fonte: Autoria própria (2025). Letras minúsculas comparam na linha variedades dentro de tratamento pelo teste de Skott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. Letras maiúsculas na coluna comparam tratamento dentro de variedades crioulas pelo teste LSD ao nível de 5% de probabilidade. ¹T1 – solo não salino (controle); T2 – solo salino com 6,0 dS m⁻¹; T3 – solo salino + 1,3 g planta⁻¹ de Si (via solo), na forma de CaSiO₃; T4 – solo salino + 0,15 g L⁻¹ de Si (via foliar), na forma de K₂SiO₃; e T5 – solo salino com os tratamentos combinados de T3 e T4.

No T1 (Controle, solo não salino), os teores de Si foram os mais altos para todas as variedades, variando entre 0,75 g kg⁻¹ (Variedade Ceará) e 0,91 g kg⁻¹ (Variedade Paulistinha). Esses resultados refletem condições ideais de crescimento, sem competição iônica, permitindo a absorção eficiente do Si. A Paulistinha destacou-se com o maior acúmulo, evidenciando maior capacidade de transporte e deposição de Si nas folhas em condições não estressantes (Tabela 19).

Nos tratamentos em solo salino (T2 a T5), os teores de Si diminuíram em comparação ao controle, evidenciando o impacto negativo da salinidade sobre a absorção e transporte desse elemento. No T2, os teores variaram entre 0,41 g kg⁻¹ (Variedade Ceará) e 0,58 g kg⁻¹ (Variedade Paulistinha), sugerindo que a salinidade limita a disponibilidade de Si e a capacidade de absorção pelas plantas.

No T3, houve leve recuperação dos teores de Si, especialmente nas variedades Costela de Vaca (0,75 g kg⁻¹) e Paulistinha (0,63 g kg⁻¹). Esses resultados indicam que a aplicação de Si via solo contribuiu para a mitigação parcial dos efeitos do estresse salino, embora os valores ainda estejam abaixo dos observados no controle.

O T4 apresentou maior variação entre as variedades, com destaque para a Paulistinha e

Sempre Verde, que registraram valores próximos a $0,58 \text{ g kg}^{-1}$. Por outro lado, a Costela de Vaca apresentou o menor teor ($0,21 \text{ g kg}^{-1}$), indicando uma resposta genótipo-dependente à aplicação foliar de Si.

No T5, os teores de Si foram mais equilibrados, com destaque para a Variedade Ceará, que apresentou o maior valor ($0,69 \text{ g kg}^{-1}$). Esse resultado sugere que a aplicação combinada de Si pode oferecer benefícios mais consistentes na absorção e redistribuição do elemento, podendo, portanto, utilizá-lo de forma benéfica.

A redução dos teores de Si em condições de salinidade pode ser explicada pela competição iônica entre o Na^+ e os transportadores de Si, que compartilham rotas de absorção na rizosfera (Marschner, 2012). Essa competição limita a translocação de Si para as folhas, afetando diretamente sua atuação na proteção contra o estresse salino. Estudos mostram que o silício contribui para a manutenção da integridade das membranas celulares, aumento da rigidez dos tecidos e redução de danos oxidativos, características essenciais para a tolerância ao estresse salino (Neves *et al.*, 2019; Praxedes *et al.*, 2022). As diferenças entre as variedades refletem a variabilidade genética na capacidade de absorção e acúmulo de Si.

Os teores foliares de magnésio (Mg^{2+}) variaram entre os tratamentos aplicados ao feijão-caupi, sugerindo influência direta das condições de manejo sobre a absorção e acúmulo desse nutriente essencial (Tabela 20). Os tratamentos T2 e T3 apresentaram os maiores teores foliares de Mg, com médias de $3,15 \text{ g kg}^{-1}$ e $3,21 \text{ g kg}^{-1}$, respectivamente, sem diferenças entre si. Esses resultados sugerem que essas condições, apesar do estresse salino, favoreceram a absorção de Mg, possivelmente devido a uma regulação mais eficiente do transporte seletivo de íons, como relatado por Cakmak e Yazici (2010).

Tabela 20. Médias dos teores foliares de Magnésio (Mg^{2+}) (g kg^{-1}) de feijão-caupi submetido a diferentes tratamentos.

Tratamento	Mg^{2+}
T1	$2,61 \pm 0,14 \text{ B}$
T2	$3,15 \pm 0,18 \text{ A}$
T3	$3,21 \pm 0,16 \text{ A}$
T4	$2,61 \pm 0,14 \text{ B}$
T5	$2,90 \pm 0,16 \text{ AB}$

Fonte: Autoria própria (2025). Letras maiúsculas na coluna comparam os tratamentos pelo teste LSD ao nível de 5% de probabilidade. T1 – solo não salino (controle); T2 – solo salino com $6,0 \text{ dS m}^{-1}$; T3 – solo salino + $1,3 \text{ g planta}^{-1}$ de Si (via solo), na forma de CaSiO_3 ; T4 – solo salino + $0,15 \text{ g L}^{-1}$ de Si (via foliar), na forma de K_2SiO_3 ; e T5 – solo salino com os tratamentos combinados de T3 e T4.

Por outro lado, T1 e T4 exibiram os menores teores de Mg, ambos com média de $2,61 \text{ g kg}^{-1}$, evidenciando limitação da disponibilidade ou assimilação do nutriente nesses cenários. No T5, o teor médio de Mg foi intermediário ($2,90 \text{ g kg}^{-1}$), situando-se estatisticamente entre

os grupos de maior e menor acúmulo. Isso sugere que a combinação das formas de aplicação de silício proporcionou algum benefício para a absorção de magnésio, mas não tão expressivo quanto o observado em T2 e T3 (Tabela 20).

Em algumas situações, o aumento da CE, característico dos tratamentos salinos, afetou os níveis foliares de Mg, evidenciando o antagonismo iônico entre Na^+ e Mg^{2+} . Esse efeito é comumente observado em condições salinas, onde a competição entre íons reduz a absorção de nutrientes essenciais, como o magnésio (Munns e Tester, 2008; Arif *et al.*, 2020).

O magnésio desempenha papel crucial na fotossíntese, atuando como componente central da molécula de clorofila e como cofator em enzimas envolvidas no metabolismo celular e na fixação de carbono (Cakmak e Kirkby, 2008; Marschner, 2012). A redução dos teores de Mg em condições de alta CE compromete processos fotossintéticos e metabólicos, o que pode impactar negativamente o crescimento e a produtividade das plantas.

Os teores foliares de magnésio (Mg^{2+}) em variedades crioulas de feijão-caupi variaram entre si, evidenciando diferenças na eficiência de absorção e utilização deste nutriente entre os genótipos avaliados (Tabela 21).

Tabela 21. Médias dos teores foliares de Magnésio (Mg^{2+}) (g kg^{-1}) de variedades de feijão-caupi.

Variedade	Mg^{2+}
Pingo de ouro	3,14±0,14 a
Costela de vaca	3,05±0,18 a
Paulistinha	3,05±0,16 a
Sempre verde	2,75±0,14 b
Ceará	2,51±0,16 b

Fonte: Autoria própria (2025). Letras minúsculas comparam na coluna variedades dentro de tratamento pelo teste de Skott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

As variedades Pingo de Ouro, Costela de Vaca e Paulistinha apresentaram os maiores teores médios de Mg, com $3,14 \text{ g kg}^{-1}$, $3,05 \text{ g kg}^{-1}$ e $3,05 \text{ g kg}^{-1}$, respectivamente, sem diferenças entre si. Esses resultados indicam que essas variedades possuem eficiência similar na absorção e acúmulo de magnésio (Tabela 21). A concentração de Mg nessas variedades pode estar associada a uma maior capacidade de transporte seletivo e armazenamento do nutriente, fatores cruciais para o desempenho fotossintético e a tolerância ao estresse (Cakmak e Yazici, 2010; Marschner, 2012). Os menores teores de Mg das variedades Sempre Verde e Ceará podem estar relacionados a características genéticas que limitam a demanda nutricional para esse elemento.

As variedades com maiores teores de Mg podem apresentar vantagens em termos de

crescimento e produtividade, especialmente em condições adversas, devido à maior eficiência fotossintética.

No tratamento T1, as médias da relação $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ foram semelhantes entre as variedades, variando de 1,19 g kg⁻¹ na variedade Sempre Verde a 1,44 g kg⁻¹ nas variedades Pingo de Ouro e Paulistinha (Tabela 22). No T2, a variedade Sempre Verde se destacou com a maior relação $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ (1,87 g kg⁻¹), diferindo das demais variedades, que apresentaram valores mais baixos, variando de 1,08 g kg⁻¹ na Paulistinha a 1,25 g kg⁻¹ no Pingo de Ouro. Essa maior proporção de Na^+ em comparação ao Ca^{2+} pode sugerir menor capacidade de exclusão de sódio ou absorção de cálcio sob este tratamento.

Tabela 22. Médias da relação sódio/cálcio ($\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$) (g kg⁻¹) de variedades de feijão-caupi submetidas a diferentes tratamentos.

Tratamento	$\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$				
	Variedade				
	Pingo de ouro	Costela de vaca	Paulistinha	Sempre verde	Ceará
T1	1,44±0,10 aAB	1,28±0,18 aAB	1,44±0,11 aA	1,19±0,30 aB	1,33±0,06 aA
T2	1,25±0,13 bBC	1,10±0,25 bB	1,08±0,11 bAB	1,87±0,13 aA	1,19±0,06 bAB
T3	1,02±0,14 aC	1,16±0,17 aB	1,02±0,08 aB	1,15±0,06 aB	0,87±0,09 aB
T4	1,78±0,11 aA	1,61±0,20 aA	1,05±0,08 bAB	1,11±0,16 bB	1,41±0,05 aA
T5	1,13±0,08 aBC	0,95±0,26 aB	1,16±0,09 aAB	1,24±0,12 aB	1,38±0,08 aA

Fonte: Autoria própria (2025). Letras minúsculas comparam na linha variedades dentro de tratamento pelo teste de Skott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. Letras maiúsculas na coluna comparam tratamento dentro de variedades crioulas pelo teste LSD ao nível de 5% de probabilidade. T1 – solo não salino (controle); T2 – solo salino com 6,0 dS m⁻¹; T3 – solo salino + 1,3 g planta⁻¹ de Si (via solo), na forma de CaSiO_3 ; T4 – solo salino + 0,15 g L⁻¹ de Si (via foliar), na forma de K_2SiO_3 ; e T5 – solo salino com os tratamentos combinados de T3 e T4.

No tratamento T3, os valores da relação $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ foram os mais baixos entre os tratamentos, com a variedade Ceará apresentando a menor média (0,87 g kg⁻¹). Não foram observadas diferenças entre as variedades. No T4, observou-se inversão de padrões, com a variedade Pingo de Ouro apresentando a maior relação $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ (1,78 g kg⁻¹), ao passo que as variedades Paulistinha e Sempre Verde exibiram médias inferiores (1,05 g kg⁻¹ e 1,11 g kg⁻¹, respectivamente). Esse comportamento sugere que as variedades podem variar em suas estratégias de regulação iônica dependendo do tratamento aplicado.

No T5, as diferenças entre as variedades foram menos pronunciadas, com valores variando de 0,95 g kg⁻¹ na Costela de Vaca a 1,38 g kg⁻¹ na variedade Ceará. As médias indicam maior estabilidade nas relações $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$ neste tratamento.

No tratamento T1, os valores da relação $\text{Na}^+/\text{Mg}^{2+}$ variaram de 6,19 g kg⁻¹ na variedade Costela de Vaca a 8,29 g kg⁻¹ na variedade Paulistinha (Tabela 23). A Paulistinha apresentou uma relação maior, ao passo que as demais variedades mantiveram valores com pequenas diferenças entre si. No T2, destacou-se a variedade Sempre Verde, com a maior relação Na/Mg

(11,48 g kg⁻¹), sugerindo acúmulo relativo mais elevado de sódio em comparação ao magnésio. Em contraste, a Costela de Vaca apresentou a menor relação (5,46 g kg⁻¹), sugerindo capacidade potencial de limitar a absorção de sódio ou aumentar o acúmulo de magnésio.

Tabela 23. Médias da relação sódio/magnésio (Na⁺/Mg²⁺) (g kg⁻¹) de variedades de feijão-caupi submetidas a diferentes tratamentos.

Tratamento	Na ⁺ /Mg ²⁺				
	Variedade				
	Pingo de ouro	Costela de vaca	Paulistinha	Sempre verde	Ceará
T1	7,71±0,75 aBC	6,19±2,02 aBC	8,29±0,32 aA	6,69±0,94 aB	8,02±0,36 aBC
T2	9,52±0,41 aAB	5,46±1,05 bC	8,83±1,01 aA	11,48±1,03 aA	8,12±1,57 aBC
T3	5,92±0,73 aC	9,08±0,44 aAB	8,66±1,48 aA	9,04±0,70 aAB	7,49±1,33 aC
T4	11,52±0,66 aA	9,49±0,49 bA	7,52±1,49 bA	8,57±0,97 bAB	11,68±1,57 aA
T5	6,07±0,54 bC	9,40±1,35 aA	7,44±1,34 bA	9,34±1,31 aAB	11,00±1,44 aAB

Fonte: Autoria própria (2025). Letras minúsculas comparam na linha variedades dentro de tratamento pelo teste de Skott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. Letras maiúsculas na coluna comparam tratamento dentro de variedades crioulas pelo teste LSD ao nível de 5% de probabilidade. T1 – solo não salino (controle); T2 – solo salino com 6,0 dS m⁻¹; T3 – solo salino + 1,3 g planta⁻¹ de Si (via solo), na forma de CaSiO₃; T4 – solo salino + 0,15 g L⁻¹ de Si (via foliar), na forma de K₂SiO₃; e T5 – solo salino com os tratamentos combinados de T3 e T4.

No tratamento T3, os valores foram mais equilibrados da relação Na⁺/Mg²⁺ entre as variedades, variando de 5,92 g kg⁻¹ na variedade Pingo de Ouro a 9,08 g kg⁻¹ na Costela de Vaca. Apesar disso, as diferenças entre variedades não foram significativas, indicando resposta semelhante ao tratamento. O T4 mostrou os maiores valores médios para a relação Na⁺/Mg²⁺, com destaque para as variedades Pingo de Ouro e Ceará, que apresentaram os valores mais elevados (11,52 e 11,68 g kg⁻¹, respectivamente). As variedades Paulistinha e Sempre Verde tiveram relações menores, sugerindo diferenças na capacidade de regulação iônica entre os genótipos sob este tratamento.

No T5, as variedades Pingo de Ouro e Paulistinha exibiram as menores relações Na⁺/Mg²⁺ (6,07 e 7,44 g kg⁻¹, respectivamente), ao passo que a variedade Ceará apresentou o maior valor (11,00 g kg⁻¹). A Costela de Vaca destacou-se com médias elevadas neste tratamento, o que pode sugerir maior sensibilidade ao sódio ou menor eficiência de absorção de magnésio.

A relação Na⁺/Si nas variedades de feijão-caupi variou consideravelmente entre os tratamentos e as variedades, refletindo a influência das condições experimentais na regulação iônica e no acúmulo de silício (Tabela 24). No T1, as relações Na⁺/Si foram relativamente baixas, variando de 19,02 g kg⁻¹ na variedade Sempre Verde a 28,43 g kg⁻¹ na variedade Ceará, com esta última se destacando devido ao maior acúmulo relativo de sódio em relação ao silício. Com o aumento da salinidade nos tratamentos seguintes, observou-se aumento da relação Na⁺/Si para todas as variedades, com a Sempre Verde apresentando os valores mais elevados,

como no T2 (72,05 g kg⁻¹) e no T3 (82,47 g kg⁻¹). Nessas condições, a variedade Sempre Verde manteve o maior acúmulo relativo de sódio, ao passo que as outras variedades exibiram valores mais equilibrados.

Tabela 24. Médias da relação sódio/silício (Na⁺/Si) (g kg⁻¹) de variedades de feijão-caupi submetidas a diferentes tratamentos.

Tratamento ¹	Na ⁺ /Si				
	Variedade				
	Pingo de ouro	Costela de vaca	Paulistinha	Sempre verde	Ceará
T1	24,00±0,95 aB	20,44±15,60 aB	23,56±13,57 aB	19,02±29,43 aB	28,43±3,80 aA
T2	59,80±1,19 aAB	43,14±10,17 aB	50,90±2,70 aAB	72,05±21,16 aAB	53,73±11,20 aA
T3	42,72±2,19 aB	36,67±12,38 aB	41,51±6,75 aAB	82,47±4,91 aA	52,12±31,39 aA
T4	99,95±1,09 aA	121,17±7,09 aA	47,26±12,23 bAB	38,12±6,38 bBC	37,53±19,45 bA
T5	32,49±7,76 aB	46,47±5,02 aB	75,60±14,37 aA	63,68±10,88 aAB	37,35±3,75 aA

Fonte: Autoria própria (2025). Letras minúsculas comparam na linha variedades dentro de tratamento pelo teste de Skott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. Letras maiúsculas na coluna comparam tratamento dentro de variedades crioulas pelo teste LSD ao nível de 5% de probabilidade. T1 – solo não salino (controle); T2 – solo salino com 6,0 dS m⁻¹; T3 – solo salino + 1,3 g planta⁻¹ de Si (via solo), na forma de CaSiO₃; T4 – solo salino + 0,15 g L⁻¹ de Si (via foliar), na forma de K₂SiO₃; e T5 – solo salino com os tratamentos combinados de T3 e T4.

No tratamento T4, os valores da relação Na⁺/Si atingiram os maiores picos, especialmente para as variedades Pingo de Ouro e Costela de Vaca, com valores de 99,95 g kg⁻¹ e 121,17 g kg⁻¹, respectivamente. Por sua vez, as variedades Paulistinha, Sempre Verde e Ceará apresentaram valores menores, sugerindo que podem ter desenvolvido estratégias diferenciadas de manejo iônico sob estresse salino. No T5, as relações Na⁺/Si se equilibraram mais entre as variedades, com exceção da Paulistinha, que teve o maior valor (75,60 g kg⁻¹). A variedade Ceará apresentou a menor relação (37,35 g kg⁻¹), destacando-se pela maior capacidade de regulação iônica em comparação às demais.

Os valores da relação Na⁺/K⁺ apresentaram variações entre os tratamentos, refletindo alterações do equilíbrio iônico do feijão-caupi sob diferentes condições experimentais (Tabela 25). No T1, observou-se o menor valor médio da relação Na⁺/K⁺ (0,80 g kg⁻¹), sugerindo mais eficiência na manutenção de baixos níveis de sódio em comparação ao potássio. Esse resultado pode sugerir menor exposição ao estresse salino ou maior capacidade de exclusão de sódio.

Tabela 25. Médias da relação sódio/potássio (Na⁺/K⁺) (g kg⁻¹) de feijão-caupi submetido a diferentes tratamentos.

Tratamento	Na ⁺ /K ⁺
T1	0,80±0,01 B
T2	0,83±0,01 A
T3	0,83±0,01 A
T4	0,82±0,01 A
T5	0,83±0,00 A

Fonte: Autoria própria (2025). Letras maiúsculas na coluna comparam os tratamentos pelo teste LSD ao nível de 5% de probabilidade. T1 – solo não salino (controle); T2 – solo salino com 6,0 dS m⁻¹; T3 – solo salino + 1,3 g planta⁻¹ de Si (via solo), na forma de CaSiO₃; T4 – solo salino + 0,15 g L⁻¹ de Si (via foliar), na forma de K₂SiO₃; e T5 – solo salino com os tratamentos combinados de T3 e T4.

Nos tratamentos T2, T3, T4 e T5, os valores médios da relação Na⁺/K⁺ foram mais elevados e semelhantes entre si, variando de 0,82 g kg⁻¹ a 0,83 g kg⁻¹, sem diferenças entre os tratamentos. Esses resultados sugerem que, sob condições mais desafiadoras, o equilíbrio entre sódio e potássio foi comprometido de maneira similar em todos esses tratamentos (Tabela 25).

A relação Na⁺/K⁺ é um indicador importante da homeostase iônica e da tolerância ao estresse salino. Valores mais baixos, como no T1, refletem melhor regulação do transporte de íons, o que pode contribuir para um desempenho fisiológico superior. Em contrapartida, os valores mais elevados nos outros tratamentos evidenciam maior acumulação relativa de sódio, o que pode comprometer a eficiência fisiológica das plantas em condições de maior estresse.

4.5 COMPONENTES DE PRODUÇÃO

Houve interação entre os fatores variedade e tratamento ($p < 0,05$) para as variáveis NVP, PROD, CVAG, COM e ESP. Houve efeito isolado do fator variedade ($p < 0,05$) para a variável LAR (Tabela 26).

Tabela 26. Resumo da análise de variância para as variáveis número de vagens por planta (NVP), produção por planta (PROD), comprimento de vagem (CVAG), comprimento de sementes (COM), largura de sementes (LAR) e espessura de sementes (ESP).

FV	NVP	PROD	CVAG	COM	LAR	ESP
Bloco	0,6842 ^{NS}	0,5042 ^{NS}	0,1264 ^{NS}	0,7777 ^{NS}	0,5346 ^{NS}	0,7624 ^{NS}
Variedade	0,0371*	0,1528 ^{NS}	0,0000**	0,0011**	0,0359*	0,5393 ^{NS}
Tratamento	0,0000**	0,0000**	0,0976 ^{NS}	0,0213*	0,3409 ^{NS}	0,1780 ^{NS}
Variedade x Tratamento	0,0000**	0,0000**	0,0000**	0,0000**	0,1911 ^{NS}	0,0267*
CV (%)	18,68	21,49	8,37	6,06	4,98	5,93

Fonte: Autoria própria (2025). ** significativo a 1% ($p \leq 0,01$); * significativo a 5% ($p \leq 0,05$); ^{NS} não significativo. Variedade – corresponde as cinco variedades estudadas: Pingo de Ouro, Costela de vaca, Paulistinha, Sempre verde e Ceará; Tratamento – Corresponde aos cinco tratamentos estudados: T1 – solo não salino (controle); T2 – solo salino com 6,0 dS m⁻¹; T3 – solo salino + 1,3 g planta⁻¹ de Si (via solo), na forma de CaSiO₃; T4 – solo salino + 0,15 g L⁻¹ de Si (via foliar), na forma de K₂SiO₃; e T5 – solo salino com os tratamentos combinados de T3 e T4.); CV – coeficiente de variação.

O aumento da salinidade influenciou negativamente a produção por planta (PROD) e o número de vagens por planta (NVP), destacando os efeitos adversos do estresse salino sobre a produtividade das variedades crioulas de feijão-caupi.

No tratamento T1, as variedades Pingo de Ouro, Costela de Vaca, Paulistinha e Sempre Verde apresentaram as maiores produções, com valores médios variando entre 27,75 e 32,51 g

por planta, sem diferenças entre si (Tabela 27). Esses resultados refletem as produções das variedades nas condições ideais de crescimento. Em contrapartida, a variedade Ceará apresentou produção inferior (8,56 g por planta), provavelmente devido às suas características genéticas ou morfológicas, que limitam sua capacidade de produção de grãos.

Tabela 27. Teste de médias para produção por planta (PROD) de variedades crioulas de feijão-caupi submetidas a diferentes tratamentos.

Tratamento ¹	PROD				
	Variedade				
	Pingo de ouro	Costela de vaca	Paulistinha	Sempre verde	Ceará
T1	28,93±1,25 aA	32,51±3,14 aA	27,92±2,29 aA	27,75±0,60 aA	8,56±0,81 bB
T2	7,15±3,06 aB	5,95±1,63 aB	4,92±2,56 aC	4,30±2,07 aC	3,57±0,53 aB
T3	6,95±0,83 aB	8,05±0,90 aB	5,54±2,26 aC	5,78±0,46 aC	8,45±0,10 aB
T4	5,77±0,98 bB	6,50±2,15 bB	11,51±2,19 aB	11,50±1,53 aB	3,79±0,73 bB
T5	5,76±1,49 bB	5,91±0,00 bB	4,60±0,00 bC	3,06±0,69 bC	14,22±4,03 aA

Fonte: Autoria própria (2025). Letras minúsculas comparam na linha variedades dentro de tratamento pelo teste de Skott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. Letras maiúsculas na coluna comparam tratamento dentro de variedades crioulas pelo teste LSD ao nível de 5% de probabilidade. T1 – solo não salino (controle); T2 – solo salino com 6,0 dS m⁻¹; T3 – solo salino + 1,3 g planta⁻¹ de Si (via solo), na forma de CaSiO₃; T4 – solo salino + 0,15 g L⁻¹ de Si (via foliar), na forma de K₂SiO₃; e T5 – solo salino com os tratamentos combinados de T3 e T4.

Sob estresse salino, observou-se redução drástica da produção de todas as variedades, com diminuição média de aproximadamente 78,43% em relação ao T1 (Tabela 27). Essa queda reflete os efeitos negativos do estresse salino, que prejudica processos fisiológicos cruciais, como fotossíntese, divisão celular e transporte de assimilados, comprometendo o enchimento de grãos (Munns e Tester, 2008; Praxedes *et al.*, 2022).

No tratamento T3, as produções não diferiram estatisticamente do T2. Por outro lado, T4 apresentou aumento significativo em relação ao tratamento T2 para as variedades Paulistinha e Sempre verde, com médias de 11,51 e 11,50 g por planta, respectivamente. Esses resultados indicam que a aplicação foliar de silicato de potássio foi mais eficaz em promover benefícios a essas variedades frente ao estresse salino, possivelmente devido à rápida absorção e à atuação direta do Si e K⁺ na redução dos efeitos tóxicos do Na⁺ e na preservação da integridade das membranas celulares e ajuste osmótico, influenciando na produção de fotoassimilados e, conseqüentemente, interferindo positivamente na produção de grãos (Bakhat *et al.*, 2018; Souri *et al.*, 2021).

No tratamento T5, a variedade Ceará destacou-se com a maior produção (14,22 g por planta), superando todas as demais variedades sob condições salinas. Esse resultado sugere que a combinação das formas de aplicação potencializou os efeitos benéficos do silício, promovendo melhoria da produtividade para essa variedade.

No T1, as variedades Paulistinha e Sempre Verde apresentaram os maiores valores

médios de NVP (12,50 vagens/planta), superando as demais. A variedade Ceará destacou-se pelo menor desempenho neste tratamento, com média de 4,75 vagens planta⁻¹ (Tabela 28).

Tabela 28. Médias de número de vagens por planta (NVP) de variedades crioulas de feijão-caupi submetidas a diferentes tratamentos.

Tratamento ¹	NVP				
	Variedade				
	Pingo de ouro	Costela de vaca	Paulistinha	Sempre verde	Ceará
T1	10,50±0,87 bA	9,75±0,50 bA	12,50±0,87 aA	12,50±0,48 aA	4,75±0,41 cAB
T2	3,50±1,44 aB	2,00±0,41 aB	3,25±0,71 aC	2,75±0,63 aC	2,00±0,29 aC
T3	2,50±0,50 aB	4,00±0,48 aB	2,25±0,63 aC	2,50±1,08 aC	3,00±0,00 aBC
T4	3,25±0,65 bB	2,25±1,18 bB	6,00±0,65 aB	6,00±1,08 aB	1,50±0,29 aC
T5	3,00±1,03 bB	2,50±0,00 bB	2,00±0,00 bC	1,50±0,29 bC	6,00±1,22 aA

Fonte: Autoria própria (2025). Letras minúsculas comparam na linha variedades dentro de tratamento pelo teste de Skott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. Letras maiúsculas na coluna comparam tratamento dentro de variedades crioulas pelo teste LSD ao nível de 5% de probabilidade. ¹T1 – solo não salino (controle); T2 – solo salino com 6,0 dS m⁻¹; T3 – solo salino + 1,3 g planta⁻¹ de Si (via solo), na forma de CaSiO₃; T4 – solo salino + 0,15 g L⁻¹ de Si (via foliar), na forma de K₂SiO₃; e T5 – solo salino com os tratamentos combinados de T3 e T4.

Sob condições de salinidade (T2 a T5), houve redução acentuada do NVP em todas as variedades, evidenciando os efeitos adversos do estresse salino na produtividade do feijão-caupi. No T2, os valores médios variaram de 2,00 vagens/planta (Costela de Vaca) a 3,50 vagens/planta (Pingo de Ouro), demonstrando que nenhuma das variedades sustentou a produtividade em condições salinas (Tabela 28). Esse comportamento está alinhado com estudos prévios que associam o estresse salino à redução do desenvolvimento reprodutivo, menor viabilidade de flores e aumento da taxa de abortamento de estruturas reprodutivas (Munns e Tester, 2008; Praxedes *et al.*, 2022).

No tratamento T4, observou-se recuperação parcial do NVP de algumas variedades. As variedades Paulistinha e Sempre Verde destacaram-se com 6,00 vagens/planta, evidenciando que a aplicação foliar foi mais eficaz em mitigar os efeitos negativos da salinidade. Essa recuperação pode estar associada ao papel do silício na estabilização das membranas celulares e na redução do estresse oxidativo, conforme Bakhat *et al.* (2018) e Hassan *et al.* (2024).

No T5, a variedade Ceará apresentou resposta notável, alcançando a maior média de NVP (6,00 vagens/planta) dentre todas as variedades nesse tratamento. Este resultado sugere que, apesar de sua baixa produtividade em T1, a variedade Ceará pode se beneficiar da aplicação combinada de silício, que potencializa a mitigação dos efeitos do estresse salino. Estudos indicam que o silício pode melhorar a retenção de flores e o desenvolvimento de vagens por meio da regulação osmótica e da homeostase iônica em condições adversas (Praxedes *et al.*, 2022; Stefanov *et al.*, 2024).

Os dados demonstram que o aumento da CE está diretamente associado à redução do

número de vagens por planta (NVP) e da produção por planta (PROD), devido aos impactos negativos da salinidade nos processos fisiológicos das plantas, como a fotossíntese e a translocação de assimilados para os órgãos reprodutivos (Munns e Tester, 2008). A salinidade compromete a formação e o enchimento de grãos, intensificando o déficit no transporte de fotoassimilados e resultando em produtividade reduzida.

Nesse contexto, a aplicação de silício destacou-se como estratégia eficaz para atenuar os impactos do estresse salino na produtividade do feijão-caupi.

A Tabela 29 apresenta as médias do comprimento de vagem (CVAG) em variedades crioulas de feijão-caupi submetidas a diferentes tratamentos. Sob T1, não foram observadas diferenças entre as variedades, com valores variando de 16,23 cm (Ceará) a 18,17 cm (Pingo de Ouro). Esses resultados sugerem que, em condições sem estresse, as variedades possuem potencial semelhante para o desenvolvimento das vagens.

Tabela 29. Médias de comprimento de vagem (CVAG) de variedades crioulas de feijão-caupi submetidas a diferentes tratamentos.

Tratamento ¹	CVAG				
	Variedade				
	Pingo de ouro	Costela de vaca	Paulistinha	Sempre verde	Ceará
T1	18,17±0,67 aA	17,72±1,16 aC	16,55±0,47 aA	17,17±0,79 aA	16,23±0,81 aAB
T2	14,48±1,09 aC	20,79±0,12 abA	15,46±0,21 abA	15,77±0,84 abAB	15,40±0,18 bB
T3	16,81±0,77 aAB	18,16±0,55 aBC	13,04±1,22 bB	16,82±0,62 aAB	16,70±0,42 aAB
T4	15,70±0,59 bBC	19,78±1,14 aAB	16,25±1,02 bA	15,05±0,80 bB	17,72±0,78 bA
T5	15,00±0,05 bBC	16,51±0,00 aC	15,01±0,00 bA	17,43±0,13 aA	16,67±0,59 aAB

Fonte: Autoria própria (2025). Letras minúsculas comparam na linha variedades dentro de tratamento pelo teste de Skott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. Letras maiúsculas na coluna comparam tratamento dentro de variedades crioulas pelo teste LSD ao nível de 5% de probabilidade. ¹T1 – solo não salino (controle); T2 – solo salino com 6,0 dS m⁻¹; T3 – solo salino + 1,3 g planta⁻¹ de Si (via solo), na forma de CaSiO₃; T4 – solo salino + 0,15 g L⁻¹ de Si (via foliar), na forma de K₂SiO₃; e T5 – solo salino com os tratamentos combinados de T3 e T4.

No T2, que expôs as plantas à salinidade, a variedade Costela de Vaca destacou-se com o maior comprimento de vagem (20,79 cm), ao passo que a variedade Ceará apresentou um dos menores valores (15,40 cm). Esse desempenho superior da Costela de Vaca evidencia maior tolerância ao estresse salino (Tabela 29).

Em T3, observou-se incremento do CVAG para a Sempre Verde (16,82 cm) em comparação aos valores observados em T2. Entretanto, a Paulistinha apresentou o menor comprimento de vagem (13,04 cm) dentre todas as variedades, evidenciando sua menor capacidade de resposta a esse tratamento.

No T4, que utilizou aplicação de silício via foliar, a Costela de Vaca novamente obteve o maior desempenho (19,78 cm), reforçando sua capacidade de resposta positiva ao manejo com silício. Por outro lado, as variedades Pingo de Ouro e Paulistinha apresentaram

incrementos mais modestos no comprimento de vagem em comparação aos tratamentos anteriores.

Por fim, no T5, a Sempre Verde alcançou o maior valor médio (17,43 cm), ao passo que as demais variedades apresentaram desempenhos mais homogêneos, com médias variando de 15,00 cm (Ceará) a 16,67 cm (Pingo de Ouro). Esse resultado sugere que a aplicação combinada de silício pode ser mais eficiente para algumas variedades, como a Sempre Verde, mas seu efeito pode variar entre genótipos.

A Tabela 30 apresenta as médias do comprimento de sementes (COM) de variedades crioulas de feijão-caupi submetidas a diferentes tratamentos. No T1, a Costela de Vaca destacou-se com o maior comprimento médio de sementes (12,01 mm), ao passo que as demais variedades apresentaram valores menores e estatisticamente semelhantes, variando de 9,54 mm (Paulistinha) a 10,58 mm (Ceará). Esses resultados mostram que, em condições ideais, a Costela de Vaca possui sementes mais longas, sugerindo um diferencial genético favorável.

Tabela 30. Médias de comprimento de sementes (COM) de variedades crioulas de feijão-caupi submetidas a diferentes tratamentos.

Tratamento ¹	COM				
	Variedade				
	Pingo de ouro	Costela de vaca	Paulistinha	Sempre verde	Ceará
T1	9,63±0,12 bA	12,01±0,34 aA	9,54±0,75 bB	9,58±0,37 bA	10,58±0,36 bA
T2	9,28±0,41 aA	11,13±0,31 aA	9,39±1,13 aB	9,45±0,44 aA	10,90±0,75 aA
T3	9,33±0,40 bA	8,77±0,59 bB	10,95±1,21 aA	9,36±0,40 bA	9,52±0,19 bA
T4	9,29±0,15 aA	10,54±0,13 aAB	8,90±0,45 aB	9,46±0,49 aA	10,20±0,49 aA
T5	9,87±0,27 aA	10,40±0,00 aAB	8,73±0,00 aB	8,76±0,27 aA	9,98±0,25 aA

Fonte: Autoria própria (2025). Letras minúsculas comparam na linha variedades dentro de tratamento pelo teste de Skott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. Letras maiúsculas na coluna comparam tratamento dentro de variedades crioulas pelo teste LSD ao nível de 5% de probabilidade. ¹T1 – solo não salino (controle); T2 – solo salino com 6,0 dS m⁻¹; T3 – solo salino + 1,3 g planta⁻¹ de Si (via solo), na forma de CaSiO₃; T4 – solo salino + 0,15 g L⁻¹ de Si (via foliar), na forma de K₂SiO₃; e T5 – solo salino com os tratamentos combinados de T3 e T4.

Sob T2, o comprimento médio das sementes permaneceu estável, sem reduções em comparação ao controle. A Costela de Vaca manteve o maior comprimento médio (11,13 mm), evidenciando maior estabilidade dessa característica sob condições adversas.

T3 promoveu aumento do comprimento das sementes da Paulistinha (10,95 mm), superando o controle. Esse incremento ressalta o potencial do silício em mitigar os efeitos do estresse, especialmente em variedades mais sensíveis como a Paulistinha. Em contrapartida, a Costela de Vaca apresentou redução expressiva do comprimento das sementes (8,77 mm), evidenciando resposta negativa a esse tratamento.

No T4, as diferenças entre as variedades foram menos acentuadas. A Costela de Vaca

manteve valores superiores (10,54 mm), ao passo que a Paulistinha apresentou os menores comprimentos médios (8,90 mm), reforçando sua sensibilidade ao estresse salino.

No T5, observou-se maior uniformidade entre as variedades, com comprimentos médios variando de 8,73 mm (Paulistinha) a 10,40 mm (Costela de Vaca). A Paulistinha novamente demonstrou menor desempenho, mesmo com a combinação de tratamentos, sugerindo limitações da sua capacidade de responder positivamente ao manejo com silício.

A Tabela 31 apresenta as médias da espessura das sementes (ESP) de variedades crioulas de feijão-caupi submetidas a diferentes tratamentos. No T1, os valores médios de espessura variaram de 5,61 mm (Pingo de Ouro) a 5,88 mm (Paulistinha), sem diferenças entre as variedades, exceto pela Paulistinha, que apresentou valores superiores às demais.

Tabela 31. Médias de espessura de sementes (ESP) de variedades crioulas de feijão-caupi submetidas a diferentes tratamentos.

Tratamento ¹	ESP				
	Variedade				
	Pingo de ouro	Costela de vaca	Paulistinha	Sempre verde	Ceará
T1	5,61±0,28 aA	5,77±0,19 aA	5,88±0,07 aB	5,85±0,17 aAB	5,73±0,17 aA
T2	5,65±0,10 aA	5,91±0,16 aA	5,41±0,22 aB	5,29±0,20 aB	5,70±0,06 aA
T3	5,83±0,12 bA	5,52±0,29 bA	7,50±1,18 aA	5,13±0,22 bB	5,61±0,13 bA
T4	5,70±0,18 aA	5,51±0,17 aA	5,27±0,39 aB	5,42±0,02 aB	5,83±1,21 aA
T5	5,92±0,07 aA	5,49±0,00 aA	6,09±0,00 aB	6,85±0,11 aA	5,89±0,16 aA

Fonte: Autoria própria (2025). Letras minúsculas comparam na linha variedades dentro de tratamento pelo teste de Skott-Knott ao nível de 5% de probabilidade. Letras maiúsculas na coluna comparam tratamento dentro de variedades crioulas pelo teste LSD ao nível de 5% de probabilidade. ¹T1 – solo não salino (controle); T2 – solo salino com 6,0 dS m⁻¹; T3 – solo salino + 1,3 g planta⁻¹ de Si (via solo), na forma de CaSiO₃; T4 – solo salino + 0,15 g L⁻¹ de Si (via foliar), na forma de K₂SiO₃; e T5 – solo salino com os tratamentos combinados de T3 e T4.

No T2, embora não tenham sido observadas diferenças entre as variedades dentro do tratamento, a Paulistinha apresentou leve redução da espessura das sementes (5,41 mm) em comparação ao controle. Essa diminuição pode ser atribuída aos efeitos do estresse salino, que impacta negativamente o desenvolvimento das sementes.

No T3, a Paulistinha destacou-se com um aumento expressivo da espessura das sementes, alcançando 7,50 mm. Esse incremento evidencia a eficácia do silício em mitigar os efeitos adversos do estresse salino nessa variedade. Em contraste, Pingo de Ouro, Sempre Verde e Ceará apresentaram valores reduzidos ou estáveis, evidenciando que a resposta ao silício varia conforme o genótipo.

No T4, os valores de espessura das sementes permaneceram relativamente uniformes entre as variedades, variando entre 5,27 mm (Paulistinha) e 5,83 mm (Ceará). Essa uniformidade sugere que a aplicação foliar de silício teve impacto limitado sobre a espessura das sementes em comparação ao controle.

Por fim, no T5, a Sempre Verde apresentou o maior valor médio de espessura das sementes (6,85 mm), diferindo das demais variedades. Esse resultado indica que a aplicação combinada de silício pode ser mais eficaz para melhorar a espessura das sementes em variedades específicas, como a Sempre Verde.

A Tabela 32 apresenta as médias de largura de sementes (LAR) das variedades crioulas de feijão-caupi. As variedades Pingo de Ouro, Costela de Vaca e Ceará mostraram os maiores valores de largura, variando entre 7,62 mm e 7,75 mm, sem diferenças entre si.

Tabela 32. Médias de largura de sementes (LAR) de variedades crioulas de feijão-caupi.

Variedade	LAR
Pingo de ouro	7,62±0,33 a
Costela de vaca	7,68±0,16 a
Paulistinha	7,21±0,14 b
Sempre verde	7,14±0,09 b
Ceará	7,75±0,09 a

Fonte: Autoria própria (2025). Letras minúsculas comparam na coluna variedades de feijão-caupi pelo teste de Skott-Knott ao nível de 5% de probabilidade.

Em contraste, as variedades Paulistinha e Sempre Verde apresentaram valores médios inferiores, com 7,21 mm e 7,14 mm, respectivamente. Essa variação pode estar relacionada a características genéticas específicas dessas variedades, que influenciam o desenvolvimento das sementes.

5 CONCLUSÕES

1. A aplicação foliar de silicato de potássio via foliar apresentou resultados promissores para a produção por planta nas variedades Paulistinha e Sempre verde sob estresse salino;
2. A aplicação combinada de silicatos atenuou parcialmente os efeitos da salinidade sobre o número de vagens por planta e produção por planta da variedade Ceará;
3. A aplicação foliar de silicato de potássio atenuou os efeitos da salinidade da clorofila b sobre a variedade Paulistinha;
4. O uso de silicatos, independentemente do modo de aplicação, mitigou os efeitos adversos da salinidade sobre a taxa de assimilação de CO₂.

REFERÊNCIAS

- AHLUWALIA, O.; SINGH, P. C.; BHATIA, R. A review on drought stress in plants: Implications, mitigation and the role of plant growth promoting rhizobacteria. **Resources, Environment and Sustainability**, v. 5, p. 100032, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2021.100032>
- ALVARES, C. A. *et al.* Koppen's climate classification map for Brasil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, p. 711-728, 2014. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- ARAÚJO, S. L. *et al.* Guardiões e guardiãs da agrobiodiversidade nas regiões do Cariri, Curimatá e Seridó Paraibano. **Cadernos de Agroecologia**, v. 8, n. 2, 2013.
- ARIF, Y. *et al.* Salinity induced physiological and biochemical changes in plants: An omic approach towards salt stress tolerance. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 156, p. 64-77, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.08.042>.
- AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **A qualidade da água na agricultura**. 2.ed. Campina Grande: UFPB, 1999.
- AZEVEDO, P. R. L. *et al.* Efeito dos sais e da qualidade da água no solo e na planta. **Revista de Agroecologia no Semiárido**, v. 1, n. 1, p. 1-12, 2018. DOI: <https://doi.org/10.35512/ras.v1i1.1640>
- BAKHAT, H. F. *et al.* Silicon mitigates biotic stresses in crop plants: a review. **Crop Protection**, v. 104, p. 21-34, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2017.10.008>
- BEZERRA, A. A. C. *et al.* Morfofisiologia e produção de feijão-caupi, cultivar BRS Novaera, em função da densidade de plantas. **Revista Caatinga**, Mossoró, v. 27, n. 4, p. 135-141, 2014.
- BRASIL. Casa Civil. **Lei n. 13.123, de 20 de maio de 2015**. Dispõe sobre bens, direitos e obrigações relativos ao acesso ao Patrimônio Genético do País, 2015. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/CCIVIL_03/_Ato2015-2018/2015/Lei/L13123.htm. Acesso em: 30 set. 2023.
- CAKMAK, I.; YAZICI, A. M. Magnesium: a forgotten element in crop production. **Better Crops**, v. 94, p. 23-25, 2010.
- CAMPOS, C. N. S. *et al.* Silicon mitigates ammonium toxicity in plants. **Journal of Agronomy**, v. 112, p. 635-647, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/agj2.20069>
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Boletim da safra de grãos. **8º Levantamento, safra 2023/24, Edição Grãos**. Brasília: 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos/>. Acesso em: 7 jan. 2025.
- DEBONA, D.; RODRIGUES, A.; DATNOFF, L. E. Silicon's role in abiotic and biotic plant stresses. **Annual Review of Phytopathology**, v. 55, p. 85-107, 2017.
- EL-TAHER, A. M. *et al.* Efeito do estresse salino e da aplicação foliar de ácido salicílico nas características morfológicas, bioquímicas, anatômicas e de produtividade de plantas de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* L.). **Plants**, v. 11, p. 115, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants11010115>

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018.

ETESAMI, H.; JEONG, B. R. Silicon (Si): review and future prospects on the action mechanisms in alleviating biotic and abiotic stresses in plants. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v. 147, p. 881–896, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.09.063>

FAO. The state of the world's land and water resources for food and agriculture – Systems at breaking point. **Synthesis report 2021**. Rome: FAO, 2021. DOI: <https://doi.org/10.4060/cb7654en>

FERNANDES, A. C. G. *et al.* Ferramentas de identificação de salinidade do solo: um estudo acerca das técnicas eficazes no manejo agrícola. **GeoGraphos**, v. 11, n. 127, p. 133–157, 2020. DOI: <https://doi.org/10.14198/GEOGRA2020.11.127>

FERNANDES, C. S. *et al.* The appropriate source of nitrogen for Italian zucchini under salt stress conditions. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, p. 560–570, 2022.

FERREIRA, D. F. Sisvar: um guia dos seus procedimentos de comparações múltiplas Bootstrap. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 38, p. 109–112, 2019.

GUILHERME, J. M. *et al.* Água salina e adubação fosfatada na cultura do amendoim. **Irriga**, v. 1, n. 4, p. 704–713, 2021. DOI: <https://doi.org/10.15809/irriga.2021v1n4p704-713>

HASANUZZAMAN M, FUJITA M. Plant Responses and Tolerance to Salt Stress: Physiological and Molecular Interventions. **Int. J. Mol. Sci.**, 27;23(9):4810, Apr. 2022. doi: 10.3390/ijms23094810.

HASSAN, K. M. *et al.* Silicon: A powerful aid for medicinal and aromatic plants against abiotic and biotic stresses for sustainable agriculture. **Horticulturae**, v. 10, p. 806, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae10070806>

JESUS, C. M. *et al.* Nitrogen fertilization and rhizobium strains efficient in the development and productivity of cowpea. **Holos**, 2023. DOI: <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/10538>

KAFI, M.; RAHIMI, Z. Efeito da salinidade e do silício nas características das raízes, crescimento, status hídrico, teor de prolina e acúmulo de íons em beldroegas (*Portulaca oleracea* L.). **Ciência do Solo e Nutrição de Plantas**, v. 57, p. 341–347, 2011.

KHANGHAHI, M. Y. *et al.* Leaf photosynthetic characteristics and photosystem II photochemistry of rice (*Oryza sativa* L.) under potassium solubilizing bacteria inoculation. **Photosynthetica**, v. 57, p. 500–511, 2019.

KORNDÖRFER, G.H.; PEREIRA, H.S.; NOLA, A. **Análise de silício**: solo, planta e fertilizante. Uberlândia: GPSi-ICIAG-UFU, 2004. 34p. (Boletim técnico, 2).

KURDALI, F.; AL-CHAMMAA, M.; AL-AIN, F. Growth and N₂-fixation in saline and/or water stressed *Sesbania aculeata* plants in response to silicon application. **Silicon**, v. 10, p. 1–8, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12633-018-9884-2>

LIMA, L. S. C. F.; FORTI, V. A. **Sementes crioulas**: qualidade e armazenamento. São Carlos: UFSCar/CPOI, 2020.

LIU, L.; *et al.* The Role of Chloride Channels in Plant Responses to NaCl. **Int. J. Mol. Sci.**, 25, 19, 2024. <https://doi.org/10.3390/ijms25010019>

MARSCHNER, P. **Marschner's mineral nutrition of higher plants**. 3 ed. London: Elsevier, 2012.

MUNNS, R.; TESTER, M. Mechanism of salinity tolerance. **Annual Review of Plant Biology**, v. 59, n. 6, p. 651-681, 2008.

NEVES, J. M. G. *et al.* Silício e boro mitigam os efeitos do déficit hídrico no girassol. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, p. 175-182, 2019.

NOVAIS, R. F.; NEVES, J. C. L.; BARROS, N. F. Ensaio em ambiente controlado. In: OLIVEIRA, A. J. (org.). **Métodos de pesquisa em fertilidade do solo**. Brasília: Embrapa-SEA, 1991. p. 189-253.

NUNES, M.F.P. *et al.* Produção do feijoeiro comum cultivado sob estresse salino e concentrações de Si em solução nutritiva. In: Congresso Brasileiro de Nutrição de Solos, 2013.

OLIVEIRA, W. J. de *et al.* Fluorescência da clorofila como indicador de estresse salino em feijão-caupi. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 12, n. 3, p. 2592-2603, 2018. DOI: <https://doi.org/10.7127/rbai.v12n300700>

PEREIRA FILHO, J. V. *et al.* Physiological responses of lima bean subjected to salt and water stresses. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 23, n. 12, p. 959-965, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v23n12p959-965>

PEREIRA, V. C.; DAL SOGLIO, F. K. **A conservação das sementes crioulas: uma visão interdisciplinar da agrobiodiversidade**. Rio Grande do Sul. Editora UFRGS, 2020.

PONCE, F. S. *et al.* Adubação silicatada na produtividade e respostas fisiológicas das plantas. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 16, e164111637926, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i16.37926>

PRAXEDES, S. S. C. *et al.* Photosynthetic responses, growth, production, and tolerance of traditional varieties of cowpea under salt stress. **Plants**, v. 11, p. 1863, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants11141863>

PRAXEDES, S. S. C. **Tolerância de variedades crioulas de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) ao estresse salino**. 2020. 59f. Tese (Doutorado em Manejo de Solo e Água) – Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, 2020.

PRAZERES, S. S. *et al.* Crescimento e trocas gasosas de plantas de feijão-caupi sob irrigação salina e doses de potássio. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 9, n. 2, p. 111-118, 2015. DOI: <https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v9i2.2161>

RENGEL, Z. *et al.* Magnesium alleviates plant toxicity of aluminium and heavy metals. **Crop and Pasture Science**, v. 66, p. 1298-1307, 2015. DOI: 10.1071/CP15284.

RIZWAN, M. *et al.* Effect of silicon on reducing cadmium toxicity in durum wheat (*Triticum turgidum* L. cv. Claudio W.) grown in a soil with aged contamination. *Journal of Hazardous Materials*, v. 209-210, p. 326-334, 2012.

RHOADES, J. D.; KANDIAH, A.; MASHALI, Q. M. **The use of saline waters for crop production**. Rome: FAO. 1992. (Irrigation and Drainage Paper, 48). https://www.ars.usda.gov/arsuserfiles/20361500/pdf_pubs/P1313.pdf

RICHARDS, L. A. **Diagnóstico e melhoramento de solos salinos e alcalinos**. Washington: Department of Agriculture, USDA, 1954. (Agricultural Handbook 60).

ROMANOSKI, V. S.; SOUZA FILHO, P.R. M.; PIMENTEL, A. J. B. Responses of cowpea cultivars to saline stress. **Revista de Agricultura Neotropical**, Cassilândia-MS, v. 9, n. 4, e7230, oct./dec. 2022. ISSN 2358-6303. DOI: <https://doi.org/10.32404/rean.v9i4.7230>

SANTOS, A. R. *et al.* Exogenous silicon and proline modulate osmoprotection and antioxidant activity in cowpea under drought stress. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, p. 1692–1699, 2022.

SCHMITT, L. **Crescimento e produção do feijoeiro comum com uso de silicato de cálcio e magnésio em solo do cerrado**. 2022. 30f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Instituto Federal Goiano, Posse, 2022.

SILVA, P. D.; SANT'ANA, A. L. Contribuição das sementes crioulas para efetivação de alguns princípios da Agroecologia: diagnóstico de sua produção e utilização em assentamentos rurais do Território Prof. Cory/Andradina-SP. **Ateliê Geográfico**, Goiânia, v. 16, n. 2, p. 256–275, 2022. DOI: [10.5216/ag.v16i2.71879](https://doi.org/10.5216/ag.v16i2.71879).

SOURI, Z.; *et al.* Silicon and plants: current knowledge and future prospects. **Journal Plant Growth Regulation**, v. 40, n. 3, p. 906–925, 2021.

SOUSA, J. T. M. *et al.* Physiological responses of peanut crops to irrigation with brackish waters and application of organo-mineral fertilizers. **Revista Caatinga**, v. 34, n. 3, p. 682-691, 2021a. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-21252021v34n320rc>

SOUZA, R. C. *et al.* Effect of salt stress on the imbibition curve of cowpea seeds. **Revista de agricultura neotropical**. 10, 3 (Aug. 2023), e7555. DOI: <https://doi.org/10.32404/rean.v10i3.7555>

STEFANOV, M. A. *et al.* (2024). Alterations in photosystem II complex and physiological activities in pea and maize plants in response to salt stress. **Plants**, 13, 1025. <https://doi.org/10.3390/plants13071025>

SÁ, F. V. S. *et al.* Influence of silicon in papaya plant growth. **Científica**, v. 43, p. 77-83, 2015b.

TAHIR, S.; GUARDIA, M. Treatment and valorization of leather industry solid wastes: A Review. **Jalca**, v. 104, n. 2, p. 52–67, 2012.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* **Manual de métodos de análises de solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017.

ULLAH, M. S.; MAHMOOD, A.; AMEEN, M. Papel multidimensional do silício para mitigar estresses bióticos e abióticos em plantas: uma revisão abrangente. **Silício**, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12633-024-03094-6>

VAN ZELM, E.; *et al.* Salt Tolerance Mechanisms of Plants. **Annual Review of Plant Biology**, v. 71, n. 1, 13 mar. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050718-100005>

WALTER, J. *et al.* Seasonal dynamics of soil salinity in peatlands: a geophysical approach. **Geoderma**, v. 310, p. 1-11, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.007>