

**Scientific Electronic Archives**

Issue ID: Sci. Elec. Arch. Vol. 17 (3)

Mai/Jun 2024

DOI: <http://dx.doi.org/10.36560/17320241930>

Article link: <https://sea.ufr.edu.br/SEA/article/view/1930>



## Uso do silício no crescimento e produção do feijoeiro submetido a diferentes condições hídricas

### Use of silicon in the growth and production of bean plants under different water conditions

*Corresponding author*

**Sandro Dan Tatagiba**

Instituto Federal Catarinense

[sandrodantatagiba@yahoo.com.br](mailto:sandrodantatagiba@yahoo.com.br)

**Camila Carelli**

Instituto Federal Catarinense

**Ana Luiza Pirolli Figueiredo**

Instituto Federal Catarinense

**Luana Brancaleoni**

Instituto Federal Catarinense

**João Peterson Pereira Gardin**

Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina

**Allan Charlles Mendes de Souza**

Instituto Federal Catarinense

**Alan Schreiner Padilha**

Instituto Federal Catarinense

**Resumo.** O objetivo deste trabalho foi investigar o uso do silício (Si) no crescimento e produção do feijoeiro em diferentes condições hídricas no substrato. Para isso, plantas de feijão comum, *Phaseolus vulgaris*, cultivar SCS207 “Querência” do grupo carioca, foram cultivadas em vasos plásticos contendo 8 dm<sup>-3</sup> de substrato no interior da casa de vegetação do Instituto Federal Catarinense, Campus Videira. As plantas cresceram com o substrato mantido próxima a capacidade de campo por 45 dias após a emergência (DAE), quando então, foram estabelecidos dois níveis de água, definidos a partir da porosidade total do solo, com valores de 50 (D+) e 100% (D-) do volume total de poros ocupados por água (Capacidade de Campo), sendo o controle da irrigação realizado pelo método gravimétrico (pesagem diária dos vasos), adicionando-se água até que a massa do vaso atingisse o valor prévio determinado, considerando-se a massa do solo e de água. A aplicação das doses de Si foi realizada através de um pulverizador manual com capacidade de 500 mL e um bico tipo leque para aplicação. Plantas controles onde não foram aplicadas o Si, foram pulverizadas com água destilada. Utilizou-se o fertilizante foliar mineral simples silicato de potássio (Flex Silício®) nas doses: 0 mL/L (Controle, Si-) e 6 mL/L (Si+) de silicato de potássio, aplicados aos 45, 60 e 75 DAE. O experimento foi montado em esquema fatorial 2x2, com quatro repetições, composto por dois níveis de água [100 e 50% da capacidade de campo, ou seja, sem déficit hídrico (D-) e com déficit hídrico (D+), respectivamente] e dois níveis de doses do Si [0,0 mL/L (Controle, Si-) e 6mL/L (Si+), dispostos num delineamento experimental inteiramente casualizado, em parcelas subdivididas no tempo (15, 30, 45, 60, 75 e 90 DAE). Cada unidade experimental foi composta de um vaso plástico contendo duas plantas. As avaliações de crescimento e desenvolvimento foram realizadas quinzenalmente, até o final do período experimental, iniciadas após o décimo quinto dia da emergência das plântulas. Em cada coleta foram analisados por planta em cada tratamento as seguintes variáveis: altura, diâmetro do coleto, número de vagens e

estimativa da área foliar, a matéria seca das folhas, ramos e haste, raiz e total (folha, ramos e haste, e raiz). A produção foi mensurada através da massa seca de vagens e das sementes (grãos) por planta, realizada no final do experimento. Também foi estimada a produtividade potencial do feijoeiro de acordo com os valores obtidos da matéria seca dos grãos por planta, considerando um espaçamento de 40 x 50 cm em um hectare (ha), o que totalizou 50 mil plantas/ha. Os resultados obtidos mostraram, de modo geral, que o fornecimento de Si beneficiou o crescimento vegetativo e o desenvolvimento das plantas, em condições de adequada disponibilidade hídrica no substrato, como pode ser evidenciado pelos aumentos significativos encontrados para a altura, diâmetro do coleto, comprimento da raiz e área foliar. O fornecimento de Si aliado a adequada disponibilidade hídrica no substrato (Si+D-) contribuiu para os incrementos significativos na matéria seca das folhas, haste e ramos, raiz e total, levando a maior produção na matéria seca de grãos e da produtividade. O Si também contribuiu para a atenuação do déficit hídrico, melhorando o crescimento e rendimento do feijoeiro quando comparado com as plantas onde não era fornecido o elemento.

**Palavras-chaves:** manejos hídricos, *Phaseolus vulgaris*, silicato de potássio.

**Abstract.** The objective of this work was to investigate the use of silicon (Si) in the growth and production of bean plants under different water conditions in the substrate. For this, common bean plants, *Phaseolus vulgaris*, cultivar SCS207 “Querência” from the Rio group, were grown in plastic pots containing 8 dm<sup>-3</sup> of substrate inside the greenhouse of the Instituto Federal Catarinense, Campus Videira. The plants grew with the substrate kept close to field capacity for 45 days after emergence (DAE), when two water levels were established, defined based on the total porosity of the soil, with values of 50 (D+) and 100% (D-) of the total volume of pores occupied by water (Field Capacity), with irrigation control carried out using the gravimetric method (daily weighing of the vessels), adding water until the mass of the vessel reached the previously determined value, considering the mass of soil and water. The application of Si doses was carried out using a manual sprayer with a capacity of 500 mL and a fan-type nozzle for application. Control plants where Si was not applied were sprayed with distilled water. The simple mineral foliar fertilizer potassium silicate (Flex Silício®) was used in doses: 0 mL/L (Control, Si-) and 6 mL/L (Si+) of potassium silicate, applied at 45, 60 and 75 DAE. The experiment was set up in a 2x2 factorial scheme, with four replications, consisting of two water levels [100 and 50% of field capacity, that is, without water deficit (D-) and with water deficit (D+), respectively] and two dose levels of Si [0.0 mL/L (Control, Si-) and 6mL/L (Si+), arranged in a completely randomized experimental design, in plots subdivided over time (15, 30, 45, 60, 75 and 90 DAE). Each experimental unit was composed of a plastic pot containing two plants. Growth and development assessments were carried out biweekly, until the end of the experimental period, starting after the fifteenth day of seedling emergence. In each collection, the following variables were analyzed per plant in each treatment: height, diameter of the collection, number of pods and estimated leaf area, the dry matter of leaves, branches and stem, root and total (leaf, branches and stem, and root). Production was measured through the dry mass of pods and seeds (grains) per plant, carried out at the end of the experiment. The potential productivity of the bean plant was also estimated according to the values obtained for the dry matter of the grains per plant, considering a spacing of 40 x 50 cm in one hectare (ha), which totaled 50 thousand plants/ha. The results obtained showed, in general, that the supply of Si benefited the vegetative growth and development of plants, under conditions of adequate water availability in the substrate, as can be evidenced by the significant increases found for height, stem diameter, length of the root and leaf area. The supply of Si combined with adequate water availability in the substrate (Si+D-) contributed to significant increases in the dry matter of leaves, stems and branches, roots and total, leading to greater production in grain dry matter and productivity. Si also contributed to alleviating the water deficit, improving the growth and yield of the bean plant when compared to plants where the element was not supplied.

**Keywords:** water management, *Phaseolus vulgaris*, potassium silicate.

## Introdução

O feijão comum, *Phaseolus vulgaris*, é um dos grãos mais importantes na agricultura brasileira, com produção na safra 2019/2020 de 3.229,8 milhões de toneladas (COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO - CONAB, 2020). Além de sua importância econômica, possui também importância cultural e social, estando presente na alimentação diária da maioria das famílias brasileiras. O consumo per capita do feijão brasileiro é de 200,8 g/dia (BEZERRA et al., 2013). A produtividade média brasileira é de 1.104 kg/ha (CONAB, 2020), enquanto pode chegar a mais de 3.000 kg/ha em lavouras irrigadas (SILVA et al., 2011). No entanto, ainda está abaixo do seu potencial produtivo. Entre os fatores que limitam a produtividade das plantas, destacam-se os estresses abióticos, sendo o principal o déficit hídrico (AGUIAR et al., 2008).

As oscilações climáticas, principalmente durante a estação de seca e a má distribuição das chuvas, vêm ocorrendo com frequência no estado de Santa Catarina. Dessa forma, há a necessidade de utilizar alternativas para o cultivo do feijoeiro de

forma sustentável e a utilização de silício (Si) pode ser uma opção para atenuar os efeitos negativos ao estresse as plantas.

O Si é um elemento benéfico que tem ganhado destaque em sua utilização como fertilizante para o enfrentamento do estresse abiótico. Rodrigues, Oliveira e Korndorfer (2011) destacam sua utilização como fertilizante para espécies de importância agrícola, não somente no Brasil, como em outros países como o Japão, Estados Unidos, Ilhas Maurício, Austrália e África do Sul. Os benefícios que este elemento tem trazido às plantas na resistência ao estresse abiótico são divididos em dois grupos: físicos e fisiológicos (CANTUÁRIO et al., 2014). O acúmulo do Si na parede celular das plantas se relaciona aos benefícios físicos, assim, criando uma barreira contra a perda de água e melhorando a arquitetura das plantas (KORNDORFER; PEREIRA; CAMARGO, 2002), em função da deposição do elemento na parede celular de folhas, caule e raízes.

Do ponto de vista fisiológico os benefícios do Si se relaciona com uma maior atividade fotossintética, supressão de pragas, resistência ao ataque de microrganismos fitopatogênicos, indução de reações metabólicas que formam compostos como fitoalexinas e lignina que beneficiam as plantas na tolerância à seca (POZZA et al., 2004). Além disso, potencializa a atividade de enzimas como quintinases, peroxidases e polifenoloxidasas (LIANG; SUN; SI, 2005), melhorando as respostas da planta aos estresses abióticos.

Ademais, é um elemento que atua beneficiando a ação de defesa antioxidativa das plantas, em resposta a deficiência hídrica e aumento da temperatura, pois nestas condições as plantas acumulam peróxido de hidrogênio e prolina, e assim o Si atua aumentando a resistência estomática, reduzindo o dano oxidativo em moléculas funcionais (CRUSCIOL et al., 2009; GUNES et al., 2007). Ainda de acordo com Anjum et al. (2011) as plantas aceleram a senescência da abscisão foliar quando estão submetidas a baixa disponibilidade hídrica, podendo a adubação silicatada beneficiar em situação de estresse, através do aumento no número de folhas (ADATIA; BESFORD, 1986).

Contudo a aplicação exógena de Si por meio da pulverização foliar nas plantas pode ser uma alternativa viável, podendo proporcionar efeitos benéficos (SOUSA et al., 2010) a estresses abióticos, bióticos e por toxicidade (ZANETTI et al., 2016). Diversos estudos foram realizados a fim de compreender os efeitos benéficos do Si na produtividade de grãos nas culturas de soja, arroz e amendoim (CRUSCIOL et al., 2013), redução dos efeitos nocivos dos sais em plantas de mamona (FERRAZ et al., 2015), redução na concentração de sais em plantas de *Aloe* (XU, MA, LIU; 2015) e resistência ao estresse contra metais pesados (IMTIAZ et al., 2016).

São muitos os pesquisadores que se dedicam ao estudo deste elemento, visando identificar os benefícios proporcionados na produtividade das culturas, buscando melhorias de respostas do elemento frente às condições de estresse abiótico. Entender a atuação do Si sobre as fases fenológicas do feijoeiro é de fundamental importância para o uso racional do elemento frente às condições adversas do clima, atenuando o estresse por deficiência hídrica.

Avaliar o uso de Si sobre o crescimento e desenvolvimento de plantas cultivadas, é imprescindível para dar suporte ao produtor rural às ações que visam o manejo e a melhoria na produção, contribuindo como diagnóstico e base para implementação no planejamento agrícola, de acordo com as necessidades a serem mitigadas, passando, além dos fatores econômicos e da própria sustentabilidade da cultura.

Dessa forma, conhecer os benefícios do Si sobre o feijoeiro torna-se imprescindível para dar suporte ao agricultor a sua utilização. Diante do exposto, o objetivo deste trabalho foi investigar o uso de Si no crescimento e produção do feijoeiro em diferentes condições hídricas no substrato.

## Material e Métodos

### Área de estudo

O presente estudo foi realizado em casa de vegetação pertencente ao Instituto Federal Catarinense - Campus Videira, localizado na rodovia SC 135, Km 125, bairro Campo Experimental, no município de Videira, estado de Santa Catarina.

O município encontra-se na zona agroecológica do Vale do Rio do Peixe, com clima subtropical, segundo classificação de Koppen, apresentando temperatura moderada, chuva bem distribuída e verão brando. Podem ocorrer geadas, tanto no inverno como no outono. As temperaturas médias são inferiores a 20°C, exceto no verão. No inverno a média é inferior a 14°C, com mínimas inferiores a 8°C. A classificação de Koppen é o sistema de classificação climática global mais utilizada em geografia, climatologia e ecologia.

### Material experimental

Sementes de feijão comum, *Phaseolus vulgaris*, cultivar SCS207 “Querência” do grupo carioca, gerado e registrado pela Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI), foram semeadas e crescidas em vasos plásticos contendo 8 dm<sup>3</sup> de substrato, constituído de uma mistura de terra extraída da camada de 0,40 a 0,80 m de profundidade de um Argissolo Vermelho Distrófico e substrato comercial Tropstrato® (Vida Verde, Mogi Mirim, SP) na proporção 3:1, respectivamente. Foi realizada análise granulométrica do substrato, obtendo-se a classificação textural como muito argiloso (Tabela 1).

**Tabela 1.** Análise granulométrica das proporções existentes de cada fração no substrato.

Areia grossa (0,201mm)	Areia fina (0,053mm)	Areia Total	Argila (<0,002mm)	Silte
(g/kg)	(g/kg)	(g/kg)	(g/kg)	(g/kg)
17,9	42,1	60,0	690,0	250,0

Amostras do substrato foram analisadas quimicamente, resultando em boa disponibilidade de bases trocáveis (SB = 7,97 cmolc dm<sup>-3</sup>), baixa de saturação de bases (V = 48,3%), baixa disponibilidade de fósforo (P < 3 mg dm<sup>-3</sup>) e de enxofre (12,8 mg dm<sup>-3</sup>). Antes do plantio foi

necessário realizar a correção da acidez do solo, elevando a saturação por bases a 70%, fornecendo 21,2 g/vaso de calcário dolomítico (Filler®). As adubações de plantio e de cobertura foram realizadas de acordo com o Manual de Calagem e Adubação para os estados do Rio Grande do Sul e

Santa Catarina (COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC, 2016). O nitrogênio foi fornecido na forma de uréia, parcelado em 02 vezes (Uma aplicação no plantio e outra em cobertura), o fósforo ( $P_2O_5$ ) aplicado no plantio (Única dose), o potássio aplicado na forma de cloreto de potássio (Uma aplicação no plantio e outra em cobertura) e o enxofre (pó simples) aplicado em cobertura (Única dose).

No plantio foram fornecidos 0,5; 3,5 e 0,7 g/vaso de uréia, fosfato e cloreto de potássio, respectivamente. A adubação de cobertura foi realizada aos 30 dias após a emergência (DAE) (Estádios V3 e V4), fornecendo-se 1,0; 0,7 e 0,4 g/vaso de uréia, cloreto de potássio e enxofre (pó simples), respectivamente. Também foram realizadas duas adubações de reforço do fertilizante mineral misto "NPK + 9 nutrientes" (Forth Frutas<sup>®</sup>), fornecendo 25 g/vaso do formulado, aos 45 e 60 DAE.

Os dados climáticos de temperatura e umidade relativa do ar foram obtidos utilizando um datalogger HT-500 (Instrutherm<sup>®</sup>), instalado no interior da casa de vegetação onde foi conduzido o experimento.

#### *Manejo hídrico e aplicação de Si*

As plantas cresceram com o substrato mantido próxima a capacidade de campo por 45 DAE, quando então foram estabelecidos dois níveis de água, definidos a partir da porosidade total do solo, com valores de 50 (D+) e 100% (D-) do volume total de poros ocupados por água (Capacidade de Campo), sendo o controle da irrigação realizado pelo método gravimétrico (pesagem diária dos vasos), adicionando-se água até que a massa do vaso atingisse o valor prévio determinado, considerando-se a massa do solo e de água, conforme metodologia descrita por Freire et al. (1980).

A aplicação das doses de silicato de potássio sobre as folhas foram realizadas através de um pulverizador manual com capacidade de 500 mL e um bico tipo leque para aplicação. Plantas controles foram pulverizadas com água destilada. Utilizou-se o fertilizante foliar mineral simples silicato de potássio (Flex Silício<sup>®</sup>) nas doses: 0 mL/L (Controle, Si-) e 6 mL/L (Si+) de silicato de potássio, aplicados aos 45, 60 e 75 DAE. O produto apresenta formulação do tipo EC (concentrado emulsionável), obtendo os seguintes nutrientes solúveis em água: potássio ( $K_2O$ ) e silício (Si) 12% (p/p) e 165,60 g/L (p/v), sendo recomendado para a cultura do feijoeiro.

#### *Crescimento e produção*

As coletas para avaliação do crescimento e desenvolvimento foram realizadas quinzenalmente, até o final do período experimental, iniciadas após o décimo quinto dia da emergência das plântulas. Em cada coleta foram analisados por planta em cada tratamento as seguintes variáveis: altura, diâmetro do coleto, número de vagens. Também foram

avaliadas a matéria seca das folhas, ramos e haste, raiz e total (folha, ramos e haste, e raiz).

A produção foi mensurada através da massa seca de vagens e das sementes (grãos) por planta, realizada no final do experimento. A matéria seca foi obtida com o auxílio de uma estufa com ventilação forçada a 65 °C, até o material vegetal atingir peso constante. O diâmetro do coleto foi determinado com auxílio de paquímetro digital (Starrett) modelo 727 a 01 (Um) cm do substrato, e a altura das plantas, através de régua milimetrada.

A área foliar foi estimada através de modelo matemático proposta por Hara et al., (2019), apresentado a seguinte equação:  $AFM = -2,20042 + 1,77534.C.L$ ; sendo AFM a área foliar do trifólio medida ( $cm^2$ ); C, o comprimento do folíolo (cm), e L, a largura (cm). Também foi estimada a produtividade potencial do feijoeiro de acordo com os valores obtidos da matéria seca dos grãos por planta, considerando um espaçamento de 40 x 50 cm em um hectare (ha), o que totalizou 50 mil plantas/ha. Os dados foram obtidos na unidade de toneladas (t) por ha.

#### *Delineamento experimental*

Foi montando um experimento em esquema fatorial 2x2, com quatro repetições, composto por dois níveis de água [100 e 50% da capacidade de campo, ou seja, sem déficit hídrico (D-) e com déficit hídrico (D+), respectivamente] e dois níveis de doses de Si [0,0 mL/L (Controle, Si-) e 6mL/L (Si+), dispostos num delineamento experimental inteiramente casualizado, em parcelas subdivididas no tempo (15, 30, 45, 60, 75 e 90 DAE). Cada unidade experimental foi composta de um vaso plástico contendo duas plantas.

Os dados foram submetidos à análise de variância e os tratamentos foram comparados a partir dos 45 DAE pelo teste de Tukey ( $P \leq 0,05$ ) utilizando o programa o software R<sup>®</sup>, versão 4.3.2.

#### **Resultados e Discussão**

As temperaturas máxima (T máxima), média (T média) e mínima (T mínima) do ar durante o cultivo do feijoeiro podem ser observadas na Figura 1A. Durante o período de desenvolvimento do feijoeiro, as temperaturas médias mantiveram-se acima de 16°C, observando alguns valores que ultrapassaram 30°C. O feijoeiro é uma planta sensível a altas e baixas temperaturas, sendo a temperatura média ótima para o cultivo varia entre 18 e 24°C. Temperaturas médias acima de 30°C e abaixo de 12°C podem ocasionar em certas cultivares, abortamento de flores, vagens e grãos, com conseqüente queda de rendimento (JUNIOR; VENZON, 2007). Torna-se importante ressaltar, que a cultivar SCS207 "Querência", é indicada para o cultivo em toda região sul brasileira (KAVALCO; NICKNICH, 2024) suportando temperaturas mais baixas.

A umidade relativa média do ar (UR média) manteve-se acima de 55%, enquanto que os valores da umidade relativa máxima (UR máxima) e mínima

(UR mínima) registradas foram de 97% e 24%, respectivamente (Figura 1B).

A Figura 02 apresenta os valores médios de crescimento para a altura, diâmetro do coleto, comprimento da raiz e estimativa da área foliar aos 15, 30 e 45 DAE (antes da aplicação dos tratamentos) e para o teste de médias de Tukey aos 60, 75 e 90 DAE. Observa-se para a altura aos 60 DAE redução significativa no crescimento das plantas onde não houve fornecimento de Si e submetidas ao déficit hídrico (Si-D+) quando comparadas com os demais tratamentos (Figura 2A). Aos 75 DAE não houve diferença significativa entre as médias dos tratamentos. No final do experimento, aos 90 DAE, verificou-se que os valores médios da altura nas plantas onde foi fornecido o Si, independente do manejo hídrico adotado (Si+D- e Si+D+), não diferiram significativamente, evidenciando que a aplicação do elemento, pode ter beneficiado o crescimento em altura. Note que os valores médios para a altura das plantas com fornecimento de Si e submetidas ao déficit hídrico (Si+D+) foram significativamente semelhantes às plantas onde não houve fornecimento de Si e sem déficit hídrico (Si-D-), evidenciando a importância do elemento no crescimento em altura, mesmo em condições de déficit hídrico no substrato. Por sua vez, foi verificado que as plantas não supridas com Si e submetidas ao déficit hídrico (Si-D+) apresentaram reduções significativas nos valores médios para a

altura em 32, 26 e 20% quando comparados as plantas submetidas ao tratamento Si+D-, Si-D- e Si+D+, respectivamente (Figura 2A), confirmando que a restrição hídrica reduziu o crescimento em altura nas plantas sem o suprimento do Si.

Resultados semelhantes ao presente estudo foram encontrados por Silva (2018) nas cultivares de feijão caupi: BRS Itaim, BRS Aracé e BRS Rouxinol. A aplicação de Si nestas cultivares proporcionou aumento de 30% na altura, utilizando a concentração de 100 mg L<sup>-1</sup> de Si em comparação as plantas mantidas sem o suprimento de Si. Ferraz et al. (2014) também constataram efeitos significativos na aplicação foliar do Si na altura do algodoeiro com concentrações de até 94,3 mg L<sup>-1</sup>, corroborando com o observado no presente estudo.

De forma geral, o diâmetro do coleto seguiu tendência similar aos valores apresentados para a altura. Aos 60 e 75 DAE não foi verificado diferenças significativas nos valores médios do diâmetro do coleto entre os tratamentos (Figura 2B). Aos 90 DAE, verificou-se que não houve diferenças significativas entre as médias do diâmetro do coleto para os tratamentos Si+D-, Si-D- e Si+D+, ficando evidente que o Si pode ter contribuído para o crescimento em diâmetro mesmo em condições de déficit hídrico no substrato. Nota-se ainda, que no tratamento Si-D+, as plantas apresentaram redução significativa de 23% quando comparadas com Si+D- (Figura 2B).

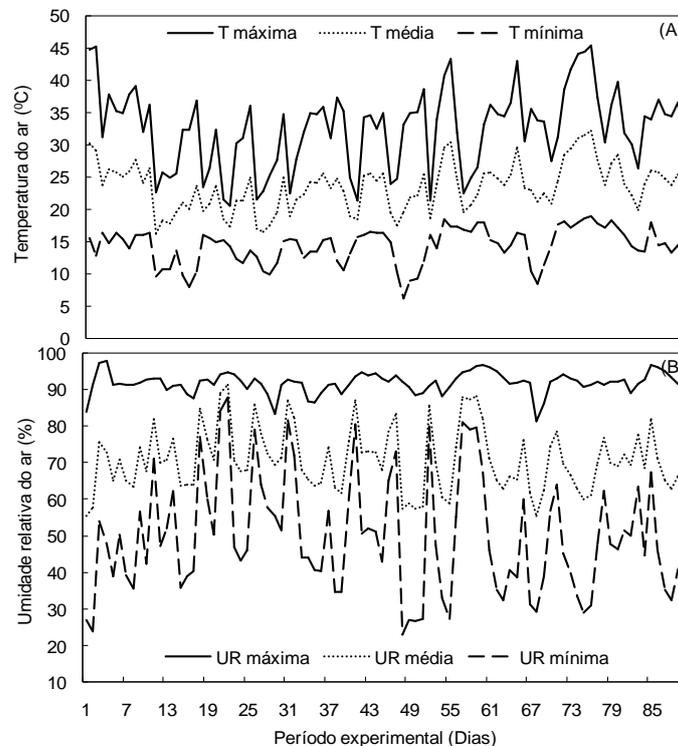
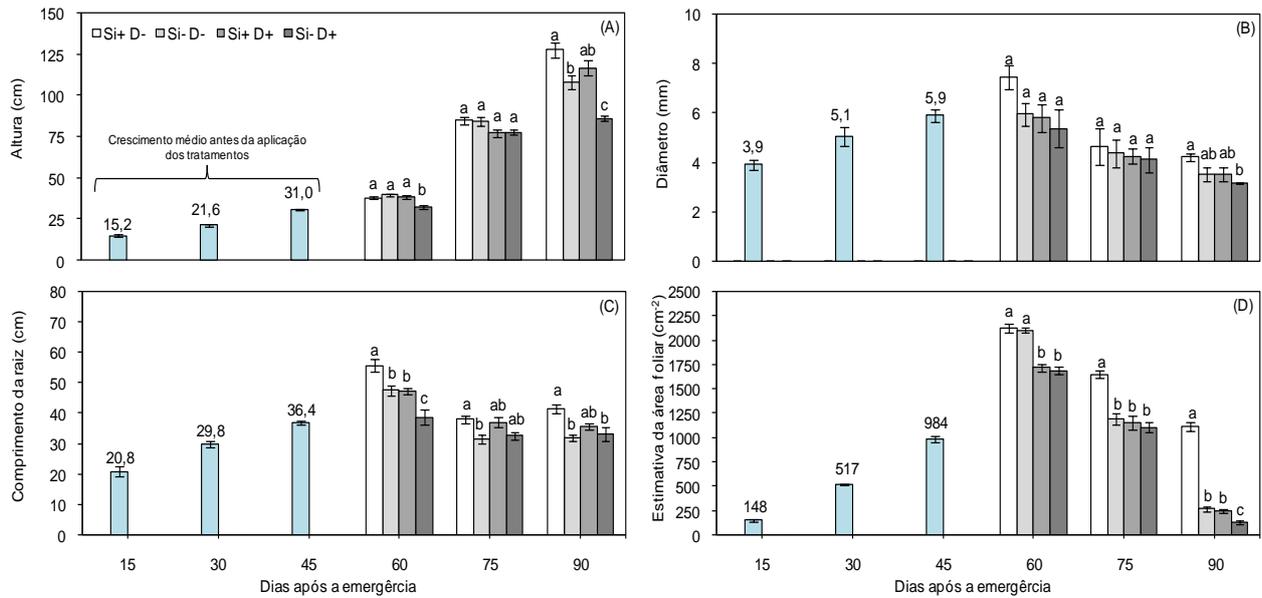


Figura 01. Temperatura (A) e umidade relativa do ar (B) durante o período experimental.



**Figura 02.** Altura (A), diâmetro do coleto (B), comprimento da raiz (C) e estimativa da área foliar (D) durante o ciclo do feijoeiro.

\*Barras em cada período de avaliação (Dias após a emergência, DAE) representam o erro padrão da média. Valores médios aos 15, 30 e 45 DAE, antes da aplicação dos tratamentos. Teste de Tukey ( $P \leq 0,05$ ) aos 60, 75 e 90 DAE.

O comprimento da raiz apresentou diferenças significativas das médias aos 60, 75 e 90 DAE (Figura 2C). Deve-se ressaltar que durante esses períodos de avaliação, as plantas onde foi fornecido o Si e sem déficit hídrico (Si+D-) apresentaram médias significativamente superiores as plantas onde não houve o fornecimento de Si e mantidas com déficit hídrico (Si-D+), confirmando o impacto negativo da deficiência hídrica no crescimento da raiz. Também se observa, aos 90 DAE, que as médias dos tratamentos Si+D- e Si+D+ não diferiram significativamente, corroborando que o elemento beneficiou o comprimento da raiz, independente da restrição de água imposta pelo déficit hídrico no substrato. Dessa forma, pode-se deduzir que o crescimento da raiz nas plantas onde foi fornecido o Si, pode ser uma estratégia adotada pela cultivar para sobrevivência do feijoeiro. Em estudo realizado por Mariano et al. (2009), observaram-se que a queda das folhas no terço das plantas de feijoeiro em condições de déficit hídrico podem resultar em menor comprimento da raiz. Entretanto, a queda aleatória das folhas em condições de déficit hídrico não pode ser um indicativo preciso da redução do crescimento da raiz. Segundo Taiz e Zeiger (2017), a resposta positiva do crescimento radicular em condições em que o solo apresente adequada disponibilidade hídrica está relacionada ao fato do desenvolvimento do sistema radicular ser dinâmico e extremamente dependente das condições prevalentes.

A área foliar no tratamento Si+D- apresentou valores médios significativamente superiores aos demais tratamentos aos 75 e 90 DAE, indicando que o Si em condições de adequada disponibilidade de água no substrato pode contribuir para o incremento em área útil

fotossinteticamente ativa. Notam-se, aos 90 DAE, que houve reduções significativas na área foliar nos tratamentos Si-D-, Si+D+ e Si-D+ em 76, 77 e 88%, respectivamente, quando comparadas com Si+D-.

Os valores de área foliar encontrados no tratamento Si+D- estão de acordo com os resultados obtidos por Silva (2018), onde a taxa de crescimento da área foliar dos cultivares de feijoeiro caupi decresceu nas plantas sem o suprimento de Si e mantidas sob deficiência hídrica.

Maghsoudi et al. (2015), estudando efeito atenuador do Si em quatro cultivares de trigo, relataram aumento significativo da área foliar pela aplicação de 6 mM de Si, embora a área foliar de todas as quatro cultivares de trigo tenha diminuído significativamente com o déficit hídrico. De acordo com Ahmed et al. (2014), plantas de sorgo submetidas a 200 mg L<sup>-1</sup> de silicato de potássio produziram maior área foliar em comparação com as plantas controle, concordando com os resultados observados no presente estudo.

Blum (1997) ressalta que a diminuição da atividade fotossintética e da produtividade de plantas submetidas ao déficit hídrico tem uma grande correlação com a redução da área foliar. De acordo com Taiz e Zeiger (2017), a resposta ao déficit hídrico limita o tamanho e o número de folhas, levando a redução no consumo de carbono e energia por esse órgão da planta. A área foliar tem sua importância por ser um parâmetro indicativo da produtividade, pois o processo fotossintético depende da interceptação da energia luminosa e sua conversão em energia química, sendo este um processo que ocorre diretamente na folha, atuando na formação de carboidratos, que são alocados para os órgãos vegetativos e reprodutivos (BASTOS et al., 2002). Conforme Benincasa (2003), as folhas

são os centros de produção de matéria seca (fotossíntese), enquanto o resto da planta depende da exportação de material produzido pela folha.

Para a maioria das culturas, a área foliar aumenta rapidamente até atingir o máximo crescimento vegetativo, decrescendo posteriormente com o desenvolvimento da cultura. Esse comportamento indica que, inicialmente, a maior parte do material fotossintetizado é convertida em folhas, visando à maior captação de radiação solar disponível (PEREIRA; MACHADO 1987). Urchei et al. (2000) observaram em duas cultivares de feijão carioca que a área foliar aumentou até aos 30-37 DAE para depois diminuir devido o surgimento de tecidos e estruturas não assimilatórias. Comportamentos decrescentes de área foliar também foram encontrados por Hughes e Freemam (1967) em cultivares de feijão após atingirem o máximo crescimento vegetativo.

Aos 60 DAE, observa-se o máximo crescimento vegetativo para a cultivar estudada, não só em área foliar, mas também do diâmetro do coleto e comprimento da raiz (Figura 02). Após esse período, de maneira geral, foram observadas reduções destas três variáveis, podendo estar associadas com a exportação preferencial de fotoassimilados para o desenvolvimento das flores e posterior emissão das vagens.

A Figura 03 apresenta os valores médios de matéria seca da folha, haste e ramos, raiz e total aos 15, 30 e 45 DAE (antes da aplicação dos tratamentos) e para o teste de médias de Tukey aos 60, 75 e 90 DAE. As médias da matéria seca da folha apresentaram diferenças significativas aos 60 e 90 DAE, enquanto que aos 75 DAE não houve diferenças significativas (Figura 3A). Destaque deve ser dado aos valores significativos alcançados para a matéria seca da folha no final do experimento, aos 90 DAE no tratamento Si+D-, sendo superior em 73, 74 e 82% aos tratamentos Si-D-, Si+D- e Si+D+, respectivamente, evidenciando que o Si contribuiu para o incremento na matéria seca da folha em condições de adequada disponibilidade hídrica no substrato. Estes valores corroboram os encontrados para a área foliar no presente estudo, verificando redução significativa da matéria seca da folha, atribuído, principalmente, a menor área foliar.

A folha atua diretamente na formação de carboidratos, que são alocados para os órgãos vegetativos em crescimento, podendo levar a uma maior produtividade da parte aérea. Dessa forma, quanto maior a área foliar, maior será a interceptação da radiação solar pela planta, e, portanto, maior a capacidade de realizar fotossíntese, o que conseqüentemente irá favorecer o incremento em biomassa (LARCHER, 2006).

Os valores médios da matéria seca da haste e ramos apresentaram tendência estatística similar aos encontrados para a matéria seca da folha (Figura 3B). Observe que aos 60 e 90 DAE houve diferenças significativas entre as médias da matéria seca da haste e ramos, enquanto que aos 75 DAE não houve diferenças significativas. Aos 90

DAE o tratamento Si+D-, apresentou valores significativamente superiores em 23, 47 e 48% aos tratamentos Si-D-, Si+D- e Si+D+, respectivamente, confirmando que o Si contribuiu para o incremento na matéria seca da parte aérea das plantas em condições de adequada disponibilidade hídrica no substrato. Estes resultados estão de acordo com Oliveira (2009), que também verificou aumentos significativos na matéria seca da parte aérea em plantas de arroz e feijão onde foi aplicado o Si. Este fato pode ser explicado pela absorção do Si que se deposita nas células combinando com os compostos orgânicos, como celulose e hemicelulose (YOSHIDA; OHNISHI; KITAGISHI, 1959; MA et al., 2001), podendo ser utilizado na defesa física a perda de água e ataque de pragas ou mesmo na captura de luz pela fotossíntese (LANNING; ELEUTERIUS, 1989).

Araújo et al. (2022) estudando a aplicação foliar de Si em milho verificaram aumentos na matéria fresca da parte aérea em condições de déficit hídrico no solo, o que evidencia a reposta positiva do Si para o desenvolvimento da planta. Esse aumento foi verificado por Sousa et al. (2010), que verificaram efeito positivo do Si no aumento da massa do colmo, melhor conformidade arquitetônica das folhas, maior concentração de clorofila e melhor desempenho fotossintético, resultando em maior produção de biomassa fresca.

De acordo com Souza et al. (2013) a eficiência da aplicação de Si no aumento da biomassa fresca pode ser atribuída a capacidade do Si em se acumular nos tecidos das folhas e, com isso reduzir a transpiração da planta, o que resulta em maior acúmulo de água. De acordo com Menegale et al. (2015) o acúmulo de camadas de sílica nos órgãos da planta reduz a abertura estomática, o que restringe a perda de água.

O crescimento da matéria seca da raiz é apresentado na Figura 3C. Observe que houve diferenças significativas nas médias aos 60, 75 e 90 DAE. Aos 60 DAE as plantas tratadas com Si+D-, Si-D- e Si+D+ não apresentaram diferenças significativas nas médias para a matéria seca da raiz, enquanto as tratadas com Si+D- apresentaram aumentos significativas em 29% quando comparados com Si-D+. Aos 75 DAE, notam-se aumentos significativos na matéria seca da raiz para o tratamento Si+D- em 33, 36 e 76% em relação a Si-D-, Si+D+ e Si-D+, respectivamente, o que confirma que o fornecimento de Si em condições de adequada disponibilidade hídrica no substrato favoreceu o incremento em biomassa do sistema radicular.

O fornecimento de água é fundamental tanto para a otimização da absorção dos nutrientes relacionados à água, quanto para os insumos, onde o acúmulo de carbono, o hidrogênio e o oxigênio representam mais de 99% da matéria seca da planta (FERNANDES et al., 2018), o que explica o menor desenvolvimento do feijoeiro em condições de déficit hídrico.

Em contrapartida, o crescimento do sistema radicular em profundidade é um mecanismo de defesa da planta contra a seca, e está relacionado com sua capacidade de sobrevivência. A exploração de grande volume de solo a maiores profundidades pode evitar que as plantas experimentem deficiência hídrica capaz de prejudicar o crescimento em condições de campo (SASSE; SANDS, 1996).

Os valores da matéria seca total das plantas são apresentados na Figura 3D. Observa-se que houve aumentos significativos na média da matéria seca total para Si+D- em relação aos demais tratamentos aos 60, 75 e 90 DAE, confirmando que o fornecimento de Si aliado a condições de adequada disponibilidade de água no substrato

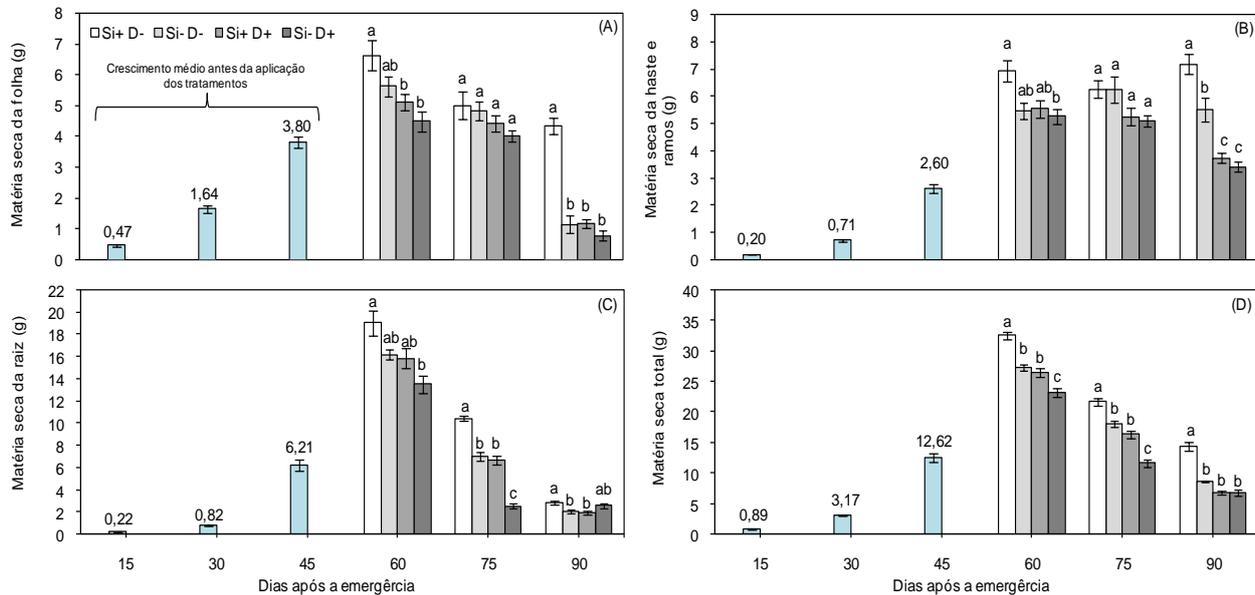


Figura 03. Matéria seca da folha (A), haste e ramos (B), raiz (C) e total (D) durante o ciclo do feijoeiro.

\*Barras em cada período de avaliação (Dias após a emergência, DAE) representam o erro padrão da média. Valores médios aos 15, 30 e 45 DAE, antes da aplicação dos tratamentos. Teste de Tukey ( $P \leq 0,05$ ) aos 60, 75 e 90 DAE.

contribuiu para o crescimento e incremento de biomassa vegetativa nas plantas. Aos 90 DAE os valores médios da matéria seca total em Si+D- foram significativamente superiores em 40, 52 e 53% em relação aos tratamentos Si-D-, Si+D+ e Si-D+, respectivamente.

Os resultados referentes ao acúmulo de matéria seca total, observado nos diferentes tratamentos, indicam tratar-se de uma característica capaz de identificar o benefício do fornecimento de Si no crescimento e desenvolvimento do feijoeiro. Em estudo realizado por Silva (2018), avaliando as características de crescimento do feijoeiro caupi em diferentes doses de Si e disponibilidades de água no substrato foram observadas que o fornecimento de Si auxiliou a atenuação do estresse provocado pelo déficit hídrico.

Sugere-se na literatura que o Si seja capaz de diminuir os efeitos causados por situações hídricas adversas. A deposição de Si na parede celular das folhas, formando uma dupla camada protetora evita grandes perdas de água nestas condições, devido à menor taxa de evapotranspiração da planta (MARSCHNER, 1995). Gao et al. (2006) observaram relação positiva entre o depósito de Si nas folhas e a diminuição da taxa transpiratória para a cultura do trigo, submetidas a diferentes regimes hídricos. Isso evidencia o melhor aproveitamento da água disponível no solo. Gong et

al. (2005), em estudo objetivando-se avaliar as alterações fotossintéticas de plantas de trigo mediante aplicação de Si em condições de estresse hídrico concluíram que o elemento proporcionou aumento na taxa de  $CO_2$  assimilável pelas folhas mediante o estresse e aumento da concentração das enzimas relacionadas ao estresse hídrico, diminuindo os impactos do estresse pela planta. Isso nos leva a concluir que o Si pode estar envolvido nas atividades metabólicas e/ou fisiológicas das plantas.

Fato importante que deve-se atentar no presente estudo são as semelhanças significativas para os valores médios de matéria seca total nas plantas de feijoeiro nos tratamentos Si-D- e Si+D+ aos 60, 75 e 90 DAE, confirmando que nas plantas onde foi fornecido o Si e mantidas sob déficit hídrico não apresentaram perdas na matéria seca total quando comparadas com as plantas mantidas em adequada disponibilidade hídrica no substrato.

De acordo com Stone e Moreira (2001), a ocorrência de estresse hídrico na fase vegetativa do feijoeiro poderá promover redução na produtividade. Para Gholz et al. (1990), o decréscimo de água no solo diminui o potencial de água na folha e a condutância estomática, promovendo o fechamento dos estômatos. Este fechamento bloqueia o fluxo de  $CO_2$  para as folhas, afetando o acúmulo de fotoassimilados, podendo reduzir a produção. A

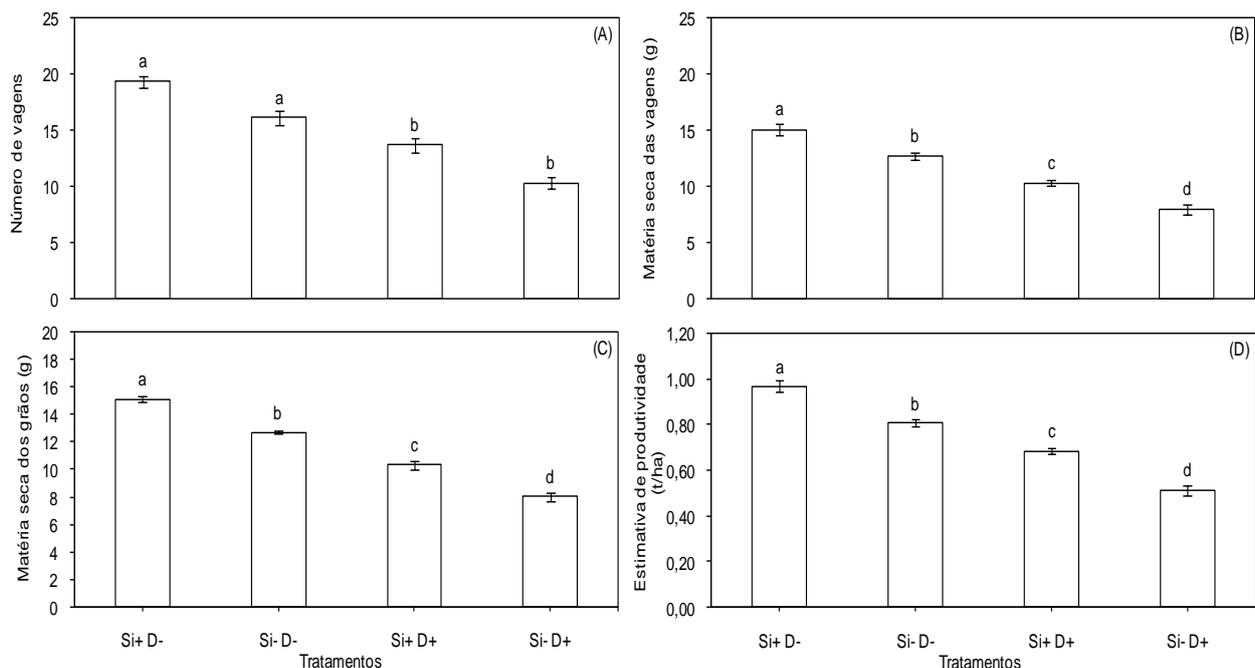
tolerância de plantas a condições desfavoráveis, principalmente em relação ao déficit hídrico, tem sido associada ao benefício do Si no acúmulo de enzimas na parte aérea, indicando ser um mecanismo regulador de mudanças fisiológicas na planta, a partir da redução do potencial hídrico celular, levando, conseqüentemente, ao fechamento dos estômatos e ao desenvolvimento de processos oxidativos, por meio do acúmulo de prolina, considerada como mecanismo regulador de perda de água na planta, além da formação das espécies reativas de oxigênio (ROS): as enzimas antioxidantes superóxido dismutase (SOD), catalase (CAT) e ascorbato peroxidase (APX) (GRATÃO et al., 2005).

Na Figura 4 são apresentados os valores da produção do feijoeiro através do teste de médias de Tukey para o número de vagens (A) matéria seca das vagens (B), matéria seca dos grãos (C) e estimativa de produtividade (D) aos 90 DAE.

O número de vagens apresentou valores médios significativamente diferentes para os tratamentos (Figura 4A). Observa-se que onde houve adequada disponibilidade hídrica no substrato (Si+D- e Si-D-) as médias foram

significativamente semelhantes, apesar do fornecimento ou não de Si. Entretanto, as médias para o número de vagens em Si+D- e Si-D- foram significativamente superiores a Si+D+ e Si-D+, onde foi imposto o déficit hídrico no substrato. Isto demonstra que o déficit hídrico foi suficiente em limitar o número de vagens por planta, o que pode afetar negativamente a produtividade das plantas.

A matéria seca das vagens, dos grãos e a estimativa de produtividade (Figuras B, C, e D, respectivamente) apresentaram tendência estatística similar. Os maiores valores médios significativos encontrados em Si+D- em relação a Si-D-, evidencia que o Si contribuiu para o incremento na matéria seca das vagens (Figura 4B) e dos grãos (Figura 4C) aumentando a produtividade das plantas em condições de adequada disponibilidade de água no substrato (Figura 4D). Quando se compara os tratamentos mantidos em déficit hídrico (Si+D+ e Si-D+), verifica-se também que o Si colaborou para incrementos significativos na matéria seca das vagens e dos grãos, levando a maior produtividade nestas condições (Figuras B, C, e D, respectivamente).



**Figura 04.** Número de vagens (A), matéria seca das vagens (B), matéria seca dos grãos (C) e estimativa de produtividade (D) durante o ciclo do feijoeiro.

\*Barras em cada tratamento representam o erro padrão da média. Teste de Tukey ( $P \leq 0,05$ ) aos 90 DAE.

Cruciol et al. (2013) estudando o efeito do Si nos componentes de produção do feijoeiro, cultivar Pérola, verificaram que o fornecimento de Si via foliar elevou o número de vagens por planta em relação ao controle, evidenciando o efeito benéfico da aplicação foliar de Si, o que culminou na elevação da produtividade dos grãos. Segundo Gunes et al. (2007 2008), Hattori et al. (2005); Pulz et al. (2008) o Si depositado na parede celular da epiderme das folhas forma uma dupla camada de

sílica-cutícula e sílica-celulose que melhora o fortalecimento e a rigidez da parede celular, aumenta a resistência ao acamamento, melhora a interceptação de luz e diminui a transpiração, potencializando as características agrônômicas e elevando a produtividade das culturas.

O efeito do Si na matéria seca de grãos das plantas mantidas em adequada disponibilidade de água no substrato provavelmente se deve a um conjunto de fatores. Podendo ocorrer devido à

melhora na absorção e aproveitamento de nutrientes (TISDALE et al., 1993; EPSTEIN, 1999), à diminuição da transpiração e ao aumento da translocação de carbono para os grãos (MA; TAKHASHI, 1990; SAVANT et al., 1997; DATNOFF et al., 2007). Ou ainda pelo efeito direto na taxa fotossintética pelo fato do Si ainda levar ao aumento no conteúdo de clorofila *b*, carotenóides, lignina e os teores de fósforo, cálcio, enxofre e zinco (LIMA, 2006). Desta forma, pode ocorrer uma maior eficiência fotossintética nas plantas de feijão e consequentemente maior produção de grãos.

O Si pode ainda ter uma ação indireta no aumento da coloração verde das plantas pelo fato de estimular a produção de antioxidantes (LIANG et al., 2003; ERASLAN et al., 2008). Assim, é possível que com fornecimento de Si a oxidação de enzimas fotossintéticas, desencadeada pelo estresse oxidativo na presença de déficit hídrico, foi diminuída e a influência da deficiência hídrica no processo fotossintético foi minimizada.

O efeito negativo do déficit hídrico para as plantas de feijoeiro era esperado, pois houve deficiência hídrica no substrato durante a fase de enchimento de grãos, e assim há um conflito entre a conservação de água pela planta e a taxa de assimilação de CO<sub>2</sub> na produção de carboidratos (TAIZ; ZEIGER 2017), afetando a produção. Os resultados obtidos para a massa seca de grãos estão de acordo com os resultados obtidos por Fageria et al. (1991), Guimarães (1996), Pimentel e Perez (2000), Oliveira et al. (2008) e mais recentemente Tatagiba et al., (2013), confirmando que o estresse hídrico diminuiu significativamente a massa seca de grãos, afetando consideravelmente a produção do feijoeiro.

Portanto, pode-se ressaltar o efeito benéfico do Si na produção de matéria seca dos grãos, o que levou a uma maior estimativa de produtividade (Figuras 4C e D), principalmente em condições de boa disponibilidade hídrica no substrato (Si+D-) em relação aos demais tratamentos, sendo significativamente superior em 16, 32 e 47% a Si-D-, Si+D+ e Si-D+, respectivamente.

## Conclusões

O fornecimento de Si via foliar em condições de adequada disponibilidade hídrica no substrato beneficiou o crescimento vegetativo do feijoeiro proporcionando maior matéria seca e área foliar, o que provavelmente pode ter contribuído para aumentos significativos na produção de grãos e na estimativa de produtividade.

O Si também contribuiu para a atenuação do déficit hídrico, melhorando o crescimento e rendimento do feijoeiro quando comparado com as plantas onde não foi fornecido o elemento.

## Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil, concedendo bolsas de iniciação científica às alunas Ana Luiza

Pirolli Figueiredo, Camila Carelli e Luana Brancaleoni.

## Referências

ADATIA, M.H., BESFORD, R.T. The effects of silicon on cucumber plant grown in recirculating nutrient solution. *Annals of Botany*, v. 58, p. 343-351, 1986. <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.aob.a087212>

AGUIAR, R. S., CIRINO, V. M., ROGÈRIO TEIXEIRA FARIA, R.T., LUIZ HENRIQUE ILKIU VIDAL, L. H. I. Avaliação de linhagens promissoras de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) tolerantes ao déficit hídrico. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 29, n. 1, p. 1-14, 2008. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2008V29N1P1>

AHMED, S.; HASSEN, F. U.; QADEER, E.; ALAM, M. A. silicon application and drought tolerance mechanism of *sorghum*. *Africa Journal of Agricultural Research*. v. 3, p. 594-607, 2011. <https://doi.org/110.5897/AJAR10.626>

ANJUM, S. A., XIE, X.Y., WANG, L. C., SALEEM, M. F., MAN, C., LEI, W. Morphological, physiological and biochemical responses of plants to drought stress. *African Journal of Agricultural Research*, v. 6, n. 9, p. 2026-2032, 2011. <https://doi.org/10.5897/AJAR10.027>

ARAÚJO, V.S., SOUSA, T.K.R., NOBRE, R.S., SANTOS, C. M., NEGREIROS, K.K.S., CARVALHO, A.C.C., VELOSO, F.S., VELOSO, R.C., REZENDE, J.S. Influência da aplicação foliar de silício no desenvolvimento e produtividade do milho sob déficit hídrico no semiárido piauiense. *Research, Society and Development*, v. 11, p. 1-10, 2022. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i5.28051>

BASTOS, E.A., RODRIGUES, B. H.N., ANDRADE JÚNIOR, A.S., CARDOSO, M.J. Parâmetros de crescimento do feijão caupi sob diferentes regimes hídricos. *Engenharia Agrícola, Jaboticabal*, v.22, n.1, p.43-50, 2002.

BENINCASA, M. P. Análise de crescimento de plantas. Jaboticabal: Funep, 2003. 41p.

BEZERRA, I. N., SOUZA, A. M., PEREIRA, R. A., SICHIERI, R. Consumo de alimentos fora do domicílio no Brasil. *Revista Saúde Pública*, v. 47, p. 200-2011, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0034-89102013000700006>

BLUM, A. Crop responses to drought and the interpretation of adaptation. In: BELLHASSEN, E (Ed.). *Drought tolerance in higher plants: genetical, physiological, and molecular biology analysis*. Dordrecht: Kluwer Academic, 1997, p. 57-70.

- CANTUÁRIO, F. S., LUZ, J. M., PEREIRA, A. I., SALOMÃO, L. C., REBOUÇAS, T. N. Podridão apical e escaldadura em frutos de pimentão submetidos a estresse hídrico e doses de silício. *Horticultura Brasileira*, v. 32, p. 215-219, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0102-05362014000200017>
- COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC. Manual de Calagem e Adubação para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – Núcleo Regional Sul, 2016. 376p.
- CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira: safra 2020/21. 2020. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos/boletim-da-safra-de-graos>>. Acesso em: 14 mar. 2024.
- CRUSCIOL, C. A. C., PULZ, A. L., LEMOS, L. B., SORATTO, R. P.; LIMA, G. P. P. Effects of silicon and drought stress on tuber yield and leaf biochemical characteristics in potato. *Crop Science*, v. 49, p. 949-954, 2009. <https://doi.org/10.2135/cropsci2008.04.0233>
- CRUSCIOL, C. A. C., SORATTO, R. P., CASTRO, G. S. A., FERRARI NETO, J., COSTA, C. H. M. (2013). Leaf application of silicic acid to upland rice and corn. *Semina: Ciências Agrárias*, v. 34, n. 6, p. 2803-2808, 2013. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2013v34n6p2803>
- DATNOFF, L.E., RODRIGUES, F.A., SEEBOLD, K.W. Silicon and plant disease. In DATNOFF, L.E., ELMER, W.H., HUBER, D.M (Org.). *Mineral nutrition and plant disease*. St Paul: American Phytopathological Society, 2007, p. 233-246.
- EPSTEIN, E. Silicon. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, v. 50, n. 03, p. 641-664, 1999. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.50.1.641>
- ERALAN, F., INAL, A., PILBEAM, D.J., GUNES, A. Interactive effects of salicylic acid and silicon on oxidative damage and antioxidant activity in spinach (*Spinacia oleracea* L cv. Matador) grown under boron toxicity and salinity. *Plant Growth Regulation*, v. 55, n.3, p. 207-1019, 2008.
- FAGERIA, N.K., BALIGAR, V.C., JONES, C. A Common bean and cowpea. *Scientia Agrícola*, Piracicaba, v.52, n.2, p.339-345, 1995.
- FERNANDES, S. N. D., RODRIGUES, A. M. G., VIANA, T. V. A., FERNANDES, C. N. V., SOBREIRA, A. E. A., AZEVEDO, B. M. Crescimento do milho verde sob Lâminas de irrigação e adubação foliar silicatada. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v.12, n. 4, p. 2789-2798, 2018.
- FERRAZ, R. L. S., MAGALHÃES, I. D., BELTRÃO, N. E. M., MELO, A. S., NETO, J. F. B., ROCHA, M. S. Photosynthetic pigments, cell extrusion and relative leaf water content of the castor be an under silicone and salinity. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 19, n. 09, p. 841-848, 2015. <https://doi.org/10.1590/18071929/agriambi.v19n9p841-848>
- FERRAZ, R.L.S., BELTRÃO, N.E.M., MELO, A.S., MAGALHÃES, I.D., FERNANDES, P.D., ROCHA, M.S. Trocas gasosas e eficiência fotoquímica de cultivares de algodoeiro herbáceo sob aplicação de silício foliar. *Semina: Ciências Agrárias*, v.35, n.2, p.735-748, 2014. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2014v35n2p735>
- FREIRE, J. C., RIBEIRO, M. V. A., BAHIA, V. G., LOPES, A. S., AQUINO, L. H. Respostas do milho cultivado em casa de vegetação a níveis de água em solos da região de Lavras (MG). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 4, n. 1, p. 5-8, 1980.
- GAO, X., ZOU, C., WANG, L., ZHANG, F. Silicon decreases transpiration rate and conductance from stomata of maize plants. *Journal of Plant Nutrition*, v. 29, p. 1637-1647, 2006. <https://doi.org/10.1080/01904160600851494>
- GHOLZ, H.L., EWEL, K.C., TESKEY, R.O. Water and forest productivity. *Forest Ecological Management*, Amsterdam, v.30, p.1-18, 1990.
- GONG, H., ZHU, X., CHEN, K., WANG, S., ZHANG, C. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. *Plant Science*, p. 169-321, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2005.02.023>
- GRATÃO, P.L., POLLE, A., LEA, P.J., AZEVEDO, R.A. Making the life of heavy metalstressed plants a little easier. *Functional Plant Biology*, v.32, p.481-494, 2005. <https://doi.org/10.1071/FP05016>
- GUIMARÃES, C.M.; STONE, L.F.; BRUNINI, O. Adaptação do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) à seca. II Produtividade e componentes agrônômicos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 1, p.481-488, 1996.
- GUNES, A., INAL, A., BAGCI, E. G., COBAN, S. Influence of silicon on antioxidant mechanisms and lipid peroxidation in chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars under drought stress. *Journal of Plant Interactions*, v. 2, p. 105-113, 2007. <https://doi.org/10.1080/17429140701529399>
- GUNES, A., PILBEAM, D. J., INAL, A., CONBAN, S. Influence of silicon on sunflower cultivars under drought stress, I: Growth, antioxidant mechanisms, and lipid peroxidation. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, v. 39, n. 13, p. 1885-

- 1903, <https://doi.org/10.1080/00103620802134651>
- JÚNIOR, P.T.J., VENZON, M. Manual de tecnologias agrícolas. Belo Horizonte: EPAMIG. 2007. 800p.
- HARA, A. T., GONÇALVES, A. C. A., MALLER, A., HASHIGUTI, H. T., OLIVEIRA, J. M. Ajuste de modelo de predição de área foliar do feijoeiro em função de medidas lineares. Engenharia na Agricultura, v. 27, n. 2, p. 179-186, 2019. <https://doi.org/10.13083/reveng.v27i2.912>
- HATTORI T., INANAGA S., ARAKI H., PING A., MORITA S., LUXOVA M., LUX A. Application of silicon enhanced drought tolerance in *Sorghum bicolor*. Physiologia Plantarum, v. 123, p. 459-466, 2005. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2005.00481.x>
- HUGHES, A.P.; FREEMAN, P.R. Growth analysis using frequent small harvests. Journal Applied Ecology, London, v.4, p.553-560, 1967.
- IMTIAZ, M., RIZWAN, M. S., MUSHTAQ, M. A., ASHRAF, M., SHAHZAD, S. M., YOUSAF, B., SAEED, D. A., RIZWAN, M., NAWAZ, A., MEHMOOD, S., TU, S. Silicon occurrence, uptake, transport and mechanisms of heavy metals, minerals, and salinity enhanced tolerance in plants with future prospects: A review. Journal of Environmental Management, v. 183, n. 03, p. 521-529, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.09.009>
- KAVALCO, S.A., NICKNICH, W. Tecnologia. Cultivar gerado e registrado. disponível em: <https://www.epagri.sc.gov.br/index.php/solucoes/tecnologias/cultivar-geradolocado> Acesso em: 17 mar 2024.
- KORNDORFER G. H., PEREIRA H. S., CAMARGO M. S. Silicato de cálcio e magnésio na agricultura. Uberlândia: UFU/ICIAG, 3p (GPSi-ICIG-UFU). Boletim Técnico, nº 01, 2002.
- LANNING, F.C., ELEUTERIUS, L.N. Silica deposition in some C3 and C4 species of grasses, sedges and composites in the USA. Annals of Botany, v. 63, p. 395-410, 1989.
- LARCHER, W. Ecofisiologia Vegetal. Editora rima. 2006. 531p.
- LIANG, Y. C., CHEN, Q., LIU, Q., ZHANG, W. H., DING, R.X. Exogenous silicon (Si) increases antioxidant enzyme activity and reduces lipid peroxidation in roots, of salt-stressed barley (*Hordeum vulgare* L.). Journal of Plant Physiology, v. 160, p. 1157-1164, 2003. <https://doi.org/10.1078/0176-1617-01065>
- LIMA, L.M. Manejo da ferrugem da soja (*Phakopsora pachyrhizi* Sydow & P. Sydow) com fungicidas e silício. 2006. 81f. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.
- MA, J.F., MITAKE, Y., TAKAHASHI, E. Silicon as a beneficial element for cropplant. In: DATNOFF, L.E.; SNYDER, G.H.; KORNDÖRFER, G.H. Silicon in Agriculture. Elsevier Science, p. 17-39, 2001.
- MA, J., TAKAHASHI, E. Effect of silicon on growth and phosphorus uptake of Rice. Plant and Soil, v. 126, p. 115-119, 1990.
- MAGHSOUDI, KOBRA; EMAM, YAHYA; ASHRAF, MUHAMMAD. Foliar Application of Silicon at Different Growth Stages Alters Growth and Yield of Selected Wheat Cultivars, Journal of Plant Nutrition. 2015. <https://doi.org/10.1080/01904167.2015.1115876>
- MARIANO, K. R., BARRETO, L. S., SILVA, A. H. B., NEIVA, G. K. P., AMORIM, S. Fotossíntese e tolerância protoplasmática foliar em *Myracrodruon urundeuva* FR. ALL. submetida ao déficit hídrico. Revista Caatinga, v. 22, p. 72-77, 2009. <https://revistas.ufpr.br/floresta/article/viewFile/16320/10793>
- MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. London, Academic Press, 920p., 1995.
- MENEGALE, M.L.C., CASTRO, G.S.A., MANCUSO, M.A.C. Silício: Interação com o sistema solo-planta. Journal of Agronomic Sciences, v.4, n. especial, p.435-454, 2015.
- OLIVEIRA, R.B., LIMA, J.S.S., REIS, E.F., PEZZOPANE, J.E.M., SILVA, A. F. Níveis de déficit hídrico em diferentes estádios fenológicos do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L., cv. Capixaba precoce). Engenharia na Agricultura, Viçosa, v.16, n.3, p.343-350, 2008. <https://doi.org/10.13083/reveng.v16i3.35>
- OLIVEIRA, L. A. Silício em plantas de feijão e arroz: absorção, transporte, redistribuição e tolerância ao cádmio. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo. 2009.
- PEREIRA, A.R., MACHADO, E.C. Análise quantitativa do crescimento de comunidades vegetais. Boletim Técnico, 114. Campinas: IAC, 1987. 33p.
- PIMENTEL, C., PEREZ, A.J.C. Estabelecimento de parâmetros para avaliação de tolerância à seca, em genótipos de feijoeiro. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.35, n.1, p.31-39, 2000. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2000000100005>

- POZZA, A. A. A., ALVES, E., POZZA, E. A., CARVALHO, J. G., MONTANARI, M., GUIMARÃES, P. T. G., SANTOS, D. M. Efeito do silício no controle da cercosporiose em três variedades de cafeeiro. *Fitopatologia Brasileira*, v. 29, p. 185-188, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0100-41582004000200010>
- PULZ, A. L., CRUSCIOL, C. A. C., LEMOS, L. B., SORATTO, R. P. Influência de silicato e calcário na nutrição, produtividade e qualidade da batata sob deficiência hídrica. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, p. 1651-1659, 2008. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000400030>
- RODRIGUES, F. A., OLIVEIRA, L. A., KORNDORFER, A. P. Silício: um element benéfico e importante para as plantas. *Informações Agronômicas*, n. 134, p. 14-20, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.ymben.2013.10.001>
- SASSE, J., SANDS, R. Comparative responses of cottungs and seedlings of *Eucalyptus globulus* to water stress. *Tree Physiology*, Victoria, v. 16, n. 1, p. 287-294, 1996. <https://doi.org/10.1093/treephys/16.1-2.287>
- SAVANT, N. K., SNYDER, G. H., DATNOFF, L. E. silicon management and sustainable rice production. *Advances in agronomy*, v. 58, p. 151-199, 1997. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60255-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60255-2)
- SILVA, C.S. Aplicação foliar de silício na atenuação de danos de deficiência hídrica em cultivares de feijão-caupi. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual da Paraíba. 2018.
- SILVA, T. R. B., LEMOS, L. B., CRUSCIOL, C. A. C. Produtividade e características tecnológicas de cultivares de feijão em resposta à calagem superficial em plantio direto. *Bragantia*, v. 70, p. 196-205, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0006-87052011000100026>
- SOUSA, J. V., RODRIGUES, C. R., LUZ, J. M. Q., PAULO CÉSAR DE CARVALHO, P. C. C., RODRIGUES, T. M., BRITO, C. H. Silicato de potássio via foliar no milho: fotossíntese, crescimento e produtividade. *Bioscience Journal*, v. 26, n. 4, p. 502-513, 2010. <https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/7148/5122>
- SOUZA, L. C., SIQUEIRA, J. A. M., SILVA, J. L. S., COELHO, C. C. R., NEVES, M. G. & OLIVEIRA NETO, C. F. Osmorreguladores em plantas de sorgo sob suspensão hídrica e diferentes níveis de silício. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*, v. 12, n. 3, p. 240-249, 2013. <https://doi.org/10.11606/s1518-8787.2021055003152>
- STONE, L.F., MOREIRA, J.A.A. Efeito de sistemas de preparo do solo no uso da água e na produtividade do feijoeiro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.35, n.4, p.835-841, 2000. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2000000400022>
- TAIZ, L., ZEIGER, E. *Fisiologia vegetal*. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013, 953 p.
- TATAGIBA, S.D., NASCIMENTO, K.J.T., MORAES, G.A.B.K., PELOSO, A.F. Crescimento e rendimento produtivo do feijoeiro submetido à restrição hídrica. *Engenharia na agricultura*, v .21, n.5, p. 465-475, 2013.
- TISDALE, S.L., NELSON, W.J., BEATON, J.D. *Soil fertility and fertilizers*. New York: Macmillan Publishing Company, 1993, p. 202-331.
- YOSHIDA, S.; OHNISHI, Y.; KITAGISHI, K. Role of silicon in rice nutrition. *Soil and Plant Food*, Tokyo, v. 5, p. 127-133, 1959.
- URCHEI, M.A., RODRIGUES, J.D., STONE, L.F. Análise de crescimento de duas cultivares de feijoeiro sob irrigação em plantio direto e preparo convencional. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.35, n.3, p.497-506, 2000. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2000000300004>
- XU, C. X., MA, Y. P., LIU, Y. L. Effects os silicon (Si) on growth, quality and ionic homeostasis of aloe under salt stress. *South African Journal of Botany*, v. 98, n. 01, p. 26-36, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2015.01.008>