

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CAMPUS DE JABOTICABAL**

KAILAINE DO NASCIMENTO FERREIRA

**SILÍCIO APLICADO VIA FERTIRRIGAÇÃO ASSOCIADO A REGIMES
HÍDRICOS NO CULTIVO DE FEIJÃO**

**JABOTICABAL-SP
2025**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CAMPUS DE JABOTICABAL**

**SILÍCIO APLICADO VIA FERTIRRIGAÇÃO ASSOCIADO A REGIMES
HÍDRICOS NO CULTIVO DE FEIJÃO**

Kailaine do Nascimento Ferreira

Orientador: Prof. Dr. Luiz Fabiano Palaretti

Coorientadores: Prof. Dr. Renato de Mello Prado

MSc. João Carlos dos Santos Duarte

Trabalho apresentado à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Câmpus de Jaboticabal, para graduação em ENGENHARIA AGRONÔMICA.

JABOTICABAL – SP
2025

F383s

Ferreira, Kailaine do Nascimento

Silício aplicado via fertirrigação associado a regimes hídricos no cultivo de feijão / Kailaine do Nascimento Ferreira. -- Jaboticabal, 2025

48 p. : tabs., fotos

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Agrônômica) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Luiz Fabiano Palaretti

Coorientador: Renato de Mello Prado

1. Manejo da irrigação. 2. Feijão comum. 3. Silicatos. 4. Eficiência no uso da água. I. Título.

KAILAINE DO NASCIMENTO FERREIRA

**SILÍCIO APLICADO VIA FERTIRRIGAÇÃO ASSOCIADO A REGIMES
HÍDRICOS NO CULTIVO DE FEIJÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Agrônômica.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Fabiano Palaretti

Coorientadores: Prof. Dr. Renato de Mello Prado

MSc. João Carlos dos Santos Duarte

Área de Concentração: Recursos Hídricos

Data da defesa: 08/07/2025

(x) Aprovado

() Reprovado

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente

LUIZ FABIANO PALARETTI

Data: 08/07/2025 15:30:45-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Luiz Fabiano Palaretti

UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal

Documento assinado digitalmente



JONATHAN DOS SANTOS VIANA

Data: 08/07/2025 09:37:15-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Jonathan Dos Santos Viana

Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão – UEMASUL – Imperatriz - MA

Centro de Ciências Agrárias

Documento assinado digitalmente



DANIEL CARLOS MACHADO

Data: 08/07/2025 10:09:53-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

M.Sc. Daniel Carlos Machado

UNESP – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal

Aprovado em reunião do Conselho do Departamento em:

14/7/25

“AD REFERENDUM”



Documento assinado digitalmente

LUIZ FABIANO PALARETTI

Data: 14/07/2025 15:04:03-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Luiz Fabiano Palaretti

Chefe do Departamento

Agradecimentos

A conclusão deste Trabalho de Conclusão de Curso representa não apenas o encerramento de uma importante etapa acadêmica, mas também a materialização de um projeto construído com esforço, dedicação e, acima de tudo, com o apoio de pessoas fundamentais ao longo dessa jornada.

Aos meus pais, Andreia do Nascimento e Antônio do Rosário Ferreira, expresso minha mais profunda gratidão pelo amor, incentivo e pelos valores transmitidos, que foram essenciais para a minha formação pessoal e acadêmica. Seu apoio incondicional foi, sem dúvida, o alicerce que me sustentou durante todo este percurso.

Ao meu orientador Prof. Dr. Luiz Fabiano Palaretti, agradeço pela orientação precisa, pela disponibilidade e pelo comprometimento ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Sua expertise e dedicação foram indispensáveis para a realização deste projeto.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Renato de Mello Prado, pela atenção, suporte técnico e pela partilha do seu vasto conhecimento, que enriqueceram profundamente este estudo.

Ao meu coorientador, M.Sc. João Carlos dos Santos Duarte pela orientação constante, paciência, disponibilidade e apoio técnico ao longo de todas as etapas deste projeto. Sua dedicação foi fundamental para a realização deste trabalho e para o meu crescimento acadêmico e profissional.

À Universidade Estadual Paulista – UNESP, estendo meus agradecimentos pela excelência no ensino, pela infraestrutura e pelas

oportunidades oferecidas durante minha formação, que contribuíram significativamente para o meu crescimento acadêmico.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), agradeço o apoio financeiro, que foi crucial para a viabilização deste trabalho e para a minha permanência na universidade.

Aos meus amigos, Josiel Marcos Carvalho Soares, Ana Carolina Moraes Fantin, Felipe Machado Camargo, por estarem presentes em todos os momentos dessa caminhada, oferecendo apoio, palavras de incentivo e, principalmente, tornando essa jornada mais leve e divertida. A amizade de vocês foi essencial para enfrentar os desafios do dia a dia, celebrar as conquistas e seguir em frente com bom humor e motivação. Sou grata por ter compartilhado essa fase tão importante da minha vida ao lado de vocês.

Também aos amigos mais antigos Arthur de Luca, Artur Micheletto, Guilherme Faria e Alex Moraes, meu agradecimento especial pela parceria, pelas conversas, pelas risadas e por cada momento de descontração que ajudou a tornar essa trajetória mais leve. A presença de vocês, mesmo nos dias mais corridos ou difíceis, foi fundamental para manter o ânimo e lembrar que a caminhada acadêmica também pode ser compartilhada com amizade e alegria.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para que este trabalho fosse possível, deixo registrado o meu mais sincero agradecimento.

ÍNDICE

RESUMO.....	VIII
ABSTRACT	IX
1. INTRODUÇÃO	10
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	12
2.1 Como o déficit hídrico afeta a cultura do feijão	12
2.2 Manejo de irrigação no feijoeiro.....	14
2.3 Efeito do Silício na atenuação do déficit hídrico.....	15
2.4 Aplicação de Silício via fertirrigação	17
3. MATERIAL E MÉTODOS	18
4. RESULTADO E DISCUSSÃO.....	26
5. CONCLUSÃO	42
6. REFERÊNCIAS.....	43

RESUMO

A crescente demanda por recursos hídricos para a produção de alimentos tem exigido estratégias que otimizem o uso de água pelas plantas, permitindo que a produtividade seja mantida mesmo sob condições de disponibilidade hídrica deficitária. Neste contexto, o silício (Si), embora não essencial é considerado um elemento benéfico, pois contribui para o aumento da fotossíntese, da osmorregulação e de diversos outros benefícios. Quando aplicado via fertirrigação, o Si pode atenuar os danos causados pelo déficit hídrico em culturas sensíveis como o feijão. Por esse fato esse trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos de diferentes doses de Si aplicados via fertirrigação sob três regimes hídricos. O experimento foi conduzido em um LATOSSOLO Vermelho eutroférico (LVef), historicamente cultivado com grãos, em sistema plantio direto. Os tratamentos consistiram em um fatorial 3x4, considerando o primeiro fator, os regimes hídricos de 80% (sem déficit hídrico); 60% (déficit hídrico moderado) e 40% (déficit hídrico severo) da capacidade de retenção de água no solo (CRA); e, como segundo fator as doses de 0; 4; 8 e 12 kg de Si ha⁻¹, fornecidos via fertirrigação. Os resultados demonstraram que as doses ideais para maximizar o acúmulo de silício nas plantas aumentaram conforme se intensificou o déficit hídrico, sendo: 7,0 kg ha⁻¹ para 80%CRA, 7,2 kg ha⁻¹ para 60% CRA e 7,9 kg ha⁻¹ para a CRA de 40%. Além disso, a aplicação do Si favoreceu o estado hídrico das plantas, refletido pelo aumento no conteúdo relativo de água nas folhas: 1,11% em 80% CRA, 1,14% em 60% CRA e 1,2% em 40% CRA, quando comparadas as plantas sem e com aplicação de Si na dose ideal. De modo geral, a utilização de Si se mostrou eficiente quando aplicado em doses moderadas, promovendo benefícios fisiológicos e contribuindo para a manutenção de altas produtividades, mesmo em condições de estresse hídrico severo

Palavras-chave: *Phaseolus vulgaris* L., déficit hídrico, irrigação, silicato, eficiência no uso da água

ABSTRACT

The increasing demand for water resources for food production has required strategies that enhance water use by plants, allowing productivity to be maintained even under conditions of water availability deficit. In this context, silicon (Si), although not essential, is considered a beneficial element as it contributes to increased photosynthesis, osmoregulation, and various other benefits. When applied via fertigation, Si can mitigate the damage caused by water deficit in sensitive crops such as beans. Therefore, this study aimed to evaluate the effects of different doses of Si applied via fertigation under three water regimes. The experiment was conducted in a eutrophic Red Latosol (LVef), historically cultivated with grains, using a no-till system. The treatments consisted of a 3x4 factorial design, considering the first factor as the water regimes of 80% (no water deficit); 60% (moderate water deficit); and 40% (severe water deficit) of the soil's water retention capacity (CRA); and the second factor as the doses of 0; 4; 8; and 12 kg of Si ha⁻¹, provided via fertigation. The results demonstrated that the ideal doses to maximize silicon accumulation in the plants increased as the water deficit intensified, being: 7.0 kg ha⁻¹ for 80% CRA, 7.2 kg ha⁻¹ for 60% CRA, and 7.9 kg ha⁻¹ for 40% CRA. Furthermore, the application of Si favored the water status of the plants, reflected by the increase in relative water content in the leaves: 1.11% at 80% CRA, 1.14% at 60% CRA, and 1.2% at 40% CRA, when comparing plants without and with the application of Si at the optimal dose. Overall, the use of Si proved to be effective when applied in moderate doses, promoting physiological benefits and contributing to the maintenance of high productivity, even under conditions of severe water stress.

Key Words: *Phaseolus vulgaris* L., water déficit, irrigation, silicate, water use efficiency

1. INTRODUÇÃO

A escassez de água representa um dos principais entraves à produção agrícola, especialmente em regiões áridas e semiáridas, onde os recursos hídricos são naturalmente limitados e com distribuição irregular (Rosa et al., 2020). As mudanças climáticas agravam esse cenário ao intensificarem eventos extremos, como secas prolongadas e aumento da evapotranspiração, comprometendo a estabilidade e a produtividade dos sistemas agrícolas (Khattak et al., 2025).

Diante desse contexto, estratégias de manejo sustentável do solo e da irrigação têm ganhado destaque, como o uso de práticas conservacionistas, a adoção de culturas tolerantes ao estresse hídrico e a aplicação de tecnologias de irrigação mais eficientes, capazes de otimizar o uso da água e aumentar a resiliência das plantas (Azadi et al., 2025; Pratibha et al., 2025).

O feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.), uma das principais leguminosas cultivadas no Brasil, é uma importante fonte de proteínas, fibras, vitaminas e minerais para a população (Habermann et al., 2019). No entanto, essa cultura é particularmente sensível à deficiência hídrica, que pode comprometer seu desenvolvimento e produtividade, ao afetar processos fisiológicos essenciais, como a fotossíntese, a condutância estomática e o potencial hídrico foliar (Fu et al., 2022).

Nesse cenário, o silício (Si), embora não seja considerado um nutriente essencial, tem sido reconhecido como um elemento benéfico para diversas espécies vegetais (Buchelt et al., 2021). Sua aplicação tem sido associada à mitigação de estresses abióticos, como a seca, por meio da melhoria na

absorção de água, maior estabilidade das membranas celulares e ativação de sistemas antioxidantes (Bhardwaj & Kapoor, 2021). Quando fornecido via fertirrigação, especialmente na forma de silicato de potássio ou sódio, o Si apresenta alta solubilidade e eficiência de absorção pelas plantas, permitindo uma distribuição mais uniforme, dosagens ajustáveis e maior eficácia mesmo em condições de estresse hídrico severo, além de reduzir a polimerização do elemento no solo (Silva et al., 2023)

A irrigação, nesse contexto, assume papel fundamental na mitigação dos impactos do déficit hídrico, promovendo maior estabilidade produtiva em condições climáticas adversas. Técnicas como irrigação localizada, uso de sensores de umidade no solo e modelos preditivos permitem uma gestão mais precisa e eficiente da água, reduzindo desperdícios e maximizando a produtividade (Dai et al., 2025). A integração entre estratégias de irrigação, manejo do solo e uso de condicionadores como o silício tem mostrado resultados promissores na manutenção do metabolismo vegetal e na conservação dos recursos hídricos (Pereira et al., 2024).

Estudos recentes com a cultura do feijão indicam que a aplicação de silício via fertirrigação contribuiu para a melhoria do status hídrico das plantas, aumento da eficiência do uso da água (WUE) e a redução das perdas fisiológicas em plantas sob estresse hídrico (Gonzalez-Porras et al., 2024). A associação entre o fornecimento de Si e diferentes regimes hídricos tem se mostrado eficaz na manutenção da turgidez celular, no aumento da taxa fotossintética e no acúmulo de matéria seca, favorecendo a resiliência da cultura frente às adversidades climáticas (Ibrahim et al., 2020; Gonzalez-Porras et al., 2024).

Dessa forma, pressupõe-se que a inclusão do Si no manejo nutricional possa colaborar para o uso racional e sustentável da água na irrigação do feijoeiro. Com base nisso, este trabalho busca responder às seguintes hipóteses: (i) existe uma dose ideal e economicamente viável de Si via fertirrigação, bem como teores adequados de Si no solo/solução e na planta para o cultivo do feijão; (ii) o Si é um elemento benéfico com potencial para mitigar os efeitos do déficit hídrico, tanto em condições moderadas quanto severas; e (iii) o fornecimento de Si via fertirrigação pode reduzir a necessidade hídrica da cultura, mantendo altos níveis de produtividade.

Para responder a essas hipóteses, este estudo foi conduzido com o objetivo de avaliar o efeito da aplicação de silício via fertirrigação e sua interação com diferentes regimes hídricos na cultura do feijão, buscando fundamentar estratégias para o uso eficiente da água com base em indicadores fisiológicos, bioquímicos e nutricionais em sistema de cultivo irrigado.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Como o déficit hídrico afeta a cultura do feijão

O Feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) é uma leguminosa amplamente consumida no Brasil, destacando-se por seu elevado valor nutricional. Ela é uma importante fonte de proteínas, carboidratos, fibras, vitaminas (principalmente dos complexos A, B1 e B2) e sais minerais como o ferro, cálcio, potássio e fósforo (Gonzaga., 2014). Em 2024/2025, a produção nacional de feijão foi estimada em aproximadamente 3,10 milhões de toneladas, distribuídas em três safras (CONAB, 2025).

A produtividade do feijoeiro é influenciada por diversos fatores podendo ser eles bióticos ou abióticos. Dentre os fatores abióticos, a disponibilidade hídrica é um dos mais limitantes ao seu desenvolvimento (Francisco et al., 2016). Devido ao seu sistema radicular superficial, concentrado entre 0,0 e 0,20 m de profundidade, e a elevada taxa de transpiração, o feijoeiro é muito sensível ao déficit hídrico (Webber et al., 2006).

Segundo Doorenbos e Kassam (1979), a exigência hídrica do feijoeiro é de 300 a 500 mm para a obtenção de elevado nível de produtividade. Entretanto, essa demanda é variável e se intensifica nos períodos de germinação, floração e o enchimento de grãos, nos quais a deficiência hídrica compromete significativamente o estande e o rendimento da cultura (Kattan & Fleming 1956).

Quando o déficit ocorre após a semeadura, pode comprometer significativamente a germinação, a emergência e a sobrevivência das plântulas (Andrade et al., 2006). Já durante a fase vegetativa, a deficiência de água limita o desenvolvimento da planta, sua altura e a área foliar. No período reprodutivo o estresse hídrico causa abscisão floral e a diminuição do número de vagens. Já na fase de enchimento de grãos, ocorre a diminuição no número e na massa de grãos (Guimarães, 1996).

Cunha et al. (2013), em experimentos com manejo da irrigação na cultura do feijão comum sob sistema de plantio direto, relatam que as plantas submetidas a déficit hídrico de 22% na fase reprodutiva reduziram a produtividade em 15%, enquanto, nas submetidas a 21 e 37% de déficit hídrico, em sequência, nas fases vegetativa e reprodutiva, a redução foi de 29%.

De forma complementar, Sousa e Lima (2010) afirmam que a suspensão da irrigação durante os estágios de desenvolvimento do feijoeiro impacta negativamente os componentes de rendimento da cultura. Segundo os autores, o estresse hídrico aplicado no estágio vegetativo promoveu a maior redução da produtividade, destacando-se como fase crítica para o suprimento hídrico. Esses resultados foram obtidos em estudo conduzido com a cultivar Carioca Comum, reforçando a necessidade de um manejo hídrico adequado ao longo de todo o ciclo da cultura.

2.2 Manejo de irrigação no feijoeiro

Nos últimos anos o Brasil passou por eventos climáticos severos como estiagens prolongadas, onda de calor e chuvas intensas fora de época (Besharat et al., 2020). Fatores esses que vem afetando drasticamente a produtividade de diversas culturas, como por exemplo a segunda safra de feijão de 2021/22 onde se teve uma baixa produção causada por chuvas abaixo da média esperada no Sudeste e Centro-oeste do país (INMET, 2022).

No Brasil tradicionalmente o feijão é cultivado em três diferentes safras a 1ª safra (de verão), com colheita de dezembro a fevereiro, nas regiões Centro-Sul, e, de fevereiro a abril, nas regiões Norte e Nordeste; a 2ª safra (safrinha), com colheita entre março e abril; e a 3ª safra, chamada de safra de inverno. Nesta última, a irrigação é uma técnica indispensável para a obtenção de produção em nível economicamente satisfatório (Richetti et al., 2015).

Devido a crescentes instabilidades climática, a irrigação se tornou uma estratégia em situações de ocorrência de déficit hídrico na produção de feijão (Cardozo et al., 2018). A irrigação ao suprir hidricamente as plantas proporciona a manutenção ativa do metabolismo (Webber et al., 2006).

Sistemas de irrigação como pivô central, aspersão convencional e gotejamento são os mais utilizados na cultura do feijão (Bernardo et al., 2008). O sistema por aspersão é amplamente utilizado pelo fato de ter um baixo custo de instalação e um manejo simples, entretanto ele apresenta um maior risco de aparecimento de doenças pelo molhamento foliar (Stones., 2023(a)). O sistema de pivô central é encontrado principalmente em áreas mais tecnificadas, que usam automação, e tenham maior controle da lâmina utilizada e cobertura de áreas extensas de forma eficiente (Stones et al., 2023(b))

O gotejamento, por sua vez, destaca-se por promover o uso racional da água e possibilitar a fertirrigação, assim reduzindo perdas por evaporação e percolação (Carvalho., 2009). Em experimentos conduzidos por Lacerra et al. (2023), o uso de gotejamento subsuperficial no feijão de inverno proporcionou uma produtividade entre 3.032 e 3.517 kg ha⁻¹, mesmo sem alterações significativas no conteúdo relativo de água nas folhas, indicando estabilidade fisiológica mesmo sob diferentes turnos de rega.

Bittencourt et al. (2023) também confirmaram os benefícios da irrigação em condições de estresse hídrico, já que o déficit reduziu significativamente a altura, área foliar e produtividade de cultivares de feijão, com impacto de até 31% na produção. Tais resultados indicam que estratégias de irrigação plena ou controlada, ajustada ao genótipo cultivado, são fundamentais para a estabilidade produtiva.

2.3 Efeito do Silício na atenuação do déficit hídrico

O silício (Si) é considerado um nutriente benéfico não essencial para as plantas, entretanto quando absorvido em alta concentração ele pode contribuir para a mitigação de estresses causados por fatores bióticos e abióticos como o

déficit hídrico (Zargar et al., 2019). Em condições de seca, ele auxilia em processos fisiológicos e bioquímicos dentro da planta, e principalmente ajuda a modular o sistema de defesa antioxidante (Gonzalez-Porras et al., 2024).

Depois do oxigênio o silício é o segundo elemento mais abundante na composição do solo, em forma de dióxido de silício (SiO_2), no entanto, na solução do solo ele é encontrado na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4) em baixa concentração (0,1 - 0,6 Mm) (Epstein, 1994). As plantas conseguem absorver o Si na forma de H_4SiO_4 (Barreto e Barão, 2023) por difusão simples ou facilitada, em seguida ele é transportado por meio da seiva do xilema ao longo do fluxo transpiratório até os brotos, onde ele vai se polimerizar em fitólitos e será depositado nas paredes celulares ou na cutícula (Singh et al., 2020).

Os efeitos benéficos do Si estão relacionados a preservação da integridade de pigmentos fotossintéticos (Rocha et al., 2021) e da regulação de sistemas enzimáticos (Oliveira et al., 2019) e não-enzimáticos de defesa antioxidante (Teixeira et al., 2021). Em plantas sob déficit hídrico, o Si é depositado nas células dos vasos do xilema e assim diminuem a perdas de água (Pei et al., 2010), além de induzir a osmorregulação, que se refletirá em ajustes na condutividade hidráulica das raízes, estimulando a atividades das aquaporinas (Abbas et al., 2015) e aumentando o volume e a capacidade de absorção de água e solutos.

Estudos recentes demonstraram que a utilização de Si traz resultados positivo diante condições de estresse hídrico em diversas culturas (Rocha et al., 2021). Em leguminosas, como o feijão, o Si proporcionou um aumento nos pigmentos fotossintéticos e na massa seca, além de melhorar a eficiência no uso

da água (Gonzalez-Porras et al., 2024). Na cana-de-açúcar, houve aumento de pigmentos fotossintéticos e melhora no aparato fotossintético mediante ao aumento da fluorescência (Teixeira et al., 2021).

2.4 Aplicação de Silício via fertirrigação

O uso da fertirrigação como método de aplicação de Si tende a ser mais eficiente, uma vez que, as fontes solúveis de Si são absorvidas mais facilmente pelas plantas, enquanto que, o uso de fontes sólidas demandaria maior quantidade do elemento visando acumulá-lo nos tecidos das plantas, por ter esta baixa solubilidade (Gonzalez-Porras et al., 2024).

Na fertirrigação a água e o fertilizante é aplicado simultaneamente pelo sistema de irrigação. Com isso, o parcelamento e a assertividade na aplicação localizada se convertem em menor desperdício e maior eficiência do uso do nutriente pela planta (Korndörfer; Pereira; Nolla, 2004). Assim, ao aplicar Si via fertirrigação é possível controlar melhor a dose, a frequência e o melhor momento para a aplicação do nutriente. Estudos realizados por Zanão Júnior (2009) mostraram que a fertirrigação com Si aumentou a concentração do elemento na solução do solo e a disponibilidade para a planta.

Por serem fonte solúveis e manterem a concentração adequada de Si na solução do solo na forma monomérica, o silicato de potássio, o silicato de sódio e o silicato de sódio e potássio estabilizado com sorbitol são fontes indicadas para aplicação via fertirrigação (Buchelt et al., 2023; Silva et al., 2023; Teixeira, de Mello Prado, et al., 2022;). A estabilidade dessas fontes deve se manter em concentrações inferiores a 3 mmol L^{-1} , pois quando superiores a o risco de ocorrer polimerização do Si no solo e assim dificultar sua absorção pela planta (Ma; Takahashi, 2002).

Em estudos com a cultura do feijoeiro foi possível observar que o Si fornecido por fertirrigação proporcionou uma melhor eficiência no uso da água, principalmente em déficit hídrico mais severo (Gonzalez-Porras et al., 2024). Além de promover um aumento na taxa fotossintética, área foliar, conteúdo relativo de água e produtividade em condições de baixa disponibilidade de água (Rocha et al., 2021).

3. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em condição de campo na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Extensão da UNESP campus de Jaboticabal, nas coordenadas geográficas: 21°14'05" S; 48°17'09". O clima da região é classificado como Aw, que indica tropical chuvoso, muito quente (Álvares et al., 2013).

Durante o período experimental, entre abril e junho de 2024, foram registrados extremos de 34,3 e 8,7 °C na temperatura do ar. A umidade relativa variou de 14,20 a 99,50 (Figura 1). Esses dados meteorológicos foram obtidos por meio da Estação Agroclimatológica do Departamento de Ciências Exatas da FCAV/UNESP-Campus de Jaboticabal, instalada próximo a área experimental.

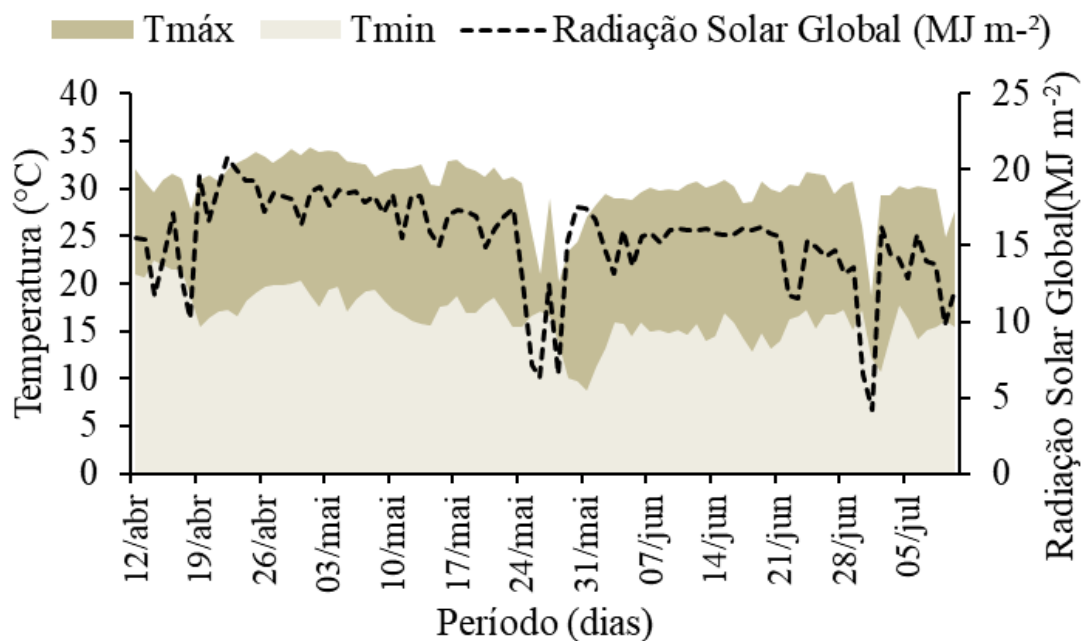


Figura 1: Temperatura máxima (Tmáx), Temperatura mínima (Tmin) e radiação solar global registrados durante o período experimental. Jaboticaba – SP, 2024.

O solo da área foi classificado por Andrioli e Centurion (1999) como um Latossolo Vermelho eutrófico (LVef) que se caracteriza por sua alta fertilidade e altos teores de ferro (EMBRAPA, 2021).

Anteriormente a instalação do projeto foram coletadas amostras de solo nas camadas de 0 - 20 e 20 - 40 cm com o auxílio de um trado holandês para a realização de análise química para fins de caracterização da fertilidade do solo. Dos atributos químicos (Tabela 1), o teor de Si encontrado no solo foi de 10,11 mg dm⁻³, considerado baixo segundo Korndorfer et al. (2004).

O solo foi preparado por meio de uma aração e duas gradagens e sem a aplicação de calcário.

A cultura utilizada neste projeto foi o feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) pertencente à família Fabaceae, o tipo de feijão escolhido foi do tipo carioca (cultivar IAC 1850) com base nos seus mecanismos de absorção passiva do Si,

que segue o gradiente de transpiração (Mitani et al., 2009). A cultivar IAC 1850 apresenta um ciclo médio de 85 a 90 dias (da emergência a maturação), além de apresentar alto potencial produtivo, e tolerância a doenças como antracnose e murcha de fusarium (IAC, 2022). A densidade de plantio foi fixada em 244.444 plantas ha⁻¹.

Tabela 1: Atributos químicos do solo nas camadas de 0-20 e 20-40 cm.

Camada (cm)	pH	M.O.	P _{resina}	S	H+Al	Al	K	Ca	Mg	SB	CTC	V%
	CaCl ₂	(g dm ⁻³)	(mg dm ⁻³)		(mmolc dm ⁻³)							
0 – 20	5,4	26	73	15	27	1	6,2	37	15	58,3	85,8	68
20 – 40	5,5	20	40	14	26	1	4,9	37	15	56,9	82,7	69
Camada (cm)	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Si	Areia	Silte	Argila	Da	CC	PMP
			(mg dm ⁻³)					%		g cm ⁻³		θ
0 – 20	0,32	5,5	14	24,1	1,7	10,11						
20- 40	0,36	5,1	12	23,2	0,9	10,11						

pH – em CaCl₂ por potenciometria; H+Al – em tampão SMP por potenciometria; M.O – por espectrofotometria; P - em resina por espectrofotometria; S – por turbidimetria; Ca – por espectrometria de absorção atômica; Mg - por espectrometria de absorção atômica; K - por espectrometria de absorção atômica; CTC = S.B+H+Al; V% = (SB/CTC)* 100; m% = (Al/(SB+Al))*100; B - pelo método da Azometina-H por espectrofotometria; Cu, Fe, Mn, Zn - em solução DTPA por espectrometria de absorção atômica

O experimento foi realizado em esquema fatorial 3x4, considerando o primeiro fator os regimes hídricos de 80% (sem deficiência); 60% (déficit hídrico moderado) e 40% (déficit hídrico severo) da capacidade de retenção de água do solo (CRA), e, como segundo fator as doses de 0; 4; 8 e 12 Kg ha⁻¹ de Si, fornecidas via fertirrigação.

Os tratamentos foram instalados em esquema de parcelas subdivididas, disposto em delineamento de blocos casualizados com quatro repetições. As parcelas experimentais tiveram dimensões de 2,25 m de largura com espaçamento entre linha de 0,45 m e 6 m de comprimento, tendo área total de 13,5 m² e área útil para as avaliações de 5,4 m².

As doses de Si foram escolhidas com base na recomendação do International Rice Research Intitute (IRRI), o qual recomenda doses de 40 a 60

kg ha⁻¹ de silício de potássio (15% de Si), que equivalem de 6 a 9 kg ha⁻¹ de Si (IRRI,1993). As doses de Si foram parceladas em seis aplicações sendo elas três durante o estágio vegetativo, aos 20, 27 e 34 dias após a emergência (DAE) e três no reprodutivo, aos 41, 48 e 55 DAE. Assim, as doses utilizadas em cada aplicação foi de 0; 0,67; 1,33 e 2,00 kg ha⁻¹ de Si, que diluídos numa lâmina de 2,5 mm, correspondem a 0; 0,96; 1,90 e 2,85 mmol L⁻¹ de Si na solução em cada aplicação, evitando assim a polimerização do elemento.

O parcelamento das aplicações, bem como a lâmina de 2,5 mm, foi uma estratégia adotada com o intuito de favorecer a absorção do silício pelas plantas, além de assegurar que a concentração utilizada em cada aplicação fosse menor que 3,5 mmol L⁻¹, evitando a polimerização do Si.

A solução de Si foi feita previamente, respeitando as concentrações adotadas, e na sequência injetadas no sistema de irrigação por meio de uma bomba injetora de pulso. Todas as aplicações ocorreram no período vespertino, com duração aproximada de 35 minutos cada. O protocolo adotado consistiu em 10 minutos iniciais para a estabilização da pressão no sistema de irrigação, seguidos por 15 minutos destinados à aplicação do Si, e finalizando com 10 minutos adicionais para a lavagem do sistema, visando evitar possíveis obstruções e acúmulos de resíduos.

A fonte de Si utilizada foi o silicato de sódio estabilizado com sorbitol (Si = 115,2 g L⁻¹, Na₂O = 60,5 g L⁻¹). O sorbitol presente nessa fonte possui propriedades estabilizantes que mantêm maior concentração de formas monoméricas de Si (Babiker e Duncan, 1974) diminuindo os riscos de polimerização da solução aplicada.

Para a irrigação foi utilizado um sistema de gotejamento autocompensante com espaçamentos de 0,5 m entre emissores, vazão de 1,6 L h⁻¹ e pressão de 1,5 kgf cm⁻², utilizando uma linha de gotejo para duas linhas de plantas.

Os níveis de capacidade de retenção de água (CRA) foram definidos com base na capacidade de água disponível (CAD), a qual foi determinada a partir da água disponível (AD) no solo. A AD foi calculada considerando a diferença entre a capacidade de campo (0,45 cm³ cm⁻³) e o ponto de murcha permanente (0,20 cm³ cm⁻³), resultando em um valor de 0,25 cm³ cm⁻³. Considerando uma profundidade efetiva do sistema radicular do feijão de 0,4 m, obteve-se uma CAD total de 96 mm. A partir desse valor, ajustou-se os níveis da CRA à 76,8 mm, 57,66 mm e 38,4 mm para os regimes hídricos de 80%, 60% e 40% da CRA.

A lâmina bruta de irrigação diária foi determinada pela relação entre a evapotranspiração da cultura (ETc) e a eficiência do sistema de irrigação, mensurado em campo. A ETc foi calculada pelo produto da evapotranspiração de referência (ETo), estimada pelo método de Penman-Monteith parametrizada pela FAO-56, e os coeficientes de cultivo (kc) para cada estágio de desenvolvimento (Allen et al., 1998).

As plantas submetidas aos regimes hídricos de 80%, 60% e 40% da CRA receberam lâminas totais de 336,782; 291,215 e 262,495 mm, somadas à 10,40 mm de precipitação acumulada durante período experimental (Figura 2).

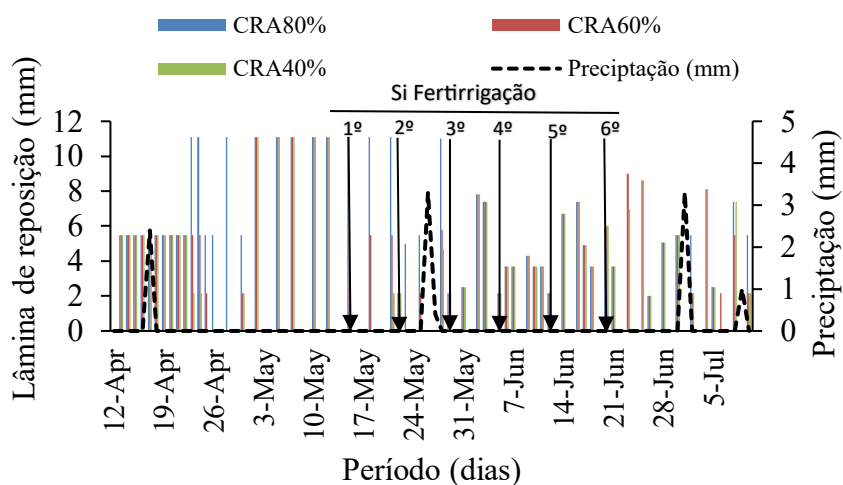


Figura 2: Lâminas de reposição com base nos regimes hídricos (80%, 60% e 40% CRA) e precipitação durante o ciclo de produção do feijão. Jaboticabal, UNESP, 2024.

A irrigação era realizada quando o déficit hídrico atingia o esgotamento máximo permitido de água disponível no solo. Para o esquema de irrigação recomendado pela FAO, ou seja, na condição sem déficit hídrico, as parcelas experimentais foram irrigadas quando 45% da água disponível no solo foi esgotada, portanto, a irrigação era aplicada quando o solo apresentava um armazenamento de água de 42, 31,9 e 21,12 mm para os regimes hídricos de 80%, 60% e 40% da CRA, respectivamente.

Inicialmente as plantas foram mantidas em condição hídrica adequada (80% CRA), sendo os níveis de déficit hídrico moderado e severo iniciados aos 30 dias após a emergência das plantas. O fornecimento de Si foi realizado por meio de fertirrigação, com início aos 20 dias após a emergência das plantas até 30 dias após florescimento pleno, sendo divididas em seis aplicações espaçadas por um período de sete dias.

As características morfológicas, fisiológicas, bioquímicas e nutricionais, começaram a ser realizadas aos 10 dias após a última fertirrigação com Si (40

dias após o florescimento pleno). As análises foram determinadas utilizando a coleta em 5 plantas por parcela coletada na área útil.

As análises realizadas foram:

a) Conteúdo de clorofila e carotenoides: Entre 8h e 9h da manhã foram coletados cinco discos foliares de 26,4 mm² da primeira folha totalmente desenvolvida, retirados do terço médio da planta. Após secagem e despigmentação, as leituras foram realizadas por um espectrofotômetro com comprimento de onda em 663 nm para clorofila a (Chla), 647 nm para clorofila b (Chlb) e 470 nm para carotenoides seguindo a metodologia proposta por Lichtenthaler (1987). Os resultados foram expressos em mg g⁻¹ de massa fresca.

b) Conteúdo relativo de água: Entre 8h e 9h da manhã foram coletados dez discos 26,4 mm² da primeira folha completamente desenvolvida, retirado do terço médio da planta, obtendo-se imediatamente a massa fresca (Mf). Na sequência, os discos foram reidratados em água deionizada por 6 horas para obtenção da massa túrgida (Mt). Posteriormente, os discos foram colocados em estufa de circulação forçada de ar a 80°C por 24h, obtendo-se a massa seca (Ms). O conteúdo relativo de água foi determinado pela equação proposta por Barrs e Weatherley (1962).

c) Índice de extravasamento de eletrólitos: Entre 8h e 9h da manhã foram coletados dez discos 26,4 mm² da primeira folha completamente desenvolvida, retiradas do terço médio da planta. Após imersão em água deionizadas por 2 horas foi medida a condutividade elétrica (EC1) da solução. Na sequência, as amostras foram autoclavadas a 121 °C durante 20 min e, após o resfriamento, mediu-se novamente a condutividade elétrica final (EC2). O extravasamento de

eletrólitos foi determinado pela relação entre EC1 e EC2 (Dionisio-Sese e Tobita, 1998).

d) Massa seca: Após a coleta das plantas, realizada por volta das 8 horas da manhã, a parte aérea submetida a um processo de lavagem sequencial: iniciando em água corrente; seguida por uma solução detergente (0,1% v/v); depois em solução de HCl a 0,3% (v/v) e, por fim, em água deionizada. Posteriormente, o material foi colocado em estufa com circulação forçada de ar mantida a $65\pm 5^{\circ}\text{C}$, até a obtenção de massa constante.

e) Teores de Si, N, P: As amostras coletadas para a determinação da produção de massa seca foram previamente moídas em moinho tipo Willey, utilizando-se a parte aérea da planta (folhas e hastes). A quantificação do teor de silício (Si) foi realizada a partir da extração do elemento com solução de peróxido de hidrogênio e hidróxido de sódio, conforme metodologia descrita por Kraska e Breitenbeck (2010). A absorvância do extrato foi medida a 410 nm, em espectrofotômetro modelo B442 (Micronal, Brasil), conforme Korndörfer et al. (2004). Os teores foliares de N e P foram determinados mediante digestão da amostra com ácido perclórico e nítrico, e a determinação do teor de potássio foi realizada por espectrofotometria de absorção atômica com chama de ar-acetileno (Bataglia et al., 1983). Com base nos teores de Si, N e de P na massa seca da parte aérea, calculou-se o acúmulo de Si e K, conforme a equação:

- *Acúmulo de Si ou N ou P (mg/planta)*

$$= \text{massa seca da parte aérea} \times \text{teor de Si ou N ou P (mg Kg}^{-1}\text{)}$$

f) Teor de Si no grão: para essa análise foi utilizado a mesma metodologia descrita anteriormente para análise da parte aérea, utilizando-se grãos secos e moídos.

g) Componentes de produtividade: foi determinado, a massa de 1000 grãos e a produtividade, de grãos na fase de maturação fisiológica.

A análise de variância foi realizada por meio do teste F ($p \leq 0,05$), após verificação da normalidade e homocedasticidade das variâncias (teste W de Shapiro-Wilks e teste de Bartlett). Quando significativa, foi aplicado o teste de comparação de médias de Tukey (5%) utilizando o software estatístico R 4.1.1 (R Core Team, 2021).

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

No acúmulo de silício na parte aérea das plantas não houve interação significativa entre os regimes hídricos (RH) e as doses de Si, havendo apenas efeitos isolados dos fatores (Figura 3a).

Os valores máximos de acúmulo de Si foram de 52,3; 42,67 e 44,13 mg planta⁻¹, nas doses de 7,0, 7,2 e 7,9 kg Si ha⁻¹, as quais podem ser consideradas as doses ótimas, para os regimes hídricos de 80%, 60% e 40% da CRA.

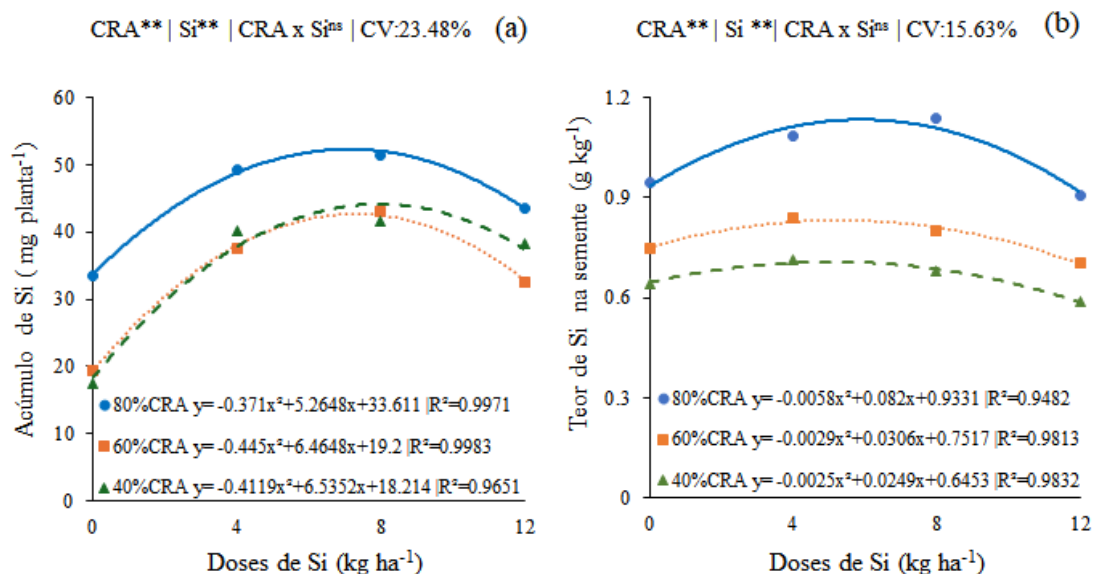


Figura 3: Acúmulo de silício (Si) (a) na parte aérea e Teor de Si na semente (b) plantas de feijão cultivadas sem déficit hídrico (80% CRA), com déficit moderado (60% CRA) e com déficit severo (40% CRA); combinado com quatro doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹. * e **: Significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente e ^{ns}: não significativo pelo teste F.

As doses ótimas de Si aumentaram o acúmulo do elemento no feijoeiro, com maior concentração nas plantas que estavam sob deficiência hídrica severa (40% CRA), as quais apresentaram um aumento de 2,5%, seguido de 2,2%, das plantas sob deficiência hídrica moderada (60% da CRA) e 1,5% daquelas sem restrição hídrica (80% da CRA).

Entretanto, foi possível observar que as plantas que se encontravam com deficiência hídrica severa apresentaram menor acúmulo de Si, mesmo precisando de maiores doses para atingir esses valores, por outro lado, nas que estavam com menor deficiência hídrica, o acúmulo foi maior, mesmo para as menores doses, corroborando Gonzales (2022).

Sendo assim, mesmo o feijão comum sendo considerado uma espécie não acumuladora (Mitane, 2005), quando submetida a fertirrigação com doses adequadas, o acúmulo de Si pode aumentar efetivamente nas plantas. Essa eficiência na aplicação de silício pode estar ligada a qualidade da fonte e a

concentração de Si, que neste estudo se encontrava em abaixo do nível de polimerização do silicato, além de estar estabilizada com sorbitol, o que reduz a possibilidade de uma possível polimerização do elemento (Kubicki e Heaney, 2001), com isso favorecendo a absorção do silício pela planta do feijão.

Dessa forma, comprova-se a primeira hipótese do estudo, ao demonstrar que existe uma dose ótima de silício para fertirrigação do feijoeiro, que varia com regime hídrico adotado. Essa dose promove o máximo acúmulo do elemento na parte aérea da planta, refletindo maior eficiência na absorção do elemento. Observou-se que os teores foliares de silício aumentaram proporcionalmente às doses fornecidas até que ocorresse a saturação dos mecanismos de absorção, decrescendo à partir daí, corroborando os resultados descritos por Ma e Yamaji (2006).

Quando analisamos os teores de Si que foram acumulado nas sementes podemos verificar que não houve interação significativa entre o regime hídrico e a dose de silício (Figura 3b). Nas doses de 5, 9; 5,3 e 4,9 kg ha⁻¹ de Si foram acumulados 1,13; 0,83 e 0,70 g kg de semente, seguindo a ordem de regimes hídricos de 80, 60 e 40% CRA.

Foi possível observar que nos regimes hídrico as curvas quadráticas apresentaram mesma tendencia, demonstrando o acúmulo de Si até um ponto máximo com as doses consideradas ótimas, seguido de uma leve queda com doses mais elevadas. Esse comportamento é consistente com resultados encontrados por Ma e Yamaji (2006), que explicam que a eficiência de absorção de Si geralmente atinge um platô em doses ótimas, pois o sistema de transporte pode ser saturado.

Assim como no acúmulo de Si na parte aérea os teores de Si nas sementes se mostram inferiores em condições de estresse hídrico mais severo (40% CRA) mesmo com doses crescentes de Si. Esse fator pode estar ligado a baixa disponibilidade de água que dificulta o transporte de Si pelas plantas, resultando em um menor acúmulo. Coskun et al. (2019) explicam que o Si é transportado via fluxo transpiratório e a redução na transpiração em condições de estresse hídrico severos limitam o movimento e a acumulação do elemento.

Como as plantas se encontravam em baixa disponibilidade de água a sua transpiração acabou sendo afetada o que limitou o movimento do Si para os tecidos superiores, como as sementes (Liang et al. 2007). Zhuu et al. (2019) reforçam essa ideia, destacando que em condições de seca o Si apresenta uma mobilidade reduzida dentro das plantas, o que afeta diretamente a capacidade de acumulação nas sementes.

O acúmulo de fosforo (P) não apresentou interação significativa entres os fatores CRA x Si, onde apenas os fatores de forma isolada apresentaram efeitos significativos ($p < 0,05$) (Figura 4a). Os maiores valores de acúmulo de P se deu na dose 0 kg ha^{-1} de Si que foram de 17,2; 12,9 e 11,1 mg por planta. Entre os três regimes hídricos o de 80% CRA se destacou por apresentar valores maiores em todas as doses em comparação com os outros dois regimes.

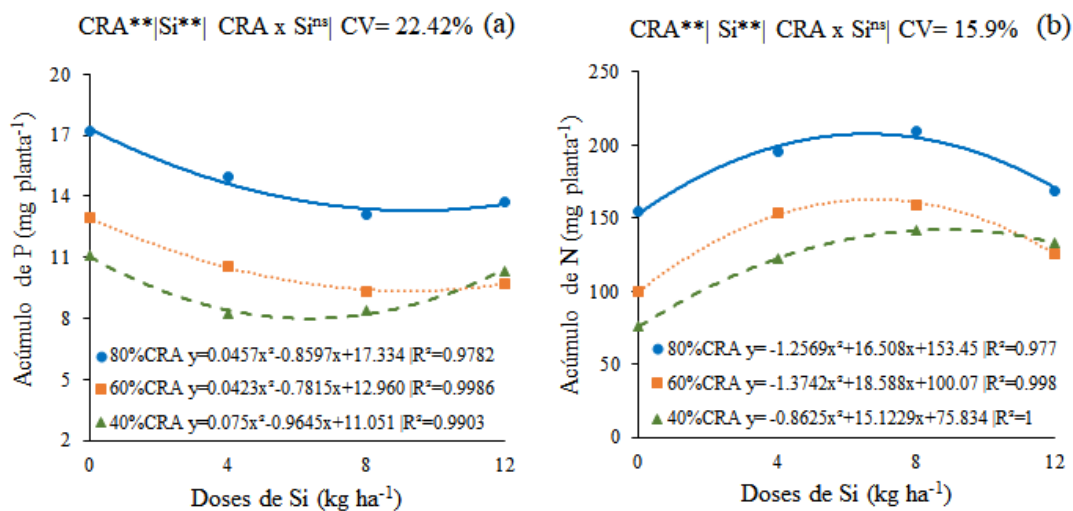


Figura 4: Acúmulo de Fósforo (P) (a) e acúmulo de Nitrogênio (N) (b) na parte aérea de plantas de feijão cultivadas sem déficit hídrica (80% CRA), com déficit moderada (60% CRA) e com déficit severo (40% CRA); combinado com quatro doses de Si fornecidas fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹. * e **: Significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente e ^{ns} : não significativo pelo teste F.

Em todos os tratamentos, a acumulação de fósforo tendeu a diminuir conforme as doses de Si aumentavam, especialmente até doses de 8 kg ha⁻¹. Esse resultado pode estar atribuído a uma possível interação competitiva entre o silício e o fósforo no solo, onde o aumento das doses de Si pode reduzir a disponibilidade de P para a planta. Este comportamento foi relatado por Ma e Takahashi (2002) onde eles nos mostram que o excesso de silício pode afetar a absorção de outros nutrientes, como fósforo e nitrogênio.

O P é um nutriente que é absorvido pelas plantas por meio da difusão, sendo assim a umidade do solo é um fator que pode interferir claramente na sua absorção (Barrow, 2017). Essa afirmação pode ser vista nos resultados encontrados, onde os maiores valores de acúmulo aconteceram em condições ideais de umidade de solo (80% CRA), sendo inferiores nas condições de déficit hídrico moderado (60% CRA) e menores em déficit hídrico severo (40% CRA). Silva et al. (2019) explica que em condições de estresse hídrico as

disponibilidades e o transporte de nutrientes do solo diminuem à medida que a umidade reduz, limitando a absorção de P.

Quando analisamos os resultados obtidos pelo acúmulo de Nitrogênio (N) pelas plantas de feijão verificamos que não ocorreu interação significativa entre os dois fatores analisados (CRA x Si), havendo apenas significância dos fatores de forma isolada ($p < 0,05$) (Figura 4b). Os máximos valores de acúmulo foram de 207,6; 162,9 e 142,1 mg por planta nas doses de 6,5; 6,7 e 8,7 kg ha⁻¹ (doses ótimas), respectivamente nos regimes hídricos de 80%, 60% e 40% CRA.

Para todos os níveis de CRA, houve um aumento inicial no acúmulo de N conforme ocorria o aumento das doses de Si até atingir as doses consideradas ótimas. Esse efeito pode ser explicado pela capacidade do Si de melhorar a eficiência de uso de N nas plantas, aumentando assim a capacidade fotossintética e a eficiência no uso da água, o que resulta em um maior acúmulo de biomassa e N (Epstein, 2009; Ma et al., 2015). Essa resposta positiva é particularmente evidente nos tratamentos com 80% e 60% CRA, o que sugere que o Si é mais eficaz em solos com maior disponibilidade de água, favorecendo o transporte e a absorção de nutrientes como o nitrogênio.

Contudo quando elevamos as doses de Si acima das doses consideradas ótimas ocorreu uma diminuição do acúmulo de N, especialmente em 80% CRA. Esse comportamento pode estar relacionado ao efeito antagonista de Si em altas concentrações, o qual pode interferir na absorção de outros nutrientes, como o N, ou mesmo causar desequilíbrios osmóticos na planta. O estudo de Coskun et al. (2019) demonstrou que, em condições de alta disponibilidade de Si, as

plantas podem optar por priorizar a absorção deste elemento em detrimento do N, resultando assim em uma menor concentração de N na planta.

O nível de 80% CRA resulta no maior acúmulo de N, seguido por 60% e 40%. Essa tendência mostra que solos com maior capacidade de retenção de água permitem uma absorção mais eficiente de N, provavelmente porque a umidade adequada favorece o transporte de nutrientes na solução do solo e minimiza o estresse hídrico. Segundo Marchner (2012) a disponibilidade de N no solo é influenciada pela umidade, uma vez que a mobilidade do nitrogênio depende da umidade do solo para sua movimentação em direção às raízes.

Avaliando o conteúdo relativo de água, podemos verificar que houve efeito apenas para os fatores de forma isolada, ou seja, não tivemos interação significativa entre os fatores regime hídrico e doses de Si (Figura 5a). Os máximos valores de conteúdos de água encontrados foram de 89,1; 81,8 e 78,7% nas doses de Si iguais a 6,25; 6,62 e 7 kg ha⁻¹ para os regimes hídricos de 80%, 60% e 40% CRA consecutivamente.

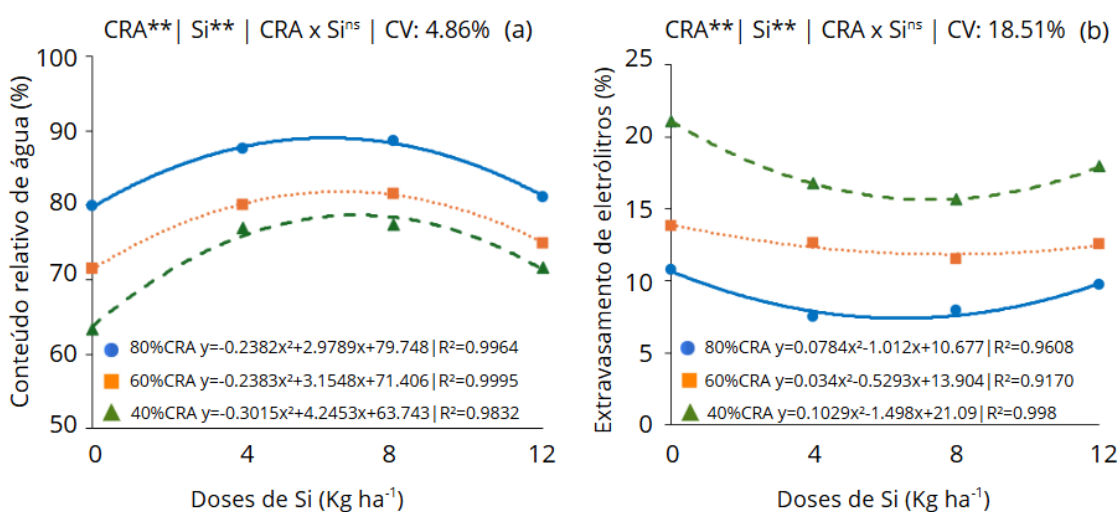


Figura 5: Conteúdo relativo de água (a) e Extravasamento de eletrólitos (b) em plantas de feijão cultivadas sem déficit hídrica (80% CRA), com déficit moderada (60% CRA) e com déficit severo (40% CRA); combinado com quatro doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹.

* e**: Significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente e ^{ns}: não significativo pelo teste F

As plantas que se encontravam em condições ideais (80% CRA) foram as que apresentaram maior conteúdo de água nos tecidos quando comparadas com as plantas que se encontravam em estresse hídrico moderado e severo. Entretanto pode-se notar que as plantas que receberam Si conseguiram reverter os danos causados pela deficiência hídrica de forma eficiente.

Foi possível observar que houve um aumento de conteúdo de água nas folhas de 1,11% no regime de 80% CRA; 1,14% no regime de 60% CRA e 1,2 % no regime de 40% CRA das plantas que não receberam fertirrigação de Si para as que receberam na dose ideal. Esse fator pode ser explicado por Liang et al. (2007) que nos mostra que o Si ajuda as plantas a gerenciarem melhor o estresse hídrico, minimizando a perda de água pela redução da transpiração e aumentando a eficiência do uso da água.

O extravasamento de eletrólito (IEE) das plantas não apresentou interação entre os fatores (CRA x Si), havendo apenas resultados isolados dos fatores analisados (Figura 5b). Os mínimos valores de extravasamentos de eletrólitos ocorreram nas doses de 6,4; 8 e 7,2 kg ha⁻¹ com valores de 7,4% no regime de 80% CRA; 11,5% para o regime de 60% CRA e 15,6% no regime hídrico severo (40% CRA).

O extravasamento de eletrólitos é uma medida da integridade da membrana celular e serve como um indicador da estabilidade e saúde das células, principalmente sob condições de estresse hídrico. Quando as membranas celulares estão danificadas, elas se tornam mais permeáveis, permitindo que íons escapem para fora das células (Blum e Ebercon, 1981) apresentando assim valores de IEE mais elevados.

O Si quando aplicado nas plantas atua como uma barreira física nas paredes celulares e na cutícula das plantas, ajudando a reduzir o impacto causado por fatores ambientais adversos (Liang et al., 2003). Em condições de estresse hídrico o Si contribui com a estabilidade da membrana ao reduzir o acúmulo de espécies reativas de oxigênio (EROs), que são responsáveis pelo estresse oxidativo e pelo aumento da permeabilidade da membrana (Guntzer et al., 2012), ou seja, reduzindo o extravasamento de eletrólitos em condições de estresse.

Analisando os resultados obtidos verificamos que o extravasamento de eletrólitos diminuiu com as doses crescentes de Si, especialmente em condições de CRA de 80% e 60% o que afirma que o Si pode auxiliar na manutenção da integridade da membrana celular. Entretanto em condições de deficiência hídrica severa (40% CRA) os valores se mantiveram altos mesmo com a elevação das doses de Si, indicando que o elemento oferece proteção limitada em condições de extrema seca, conforme foi apontado por Gao et al. (2006), que afirma que o Si é menos efetivo em estresses de intensidade elevada.

Os pigmentos fotossintetizantes Chla, Chlb, ClhT e Carotenoides não apresentaram efeitos interativos ($p > 0,05$) entre o regime hídrico e as doses de Si (Figura 6). As plantas tiveram pontos máximos de Chla de 0,39; 0,34 e 0,32 mg g^{-1} nas doses de Si de 6,40; 7,83 e 6,42 kg ha^{-1} . Os maiores teores de Chlb foram 0,15; 0,12 e 0,11 mg g^{-1} ocorrendo nas doses de Si de 6,6; 6,5 e 7,2 kg ha^{-1} de Si. O teor de clorofilas totais (ChaT) é a junção das Chla e Chlb, as quais apresentaram valores máximos de 0,40; 0,33 e 0,30 nas doses de 6,6; 7,2 e 6,8

kg ha⁻¹ de Si, respectivamente para os regimes hídricos de 80%, 60% e 40% CRA.

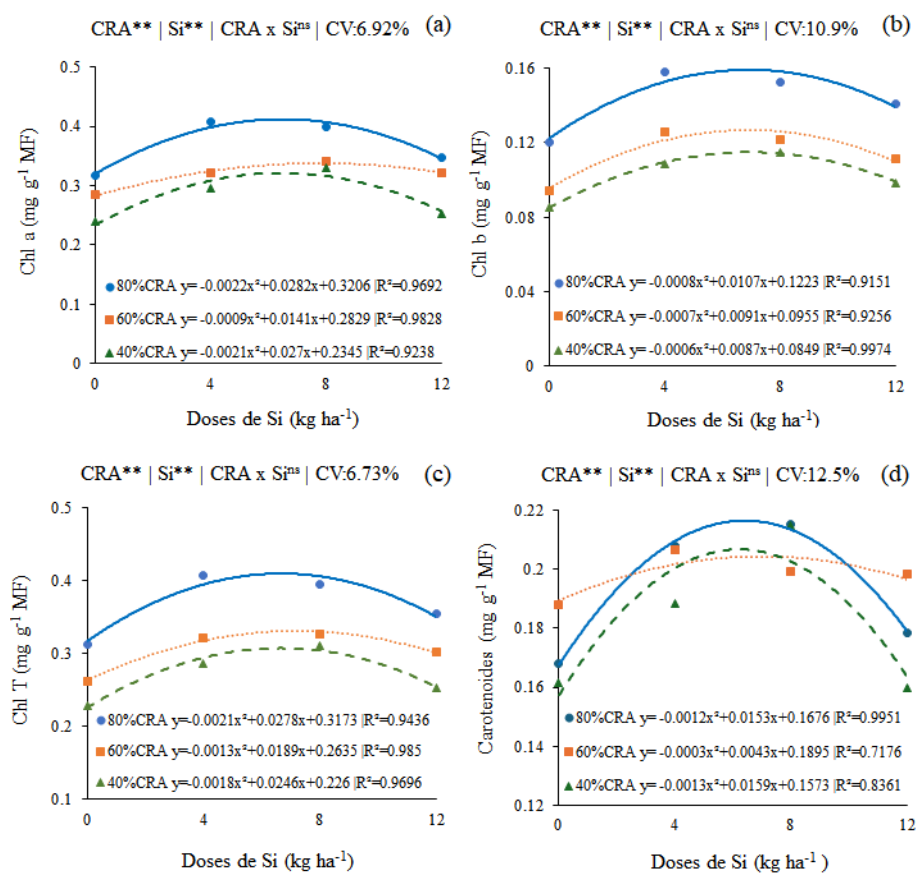


Figura 6: Teor de clorofila a (Chl a) (a), de clorofila b (Chl b) (b), clorofilas totais (Chl T) (c) e carotenoides (d) em plantas de feijão cultivadas sem déficit hídrico (80% CRA), com déficit moderado (60% CRA) e com déficit severo (40% CRA); combinado com quatro doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹. * e **: Significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente e ^{ns}: não significativo pelo teste F.

Os valores de teor máximo dos carotenoides foliares foram de 0,216; 0,205 e 0,206 mg g⁻¹ nas doses de 6,3; 7,1 e 6,1 kg ha⁻¹ de Si respectivamente para os regimes hídricos de 80%, 60% e 40% CRA. Nos três primeiros fatores (Chla, Chlb e ChlT) o regime hídrico de 80% CRA se destacou com valores superiores em todas as doses de Si analisadas, contudo nos carotenoides o regime hídrico de 60% se destacou com valores superiores nas doses de 0 e 12 kg ha⁻¹ de Si.

Conforme já mencionado, o silício atua na mitigação do estresse oxidativo ao estimular a atividade de enzimas antioxidantes, como relatado por Zhou et al. (2025). Além disso, contribui para a estabilidade dos cloroplastos organelas responsáveis pela síntese de pigmentos fotossintéticos, como clorofilas e carotenoides (Costa et al., 2025). De acordo com Wang et al. (2025), ao preservar a integridade celular, o Si auxilia na manutenção das concentrações desses pigmentos mesmo sob condições adversas como o déficit hídrico.

Essas afirmações ficam bastante visíveis nos resultados deste experimento onde se tem um aumento do teor de clorofila a, b e carotenoides com o aumento das doses de Si até atingir as doses consideradas ótimas. Entretanto doses de Si elevadas não se mostraram tão eficientes, tendo assim uma leve queda dos teores principalmente de carotenoides.

Além de sua atuação antioxidante, o silício contribui para a regulação do equilíbrio osmótico, auxiliando na manutenção do turgor celular e da hidratação das plantas sob condições de estresse (Irfan et al., 2023). Essa capacidade de retenção hídrica favorece a preservação de pigmentos essenciais, como clorofilas e carotenoides, mesmo em ambientes adversos (Manimaran et al., 2025). Segundo Ma e Yamaji (2006), ao promover a retenção de água nas células, o Si desempenha papel fundamental na proteção dos pigmentos fotossintéticos e na estabilidade funcional dos cloroplastos.

Com isso conseguimos responder a segunda hipótese do estudo, ao evidenciar que a aplicação de Si se mostrou eficaz na atenuação dos efeitos causados pelo déficit hídrico, principalmente nos regimes de escassez hídrica moderada e severa. Dentre os principais efeitos fisiológicos observados,

destaca-se o maior conteúdo relativo de água nas folhas, a redução no extravasamento de eletrólitos e a preservação dos pigmentos fotossintéticos, indicando menor degradação celular. Esses resultados sugerem que o silício contribui para a manutenção da integridade das membranas celulares e da eficiência fotossintética sob condições de estresse hídrico (Liang et al. 2007).

A massa seca da parte aérea das plantas apresentaram efeitos isolados dos fatores regime hídrico e dose de Si ($p < 0,05$) (Figura 7a). Os resultados para a produção máxima de massa seca foram de 19,2; 15,7 e 17 g por planta obtidas com as doses Si de 5,6; 5,5 e 6,6 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente para os regimes hídricos de 80%, 60% e 40% CRA. As plantas que se encontravam em condições ideais de umidade de solo apresentaram valores superiores em todas as doses de Si quando comparado com os outros dois regimes. As plantas que estavam em condições de déficit hídrico severo mostram resultados superiores as que encontravam-se em estresse moderado nas doses de 4, 8 e 12 kg ha⁻¹ de Si.

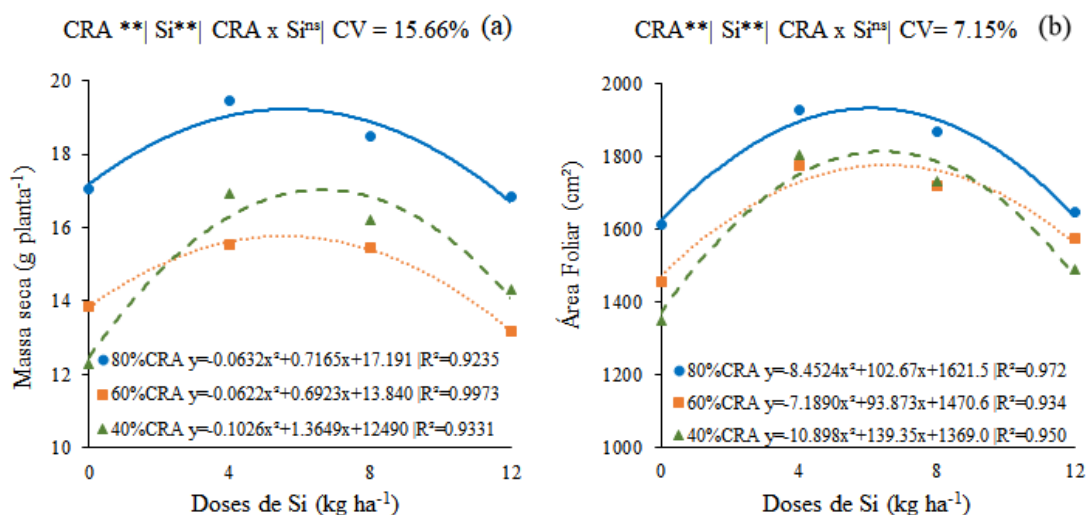


Figura 7: Massa seca (a) e Área Foliar (b) em plantas de feijão cultivadas sem déficit hídrico (80% CRA), com déficit moderado (60% CRA) e com déficit severo (40% CRA); combinado com quatro doses de Si fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹. * e **: Significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente e ^{ns}: não significativo pelo teste F.

Os resultados indicam que a aplicação de Si tem um efeito positivo na massa seca das plantas, principalmente em condições de disponibilidade hídrica mais alta (80% CRA). Em condições de estresse hídrico (60% e 40% CRA), o Si continua a ter efeito positivo, mas de forma reduzida. Isso pode ser explicado pelo papel do Si na mitigação do estresse hídrico, como sugerem Liang et al. (2007), que apontam que o Si melhora a capacidade de retenção de água e reduz a taxa de transpiração em plantas, ajudando na manutenção de processos fisiológicos essenciais.

Segundo Ma e Yamaji (2006), o Si forma uma camada de silicato nas folhas e nas células epidérmicas, reduzindo a perda de água e aumentando a tolerância ao estresse. Isso explica por que as plantas sob 80% CRA, que possuem maior disponibilidade de água, conseguem utilizar o Si de forma mais eficaz, resultando em maior massa seca.

Além disso, Zhu et al. (2019) observaram que o Si melhora a atividade antioxidante das plantas sob estresse hídrico, protegendo os tecidos fotossintéticos e promovendo o acúmulo de biomassa. No entanto, em condições de 40% CRA, o efeito é limitado, pois a absorção e o transporte de Si são prejudicados pela menor taxa de transpiração. Essa observação é consistente com os resultados da figura 7 a, onde a menor CRA está associada a uma menor resposta na massa seca.

A variável área foliar não apresentou interação significativa entre os fatores CRA e doses de Si, havendo apenas interação significativa de forma isolada de cada fator ($p < 0,05$) (Figura 7b). Os maiores valores de área foliar foram de 1933,34; 1777,05 e 1814,46 cm² nas doses de 6,07; 6,52 e 6,39 kg ha⁻¹

¹ de Si, respectivamente nos regimes hídricos de 80%, 60% e 40% CRA. As plantas que se encontravam sem restrição hídrica (80% CRA) foram as que apresentaram maiores valores de área foliar em todas as doses de Si. As doses de 4 e 8 kg ha⁻¹ no regime de deficiência se destacaram mostrando valores de área foliar, superiores quando comparado com os valores das plantas que estavam em déficit moderado nestas mesmas doses.

Avaliando os resultados podemos notar que o Si influencia positivamente a área foliar das plantas, sendo o efeito mais pronunciado em condições de maior disponibilidade hídrica (80% CRA). Já em situações de estresse hídrico (60% e 40% CRA), o Si continua a proporcionar um aumento na área foliar, só que em menor intensidade.

O Si quando armazenado nas plantas pode melhorar a estrutura das folhas e otimizar a captação de luz, o que resulta em uma maior área foliar. Liang et al. (2007) indicam em seu trabalho que o Si ajuda a mitigar os efeitos do estresse hídrico ao melhorar a integridade estrutural das folhas e ao reduzir a perda de água. Isso pode explicar os valores mais elevados de área foliar na condição de 80% CRA, onde as plantas têm maior capacidade de absorção de Si em resposta ao tratamento.

Ma e Yamaji (2006) descrevem que o Si forma uma camada de silicato nas células epidérmicas, o que contribui para reduzir a transpiração e, conseqüentemente, a perda de água. Esse efeito é mais evidente quando a disponibilidade hídrica é moderada a alta, o que coincide com os resultados observados em 80% CRA. Em condições de baixa CRA (40%), a redução da

área foliar pode ser atribuída à limitação na absorção e transporte de Si devido à menor taxa de transpiração.

Além disso, Zhu e Gong (2014) relatam que o Si contribui para a fotossíntese e para o crescimento foliar, o que pode explicar o aumento da área foliar nas plantas com doses moderadas de Si (4-6 kg ha⁻¹). Em condições de estresse hídrico, o benefício é reduzido, pois o movimento do Si na planta é limitado pela menor quantidade de água disponível para transporte.

A produtividade final apresentou significância apenas dos fatores regime hídrico e dose de Si de forma isolada ($p < 0,05$) (Figura 8). As máximas produtividades foram de 2087,170; 1702,359 e 1515,689 kg ha⁻¹, nas doses de 4,9; 3,8 e 7,7 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente nos regimes hídricos de 80%, 60% e 40% CRA. As plantas que se encontram em situação de umidade de solo adequadas (80% CRA) foram as que apresentaram maiores valores de produtividade em todas as doses de Si.

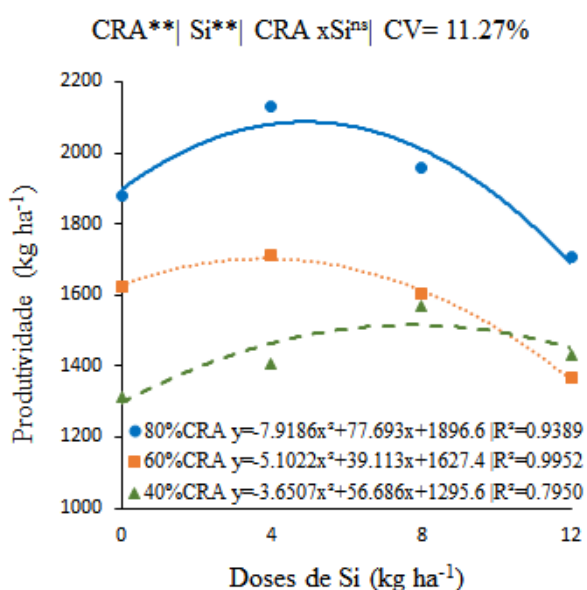


Figura 8: Produtividade em plantas de feijão cultivadas sem déficit hídrico (80% CRA), com déficit moderado (60% CRA) e com déficit severo (40% CRA); combinado com quatro doses de Si

fornecidas via fertirrigação: 0, 4, 8 e 12 kg ha⁻¹. * e **: Significativo a 1 e 5% de probabilidade, respectivamente e ^{ns}: não significativo pelo teste F.

A aplicação de Si se mostrou eficiente para o aumento da produtividade do feijão, quando comparamos a dose zero com as doses encontradas como ideais, observou-se um aumento na produtividade de 13% na CRA 80%, de 5% na CRA 60% e 19% na CRA 40%. Moreira (2010) encontrou resultados parecidos só que na cultura da soja que também é uma leguminosa, onde observaram que, a aplicação de Si favoreceu o aumento na produtividade de grãos em média de 20 sacas ha⁻¹ a mais em relação as que não receberam as três doses de Si utilizadas.

Esse aumento de produtividade pode estar relacionado a forma que o Si age quando absorvido e armazenado pelas plantas, onde ele melhora a resistência das plantas ao estresse hídrico e à absorção de nutrientes, potencializando assim a produtividade em condições de maior disponibilidade hídrica (Bittencourt et al., 2023).

É de suma importância observarmos que existe uma dose ótima de Si que pode maximizar a produtividade, entretanto que quando essa dose é ultrapassada o excesso de Si pode causar efeitos negativos como neste caso a diminuição da produtividade de grão da cultura.

O fator regime hídricos também foi de suma importância para a produtividade, onde no tratamento de 80% CRA a produtividade se mostrou muito superior aos outros regimes hídricos. Isso indica que a retenção de água adequada proporciona um ambiente mais estável e favorável para a absorção de nutrientes e a atividade do Si na planta, reduzindo o estresse hídrico e promovendo uma maior eficiência fotossintética. Pereira et al. (2020),

demonstram que a disponibilidade de água é essencial para a translocação e ação do Si nas células, ajudando na manutenção da turgescência e na resistência ao estresse.

No tratamento de 40% CRA podemos observar uma redução da produtividade, o que pode estar relacionado com a baixa capacidade de retenção de água a qual pode limitar a disponibilidade do Si para a planta e aumenta o risco de estresse hídrico, reduzindo o impacto do Si na produtividade. De acordo com Medeiros e Costa (2019), solos com pouca retenção de água dificultam a absorção de nutrientes e reduzem a atividade do Si na planta.

Através dos resultados obtidos, a terceira hipótese é respondida, observou-se que o fornecimento de Si via fertirrigação promoveu ganho significativo de produtividade, mesmo sob condições de déficit hídrico severo. Sugerindo ainda que o uso de silício permite a redução da lâmina de irrigação sem prejuízo ao desempenho agrônômico, configurando-se como uma alternativa estratégica e viável para regiões sujeitas à escassez hídrica ou com alto custo de irrigação.

5. CONCLUSÃO

A aplicação de silício via fertirrigação se mostrou eficiente, ocasionando a melhora das condições das plantas de feijão sob estresse hídrico severo e moderado. As doses de Si 6,2; 6,5 e 7 kg ha⁻¹ se mostraram ideais para essa cultura nos regimes hídricos de 80%, 60% e 40% CRA consecutivamente, pois elas ajudam a maximizar e conservar os teores de pigmentos fotossintetizantes como as clorofilas e carotenoides o que conseqüentemente faz elevar a produtividade final.

6. REFERÊNCIAS

- ABBAS, T., BALAL, R.M., SHAHID, M.A., PERVEZ, M.A., AYYUB, C.M., AQUEEL, M.A., JAVAID, M.M., 2015. Silicon-induced alleviation of NaCl toxicity in okra (*Abelmoschus esculentus*) is associated with enhanced photosynthesis, osmoprotectants and antioxidant metabolism. *Acta Physiol. Plant.* 37, 1–15. <https://doi.org/10.1007/s11738-014-1768-5>
- ALLEN, R.G., PEREIRA, L.S., RAES, D., SMITH, M., 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage, Roma.
- ANDRADE, E. T.; CORREA, P. C.; TEIXEIRA, L. P.; PEREIRA, R. G.; CALOMENI, J. F. Cinética de secagem e qualidade de sementes de feijão. *Engvista, Niterói*, v. 8, n. 2, p. 83- 95, 2006.
- ANDRIOLI, I., CENTURION, J.F., 1999. Levantamento detalhado dos solos dá-se mostrou eficiente Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, Anais. Brasília. BABIKER, A.G.T., DUNCAN, H.J., 1974. Penetration of bracken fronds by asulam as influenced by the addition of surfactant to the spray solution and by pH. *Weed Res.* 14, 375–377.
- AZADI, Y.; YAGHOUBI, J.; GHOLIZADEH, H.; GHOLAMREZAI, S.; FEYZABAD, F. R. Improving irrigation water productivity and crop yield under climate change: Advances in precision agriculture. *Agricultural Water Management*, [S. l.], v. 290, p. 109338, 2025.
- BABIKER, A. G. T. & DUNCAN, H. J. (1974). Penetration of bracken fronds by asulam as influenced by the addition of surfactant to the spray solution and by pH. *Weed Research*, 14(6), 375–377.
- BARRETO, RF, BARÃO, L. (2023). “Silício: absorção e transporte transcelular e apoplástico no xilema”, em *Benefícios do silício na nutrição de plantas* (Springer International Publishing, Cham), 17–25.
- BARROW, N. J. (2017). The effects of pH on phosphate uptake by plants: Solubility, diffusion and sorption of phosphate in soils. *Plant and Soil*, 410(1-2), 401-410.
- BARRS, H., WEATHERLEY, P., 1962. A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves. *Aust. J. Biol. Sci.* 15, 413– 428.
- BATAGLIA, O.C., FURLANI, A.M.C., TEIXEIRA, J.P.F., FURLANI, P.R., GALLO, J.R., 1983. Métodos de análise química de plantas (No. 78). Campinas. Bates, L.S., Waldren, R.P., Teare, I.D., 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant Soil* 39, 205–207.
- BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. Manual de Irrigação. 8. ed. Viçosa, MG: Universitária, 2008. 625 p.
- BESHARAT, S., BARÃO, L., & CRUZ, C. (2020). Novas estratégias para superar a limitação hídrica no milho cultivado: resultados da irrigação subterrânea e fertilização com silício. *Journal of Environmental Management* , 263 , 110398.

- BHARDWAJ, S.; KAPOOR, D. Fascinating regulatory mechanism of silicon for alleviating drought stress in plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, v. 166, p. 1044–1053, 2021.
- BIRCHALL, J.D., 1995. The essentiality of silicon in biology. *Chem. Soc. Rev.* 24, 351–357.
- BITTENCOURT, F. S. et al. Irrigation management of common bean cultivars with contrasting growth habits. *Scientia Agricola*, v. 80, p. e20220088, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2022-0088>.
- BLUM, A., & EBERCON, A. (1981). Cell membrane stability as a measure of drought and heat tolerance in wheat. *Crop Science*, 21(1), 43-47.
- BUCHELT, A. C. et al. Effects of silicon fertigation on dry matter production and crude protein contents of a pasture. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 21, n. 4, p. 3402–3413, 2021.
- BUCHELT, A. C., de MELLO PRADO, R., CAIONE, G., DE MOURA ZANINE, A., JUSTINA, S. M. Dela, SILVA RIBEIRO, J., de SOUZA JÚNIOR, A. M., de JESUS FERREIRA, D. & da SILVA DE SOUSA, F. C. (2023). The use of soluble silicon via fertigation and leaf application in panicum maximum modulates production without decreasing grass quality. *Silicon*, 15(17), 7553–7563.
- CANTARELLA, H.; MATTOS, DIRCEU. 2.3. In: H. Cantarella, J.A. Quaggio, D. Mattos Jr., R.M. Boaretto, Raj, B. van. (Org.). *Boletim 100: Recomendações de adubação e calagem para o estado de São Paulo*. 1ed. Campinas.: Instituto Agrônomo de Campinas. 2022. v. 1, p. 86-94.
- CARVALHO, J.J. “Comparação de métodos de manejo da irrigação no feijoeiro, nos sistemas plantio direto e convencional”. 2009. 20 P. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrônoma) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2009.
- CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos, Brasília, DF, v. 12, safra 2024/25, n. 9 nono levantamento, junho 2025
- COSKUN, D., DESHMUKH, R., SONAH, H., MENZIES, J. G., REYNOLDS, O., MA, J. F., & BÉLANGER, R. R. (2019). The controversies of silicon in plant nutrition. *Trends in Plant Science*, 24(7), 629-638.
- COSTA, M. G. et al. *Silicon, by modulating homeostasis and nutritional efficiency, increases the antioxidant action and tolerance of bell peppers to phosphorus deficiency*. *Scientia Horticulturae*, v. 343, p. 114093, Mar. 2025. DOI: 10.1016/j.scienta.2025.114093.
- CUNHA, P. C. R. et al. Manejo da irrigação no feijoeiro cultivado em plantio direto. *R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental, Campina Grande*, v. 17, n. 7, p. 735–742, 2013.
- DIONISIO-SESE, M.L., TOBITA, S., 1998. Antioxidant responses of rice seedlings to salinity stress. *Plant Sci.* 135, 1–9.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. Yield response to water Roma: FAO, 1979. 193p. (Irrigation and Drainage Paper, 33).

EMBRAPA. *Latossolos Vermelhos*. Brasília, DF: Embrapa. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/solos-tropicais/sibcs/chave-do-sibcs/latossolos/latossolos-vermelhos> . Acesso em: 13 jun. 2025.

EPSTEIN, E. (2009). Silicon: Its manifold roles in plants. *Annals of Applied Biology*, 155(2), 155-160.

EPSTEIN, E., 1994. The anomaly of silicon in plant biology. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 91, 11–17.

FIROUZABADI, A.G., BAGHANI, J., JOVZI, M., ALBAJI, M., 2021. Effects of wheat row spacing layout and drip tape spacing on yield and water productivity in sandy clay loam soil in a semi-arid region. *Agric. Water Manag.* 251, 106868.

FRANCISCO, P. R. M.; BANDEIRA, M. M.; SANTOS, D.; PEREIRA, F. C.; GONÇALVES, J. L. G. Aptidão climática da cultura do feijão comum (*Phaseolus vulgaris*) para o estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Climatologia, Paraíba-PB*, v. 19, n. 1, p. 366-378. 2016.

FU, Z. et al. Atmospheric dryness reduces photosynthesis along a large range of soil water deficits. *Nature Communications*, v. 13, n. 1, p. 1–10, 2022.

GAO, X., ZOU, C., WANG, L., & ZHANG, F. (2006). Silicon decreases transpiration rate and conductance from stomata of maize plants. *Journal of Plant Nutrition*, 29(9), 1637-1647.

GONZAGA, A. C. de O. (Ed.). *Feijão: o produtor pergunta, a Embrapa responde*. 2. ed. rev. e atual. Brasília, DF: Embrapa, 2014.

GONZALEZ-PORRAS, C. V. et al. Silicon via fertigation with and without potassium application improves physiological aspects of common beans cultivated under three water regimes in field. *Scientific Reports*, v. 14, n. 1, p. 1–19, 2024.

GUIMARÃES, C. M.; STONE, L. F.; BRUNINI, O. Adaptação do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) à seca. II. Produtividade e componentes agronômicos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 31, n. 7, p. 481–488, 1996.

GUNTZER, F., KELLER, C., & MEUNIER, J. D. (2012). Benefits of plant silicon for crops: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32, 201-213.

HABERMANN, E. et al. Warming and water deficit impact leaf photosynthesis and decrease forage quality of a C4 tropical grass. *Physiologia Plantarum*, v. 165, n. 2, p. 383–402, 2019.

IBRAHIM, M. F. M. et al. Regulation of agronomic traits, nutrient uptake, osmolytes and antioxidants of maize as influenced by potassium silicate under deficit irrigation. *Agronomy*, v. 10, n. 8, p. 1212, 2020.

INMET – INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. Resumo climático anual: 2020 a 2023. Brasília: INMET, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/inmet>. Acesso em: 10 maio 2025.

INSTITUTO AGRONÔMICO DE CAMPINAS (IAC). IAC lança a 50ª cultivar do feijão Carioca. Campinas: IAC, 2022. Disponível em: <https://www.iac.sp.gov.br/noticiasdetalhes.php?tag=1281> . Acesso em: 13 jun. 2025.

IRFAN, Muhammad; MAQSOOD, Muhammad Aamer; REHMAN, Hafeez ur; MAHBOOB, Wajid; SARWAR, Nadeem; HAFEEZ, Osama Bin Abdul; HUSSAIN, Saddam; ERCISLI, Sezai; AKHTAR, Muhammad; AZIZ, Tariq. Silicon Nutrition in Plants under Water-Deficit Conditions: Overview and Prospects. *Water*, Basel, v. 15, n. 4, p. 739, 13 fev. 2023.

IRRI, 1993. Rice research in a time change: IRRI's medium-term plan for 1994-1998. International Rice Research Institute, Los Banos, Philippines.

KATTAN, A.A.; FLEMING, J.W. Effect of irrigation at specific stages of development on yield, quality growth and composition of snap beans. *Proceedings of the American Society for Horticultural Science*, v.68, p.329-342, 1956.

KHATTAK, W. A.; SUN, J. ZAMAN, F; JALAL, A. SHAFIQ.M; MANAN., S.; HAMEED, R.; KHAN, I.; KHAN, I. U.; KHAN, K. A.; DU, D. The role of agricultural land management in modulating water–carbon interplay within dryland ecological systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, [s.l.], v. 359, p. 109315, 2025.

KORNDÖRFER, G.H., PEREIRA, H.S., NOLLA, A., 2004. Análise de silício no solo, planta e fertilizantes, 2nd ed. UFU, Uberlândia.

KRASKA, J.E., BREITENBECK, G.A., 2010. Simple, robust method for quantifying silicon in plant tissue. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 41, 2075–2085.

KUBICKI, J. D.; HEANEY, P. J. Molecular dynamics modeling of silica polymerization: the effect of sorbitol on Si(OH)₄ oligomer formation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 65, n. 22, p. 3657–3671, 2001

LIANG, Y. C., CHEN, Q., LIU, Q., ZHANG, W. H., & DING, R. X. (2003). Exogenous silicon (Si) increases antioxidant enzyme activity and reduces lipid peroxidation in roots of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.). *Journal of Plant Physiology*, 160(10), 1157-1164.

LIANG, Y., SUN, W., SI, J., & RÖMHELD, V. (2007). Effects of foliar- and root-applied silicon on the enhancement of drought tolerance in sorghum. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 170(5), 739–744.

LIBARDI, V. C. M. Efeitos de diferentes níveis de irrigação e do déficit hídrico na produção do feijoeiro. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, p. 49, 1996.

LICHTENTHALER, H.K., 1987. Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. *Methods Enzymol.* 148, 350–382.

- MA, J. F., & TAKAHASHI, E. (2002). Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan. Elsevier.
- MA, J. F., & YAMAJI, N. (2006). Silicon uptake and accumulation in higher plants. *Trends in Plant Science*, 11(8), 392–397.
- MA, J. F., TAKAHASHI, E., & YAMAJI, N. (2015). Soil, Fertilizer, and Plant Silicon Research in Japan. Elsevier.
- MANIMARAN, G.; DURAISAMY, S.; SUBRAMANIAM, T.; RANGASAMY, A.; ALAGARSAMY, S.; JAMES, P.; SELVABU, S.; PERUMAL, D.; VEERAPPAN, Ma.; ERRAKUTTY ARUNAN, Y.; PERIAKARUPPAN, J. Silicon-driven approaches to salinity stress tolerance: Mechanisms, uptake dynamics, and microbial transformations. *Plant Stress*, v. 16, p. 100825, 2025.
- MARSCHNER, P. (2012). Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants (3rd ed.). Academic Press.
- MEDEIROS, A. R., & COSTA, J. L. (2019). Impacto da Baixa Retenção de Água no Solo sobre a Eficácia do Silício na Agricultura. *Brazilian Journal of Soil Science*
- MITANI, N., JIAN, F.M., IWASHITA, T., 2005. Identification of the silicon form in xylem sap of rice (*Oryza sativa* L.). *Plant Cell Physiol.* 46, 279–283.
- MITANI, N., YAMAJI, N., MA, J.F., 2009. Identification of maize silicon influx transporters. *Plant Cell Physiol.* 50, 5–12.
- MOREIRA, A.R., FAGAN, E.B., MARTINS, K.V., & SOUZA, C. E. E. (2010). Resposta da cultura da soja a aplicação de silício foliar. *Bioscience Journal*, Uberlândia, 26, (3): 413-423
- OLIVEIRA, R.L.L., PRADO, R.M., FELISBERTO, G., CRUZ, F.J.R., 2019. Different sources of silicon by foliar spraying on the growth and gas exchange in sorghum. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 19, 948–953.
- PEI, Z.F., MING, D.F., LIU, D., WAN, G.L., GENG, X.X., GONG, H.J., ZHOU, W.J., 2010. Silicon improves the tolerance to water-deficit stress induced by polyethylene glycol in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. *J. Plant Growth Regul.* 29, 106–115.
- PEREIRA, L. M., OLIVEIRA, C. A., & SILVA, F. P. (2020). Silício e Capacidade de Retenção Hídrica no Solo: Efeito na Produtividade Agrícola. *Journal of Agricultural Sciences*.
- PRATIBHA, G.; SRINIVAS, I.; KUNDU, S.; INDORIA A. K.; RAO, S.; MANJUNATH, M.; ISLAM, A.; SUVANA, S.; SRINIVAS, K.; RAO, K.V.; NAGASREE, K.; ROHIT, J.; RAJU, B.M.K.; SHANKER, A. K.; ANNA, S.; RAJASHREE, BISWAS, A. K.; RAO. S.; SINGH, V.K.; CHAUDHARI, S.K. Conservation agriculture for sustainable intensification of rainfed semi-arid tropics. **Advances in Agronomy**, p. 291–375, 2025.
- R Core Team (2021). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Available.

- RICHETTI, A.; ITO, M. A. Viabilidade econômica da cultura do Feijão-Comum, safra da seca de 2016, em Mato Grosso do Sul. Comunicado Técnico 2018, n. 1, p. 1– 11, dez. 2015.
- ROCHA, J. R. et al. Si fertigation attenuates water stress in forages by modifying carbon stoichiometry, favouring physiological aspects. *Journal of Agronomy and Crop Science*, v. 207, n. 5, p. 1–13, 2021.
- ROCHA, J.R., de MELLO PRADO, R., TEIXEIRA, G.C.M., de OLIVEIRA FILHO, A.S.B., 2021. Si fertigation attenuates water stress in forages by modifying carbon stoichiometry, favouring physiological aspects. *J. Agron. Crop Sci.* 1–13.
- ROSA, L. et al. Global agricultural economic water scarcity. *Science Advances*, v. 6, n. 18, 2020.
- SILVA, E. N., RIBEIRO, R. V., FERREIRA-SILVA, S. L., VIÉGAS, R. A., & SILVEIRA, J. A. G. (2019). Comparative effects of salinity and water stress on photosynthesis, water relations and growth of *Jatropha curcas* plants. *Journal of Arid Environments*, 73(5), 438-444.
- SILVA, J. L. F., PRADO, R. M., ALVES, T. L., LATA-TENESACA, L. F. & SOARES, M. B. (2023). New strategy for silicon supply through fertigation in sugarcane integrating the pre-sprouted seedling phase and field cultivation. *Scientific Reports* 2023 13:1, 13(1), 1–10.
- SINGH, A., KUMAR, A., HARTLEY, S., SINGH, I. K. (2020). Silicon: its ameliorative effect on plant defense against herbivory. *Journal of Experimental Botany*, 71(21), 6730– 6743.
- SOUSA, M. A. DE; LIMA, M. D. B. Influência da supressão da irrigação em estádios de desenvolvimento do feijoeiro cv. Carioca comum. *Biosci. J.*, Uberlândia, v. 26, n. 4, p. 550–557, 2010.
- STONES, L. F. Feijão: aspectos técnicos da cultura. Brasília, DF: Embrapa, 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/feijao> . Acesso em: 13 jun. 2025 (a).
- STONES, L. F.; SILVEIRA, P.M. Feijão: aspectos técnicos da cultura. Brasília, DF: Embrapa, 2023. Disponível em : <https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/feijao/producao/manejo-de-irrigacao>. Acesso em: 13 jun. 2025 (b).
- TEIXEIRA, G. C. M., MELLO PRADO, R., MÁRCIO, A., ROCHA, S., SANTANA BATISTA DE OLIVEIRA FILHO, A., SILVEIRA DA SOUSA JUNIOR, G. & GRATÃO, P. L. (2022). Action of silicon on the activity of antioxidant enzymes and on physiological mechanisms mitigates water deficit in sugarcane and energy cane plants. *Scientific Reports* 2022 12:1, 12(1), 1–18.
- TEIXEIRA, G.C.M., MELLO PRADO, R., ROCHA, A.M.S., 2021. Low absorption of silicon via foliar in comparison to root application has an immediate antioxidant effect in mitigating water deficit damage in sugarcane. *J. Agron. Crop Sci.* 00, 1–10.

- WANG, Y. et al. *Mitigating abiotic stress in citrus: the role of silicon for enhanced productivity and quality*. *Plant Stress*, v. 16, p. 100837, 2025. DOI: 10.1016/j.stress.2025.100837.
- WEBBER, H. A., MADRAMOOTOO, C. A., BOURGAULT, M., HORST, M. G., STULINA, G. & SMITH, D. L. (2006). Water use efficiency of common bean and green gram grown using alternate furrow and deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, 86(3), 259– 268
- ZANÃO JÚNIOR, L. A. et al. Fontes e doses de silício aplicadas via fertirrigação na produção de arroz irrigado por aspersão. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 33, n. 2, p. 487–494, 2009.
- ZHANG, X.; CAI, X. Climate change impacts on global agricultural water deficit. *Environmental Research Letters*, v. 8, n. 2, p. 025006, 2013
- ZHOU, X. et al. *Use of silicon to protect tomato (Solanum lycopersicum L.) seedlings from low-calcium stress-derived oxidative damage*. *Scientia Horticulturae*, 2025. DOI: 10.1016/j.scienta.2025.114231.
- ZHU, Y., & GONG, H. (2014). Beneficial effects of silicon on salt and drought tolerance in plants. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(2), 455-472
- ZHU, Y., XU, J., & YANG, J. (2019). Silicon improves water uptake and root hydraulic conductance in rice (*Oryza sativa* L.) under drought stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 132, 444-455.