

INSTITUTO FEDERAL
GOIANO
Câmpus Rio Verde

BACHARELADO EM AGRONOMIA

**WOLLASTONITA COMO FONTE DE SILÍCIO: RESPOSTAS
FISIOLÓGICAS E PRODUTIVAS DO ARROZ DE TERRAS ALTAS E
BENEFÍCIOS RESIDUAIS NO FEJJOEIRO.**

JOSEVALDO CARVALHO BORGES.

Rio Verde – GO.

2025

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO CAMPUS RIO VERDE
BACHARELADO EM AGRONOMIA**

**WOLLASTONITA COMO FONTE DE SILÍCIO: RESPOSTAS
FISIOLÓGICAS E PRODUTIVAS DO ARROZ DE TERRAS ALTAS E
BENEFÍCIOS RESIDUAIS NO FEIJOEIRO.**

JOSEVALDO CARVALHO BORGES

Trabalho de Curso apresentado ao Instituto Federal Goiano – Câmpus Rio Verde, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Bacharel em Agronomia.

Orientador: Prof. D.Sc. Carlos Ribeiro Rodrigues

Co orientador(a): Tatiana Michlovská

Rio Verde – GO.

Julho, 2025

**Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do
Programa de Geração Automática do Sistema Integrado de Bibliotecas do IF Goiano - SIBi**

B732w Borges, Josevaldo Carvalho
 Wollastonita como fonte de Silício: respostas fisiológicas e
 produtivas do arroz de terras altas e benefícios residuais no
 feijoeiro / Josevaldo Carvalho Borges. Rio Verde 2025.

 34f. il.

 Orientador: Prof. Dr. Carlos Ribeiro Rodrigues.
 Coorientadora: Prof^a. Dra. Tatiana Michlovská.
 Tcc (Bacharel) - Instituto Federal Goiano, curso de 0220024 -
 Bacharelado em Agronomia - Integral - Rio Verde (Campus Rio
 Verde).
 1. Wollastonita. 2. Silício. 3. Pigmentos fotossintéticos. 4.
 Eficiência fotoquímica. 5. Produtividade. I. Título.

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

Tese (doutorado)

Dissertação (mestrado)

Monografia (especialização)

TCC (graduação)

Artigo científico

Capítulo de livro

Livro

Trabalho apresentado em evento

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Matrícula:

Título do trabalho:

RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial: Não Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: / /

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- Que cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Local / /
Data

Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais



Documento assinado digitalmente
JOSEVALDO CARVALHO BORGES
Data: 08/07/2025 19:07:47-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)



Documento assinado digitalmente
CARLOS RIBEIRO RODRIGUES
Data: 08/07/2025 19:03:10-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Regulamento de Trabalho de Curso (TC) – IF Goiano - Campus Rio Verde

ANEXO V - ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CURSO

Ao **primeiro** dias do mês de **julho** de dois mil e vinte e **cinco**, às **07.30** horas, reuniu-se a Banca Examinadora composta por: **Prof. Carlos Ribeiro Rodrigues** (orientador), **Eng.a Agrônoma M.Sc. Rebeca Martins da Silva Fernandes de Oliveira** (membro externo), **Eng. Agrônomo Ricardo Aparecido da Silva** (membro externo) e **M.Sc. José Carlos Bento** (membro interno), para examinar o Trabalho de Curso (TC) intitulado “**WOLLASTONITA COMO FONTE DE SILÍCIO: RESPOSTAS FISIOLÓGICAS E PRODUTIVAS DO ARROZ DE TERRAS ALTAS E BENEFÍCIOS RESIDUAIS NO FEIJOEIRO.**” de **Josevaldo carvalho Borges**, estudante do curso de **Bacharelado em Agronomia** do IF Goiano – Campus Rio Verde, sob Matrícula nº **2020202200240068**. A palavra foi concedida ao(à) estudante para a apresentação oral do TC, em seguida houve arguição do candidato pelos membros da Banca Examinadora. Após tal etapa, a Banca Examinadora decidiu pela **APROVAÇÃO** do(a) estudante. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata, que, após apresentação da versão corrigida do TC, foi assinada pelos membros da Banca Examinadora e Mediador de TC.

Rio Verde, **01** de **julho** de 2025.

**Carlos Ribeiro
Rodrigues**

Orientador(a)

Rebeca Martins da Silva Fernandes de Oliveira

Membro da Banca Examinadora

Ricardo Aparecido da Silva

Membro da Banca Examinadora



Documento assinado digitalmente
RICARDO APARECIDO DA SILVA
Data: 01/07/2025 09:24:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

José Carlos Bento

Membro da Banca Examinadora

Documento assinado digitalmente
gov.br PABLO DA COSTA GONTIJO
Data: 29/07/2025 09:24:01-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Pablo da Costa
Gontijo**

Mediador de TC

Observação:

Para o caso de REAPRESENTAÇÃO, tem-se no trecho final da Ata a seguinte redação:

“Após tal etapa, a Banca Examinadora decidiu pela **REAPRESENTAÇÃO** do TC. Desta forma, o estudante deve realizar correções e adequações no trabalho e apresentá-lo novamente em até **X X** dias, contados a partir de hoje (**XX/XX/XXX**). Nesta nova oportunidade, após avaliação da banca examinadora, o estudante poderá ser APROVADO ou REPROVADO, não havendo possibilidade de outra reapresentação. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata que foi assinada pelos membros da Banca Examinadora e Mediador de TC.”

Para o caso de REPROVAÇÃO, tem-se no trecho final da Ata a seguinte redação:

“Após tal etapa, a Banca Examinadora decidiu pela **REPROVAÇÃO** do(a) estudante. Desta forma, o estudante deverá realizar o desenvolvimento e defesa de novo TC no próximo semestre. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata que foi assinada pelos membros da Banca Examinadora e Mediador de TC.”

Documento assinado eletronicamente por:

- **Carlos Ribeiro Rodrigues, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO**, em 01/07/2025 09:13:36.
- **Jose Carlos Bento, CHEFE - FG4 - DLEP-RV**, em 01/07/2025 09:14:41.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 01/07/2025. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 721550

Código de Autenticação: 204348ec6c



Documento assinado digitalmente
gov.br REBECA MARTINS DA SILVA FERNANDES DE OLIVEIRA
Data: 01/07/2025 11:09:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por me conceder a força e a determinação necessárias para a realização deste sonho. À Instituição Federal Goiano, expresse minha profunda gratidão pela oportunidade de estudar e me formar em uma instituição de tão renomada excelência acadêmica. À minha família, em especial à minha mãe, Maria de Carvalho Borges, meu eterno reconhecimento por sua incansável luta para prover os recursos necessários aos meus estudos, permitindo que eu concluísse o ensino médio e pudesse seguir em busca desta conquista. Sua dedicação e incentivo foram fundamentais, e seu sonho de me ver graduado sempre foi uma das minhas maiores motivações para nunca desistir. À minha esposa, Jackeline Rodrigues da Silva, agradeço por seu apoio incondicional, por compreender minhas ausências em momentos cruciais de dedicação aos estudos e por ser minha principal fonte de força e incentivo. Aos meus colegas de curso e aos integrantes do Laboratório Life Soil, em especial à minha querida amiga Lois Natiê, deixo meu sincero agradecimento pela contribuição à minha formação acadêmica e pessoal. Aos professores que, ao longo desta jornada, me transmitiram não apenas conhecimentos técnicos, mas também valiosas lições de vida, registro minha imensa gratidão. Destaco, com especial apreço, o Professor Fernando Higino, que me recebeu nesta instituição e se tornou uma importante referência em minha trajetória. Por fim, ao meu orientador, Professor Carlos Ribeiro Rodrigues, não encontro palavras suficientes para expressar minha gratidão. Sua orientação, paciência e compreensão quanto às minhas demandas foram essenciais para minha participação no laboratório e para a conclusão deste trabalho tão significativo: meu Trabalho de Conclusão de Curso. Sua mentoria transcendeu o âmbito acadêmico, tornando-se uma referência profissional e humana em minha vida. A todos, meu mais profundo e eterno agradecimento.

RESUMO

BORGES, Josevaldo Carvalho. **Wollastonita como fonte de silício: respostas fisiológicas e produtivas do arroz de terras altas e benefícios residuais no feijoeiro**. 2024. 33p Monografia (Curso de Bacharelado de Agronomia). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Câmpus Rio Verde, Rio Verde, GO, 2025.

Este estudo avaliou o efeito de doses de Si, aplicadas via wollastonita, sobre os pigmentos fotossintéticos, fluorescência da clorofila *a* e componentes produtivos do arroz de terras altas, bem como seu efeito residual no feijoeiro em sucessão. O experimento foi conduzindo a campo com delineamento em blocos casualizados com cinco doses de Si (0, 100, 200, 300 e 400 kg ha⁻¹). Foram quantificados os índices de clorofila (*a*, *b* e total) e fluorescência (OJIP e NPQ), teores foliares de Si (arroz: estágio R2; feijoeiro: V4-R4), número de espiguetas (arroz), vagens (feijoeiro), peso de mil grãos e produtividade de grãos. Os teores de Si no solo (0–0,1 m) foram analisados pós-colheita. No arroz, a clorofila *a* aumentou até 117 kg ha⁻¹ de Si, enquanto a clorofila *b* e total diminuíram linearmente, indicando maior eficiência luminosa. Houve melhora na eficiência fotoquímica operacional (Φ_{Op}) e redução do *quenching* não fotoquímico (NPQ), com incremento de 19% no número de espiguetas e 10,5% na produtividade com dose ótima de 100 kg ha⁻¹. No feijoeiro, os resíduos de Si reduziram os pigmentos fotossintéticos até 230 kg ha⁻¹, mas elevaram a produtividade em 34,7% e a eficiência fotoquímica máxima (Φ_{MAX}). Conclui-se que as doses de Si via wollastonita otimizaram a fotossíntese e a produtividade do arroz, enquanto seus resíduos beneficiaram o feijoeiro, mesmo com alterações nos pigmentos, destacando seu potencial em sistemas de rotação.

Palavras chave: ClorofiLog, FluorpenFP, *Oryza sativa* L. cv. BRS 504CL, *Phaseolus vulgaris* L brusone, mancha parda

ABSTRACT

BORGES, Josevaldo Carvalho. **Wollastonite as a silicon source: Physiological and yield responses in upland rice with residual benefits for common bean.** 2024. 33p Monograph (Bachelor's Degree in Agronomy). Federal Institute of Education, Science, and Technology Goiano – Rio Verde Campus, Rio Verde, GO, 2025.

This study evaluated the effect of Si rates applied via wollastonite on photosynthetic pigments, chlorophyll *a* fluorescence, and yield components of upland rice, as well as its residual effects on subsequent common bean cultivation. The field experiment followed a randomized complete block design with five Si rates (0, 100, 200, 300, and 400 kg ha⁻¹). Chlorophyll indices (*a*, *b*, and total), fluorescence parameters (OJIP and NPQ), leaf Si content (rice: R2 stage; bean: V4-R4 stage), number of spikelets (rice), pods (bean), thousand-grain weight, and grain yield were quantified. Post-harvest soil Si content (0–0.1 m) was analyzed. In rice, chlorophyll *a* increased up to 117 kg ha⁻¹ of Si, while chlorophyll *b* and total chlorophyll decreased linearly, indicating improved light-use efficiency. Operational photochemical efficiency (Φ_{Op}) increased, and non-photochemical quenching (NPQ) decreased, resulting in a 19% rise in spikelet number and a 10.5% yield increase at the optimal rate (100 kg ha⁻¹). In common bean, residual Si reduced photosynthetic pigments up to 230 kg ha⁻¹ but enhanced grain yield by 34.7% and maximum photochemical efficiency (Φ_{MAX}). We conclude that Si application via wollastonite optimized photosynthesis and yield in rice, while its residual benefits improved bean productivity despite pigment alterations, demonstrating its potential in crop rotation systems.

Keywords: ClorofiLog, FluorpenFP, *Oryza sativa* L. cultivar BRS 504CL, *Phaseolus vulgaris* L. cultivar IPR Águia, Rice blast, Brown spot.

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1** Dados meteorológicos durante o período de condução do experimento (abril a novembro de 2024)8
- FIGURA 2** Índices Clorofilog de pigmentos fotossintéticos e índices FluorPen FP100 de fluorescência de clorofila *a* obtidos em folhas completamente expandidas de arroz cv. BRS A504 CL em função de doses de Si: (A) Clorofila *a* (ChlA); (B) Clorofila *b* (ChlB); (C) Clorofila total (ChlT); (D) relação clorofila *a*:*b* (ChlA:ChlB); (E) Eficiência Fotoquímica Operacional (Φ_{Op}) e (F) *Quenching* não fotoquímico (NPQ). **, * e ns Significativo a 1 e 5% e não significativo, pelo teste de F, respectivamente.....13
- FIGURA 3** Índices Clorofilog de pigmentos fotossintéticos e índices FluorPen FP100 de fluorescência de clorofila *a* obtidos em folhas completamente expandidas de arroz cv. BRS A504 CL em função de doses de Si: taxa líquida do fechamento dos centros de reação do PSII (M_0) (A); quantidade de aceptores de elétrons (AREA) (B); eficiência quântica do PSII da planta adaptada ao escuro (Φ_{P_0}) (C); probabilidade de a energia de um fóton absorvido mover um elétron após a Quinona A (Φ_{E_0}) (D); rendimento de dissipação de energia (Φ_{D_0}) (E) e fluxo de energia correspondente ao transporte além da Quinona A (ET_0) (F). **, * e ns Significativo a 1 e 5% e não significativo, pelo teste de F, respectivamente.....15
- FIGURA 4** Incidência (%) (A) e Severidade (%) (B) do complexo de doença mancha parda + brusone na primeira folha completamente expandida do arroz, cv. BRS A504, no estágio fenológico R6-R7 em função de doses de Si. **, * e ns Significativo a 1 e 5% e não significativo, pelo teste de F, respectivamente.....16
- FIGURA 5** Índice de produtividade, produtividade de grãos, eficiência agrônômica e de uso do silício (Si) e teores foliares de Si no terço médio de folhas bandeira no estágio R2 (formação do colar da folha bandeira) do arroz cv. BRS A504 CL em função de doses de Si: (A) número de espiguetas por metro quadrado (Espiguetas) (espiguetas m^{-2}); (B) produtividade de grãos ($kg\ ha^{-1}$); (C) eficiência agrônômica (EA) (%), (D) eficiência de uso do Si (EU) e (E) teor foliar de Si (Si Foliar) ($dag\ kg^{-1}$) no estágio R2 no terço médio da folha bandeira. **, * e ns Significativo a 1 e 5% e não significativo, pelo teste de F, respectivamente.....17
- FIGURA 6** Índices ClorofiLog de pigmentos fotossintéticos em folhas completamente expandidas do feijoeiro comum tipo carioca cv. IPR Águia no estágio V4-R5 em função de efeito residual de doses de Si: (A) índice de clorofila *a* (ChlA); (B) índice de clorofila *b* (ChlB); (C) índice de clorofila total (ChlT) e (D) relação clorofila *a*:*b* (ChlA:ChlB). **, * e ns Significativo a 1 e 5% e não significativo pelo teste de F, respectivamente.....19

FIGURA 7 Índices de fluorescência de clorofila *a* na 1ª folha completamente expandida do feijoeiro comum tipo carioca cv. IPR Águia no estágio V4-R5 em função de efeito residual de doses de Si: fluorescência da clorofila *a* inicial (F_0) (A); taxa líquida do fechamento dos centros de reação do fotossistema II (M_0) (B); quantidade de energia necessária para fechar todos os centros de reação do PSII (S_M) (C); eficiência fotoquímica com a planta adaptada ao escuro (ΦP_0) (D); probabilidade de a energia de excitação mover um elétron após a Quinona A (Ψ_0) (E); probabilidade de a energia de um fóton absorvido mover um elétron após a Quinona a (ΦE_0) (F); rendimento de dissipação de energia (ΦD_0) (G) e índice de desempenho da fotoquímica (Π_{ABS}) (H). **, * e ns Significativo a 1 e 5% e não significativo pelo teste de *F*, respectivamente.....21

FIGURA 8 Índices de fluorescência de clorofila *a* na 1ª folha completamente expandida do feijoeiro comum tipo carioca cv. IPR Águia no estágio V4-R5 em função de efeito residual de doses de Si: rendimento quântico máximo (Φ_{MAX}) (A) e operacional do PSII (Φ_{Op}) (B). **, * e ns Significativo a 1 e 5% e não significativo pelo teste de *F*, respectivamente.....22

FIGURA 9 Índices de produtividade e teores foliares de Si no estágio de desenvolvimento R6 do feijoeiro comum tipo carioca cv. IPR Águia em função de efeito residual de doses de Si: (A) número de vagens por planta (vagens planta⁻¹); (B) peso de mil grãos (PMS) (g); (C) produtividade (kg ha⁻¹) e teor foliar de Si (Si Foliar) (dag kg⁻¹). **, * e ns Significativo a 1 e 5% e não significativo pelo teste de *F*, respectivamente.....23

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 Caracterização química do solo antes da aplicação dos tratamentos na profundidade de 0 a 0,2 m.....	9
---	---

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1 Arroz (<i>Oryza sativa</i> L.)	4
2.2 Feijoeiro comum (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.)	4
2.3 Wollastonita	5
2.4 Efeitos do silício no Arroz (<i>Oryza sativa</i> L.) e no Feijoeiro comum (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.)	5
3 MATERIAL E MÉTODOS	8
4 RESULTADOS	12
4.1 Arroz (<i>Oryza sativa</i> L.) cv. BRS 504 CL	12
4.2 Feijão (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) cv. IPR Águia	19
5 CONCLUSÕES	25
6 BIBLIOGRAFIA CITADA	26

1 INTRODUÇÃO

A busca por sustentabilidade na produção de alimentos é contínua, especialmente frente às mudanças climáticas. O manejo nutricional destaca-se por auxiliar na adaptação das plantas ao estresse, com ganhos em produtividade. O silício (Si) é o elemento benéfico mais estudado nesse contexto, porém sua adoção na agricultura depende da disponibilidade de fontes próximas ao produtor. No Brasil, o Si é aplicado principalmente como corretivo de acidez, na forma de silicatos de cálcio e magnésio. (De Camargo; Korndörfer; Wyler, 2014; De Camargo; Rocha; Korndörfer, 2013; De Oliveira et al., 2023; De Toledo; Pires; Nogueira, 2021; Deus et al., 2014; Korndörfer; Datnoff; Corrêa, 1999). Embora o custo do produto seja baixo, o frete torna-se o principal fator limitante para a viabilidade econômica dessa prática.

No Cerrado Brasileiro, a escassez de fontes de Si e o alto custo do transporte são desafios significativos. Como alternativa, a wollastonita, mineral silicatado (CaSiO_3 ou $\text{Ca}_3\text{Si}_3\text{O}_9$) do grupo dos inosilicatos, é uma fonte regional extraída em Anicuns, Goiás. Formada por metamorfismo metasomático, sua baixa resistência ao intemperismo facilita a liberação de Si e cálcio (Ca) em formas assimiláveis pelas plantas. Sua localização geográfica favorece sua viabilidade como fonte de Si para a agricultura do Centro-Oeste Brasileiro, comparada às escórias de siderurgia do Vale do Aço, em Minas Gerais. O uso da wollastonita como fonte de Si já tem vários relatos positivos na literatura e com várias culturas (De Camargo; Korndörfer; Wyler, 2014; De Camargo; Rocha; Korndörfer, 2013; De Oliveira et al., 2023; Deus et al., 2014; Korndörfer; Datnoff; Corrêa, 1999). No Cerrado Brasileiro, há várias áreas irrigadas por sistema de pivô central, utilizadas principalmente para a produção de arroz e feijão em períodos de safrinha, como a segunda safra com arroz e a safrinha de inverno com feijão. Além de avaliar o efeito específico da wollastonita em uma cultura, é importante avaliar seu impacto em sistemas de cultivo.

O arroz é uma das plantas classificadas como acumuladoras de silício (Si), respondendo com aumentos de produtividade devido a melhorias no manejo fitossanitário e maior resistência a estresses abióticos, como déficit hídrico e altas temperaturas (Jiang et al., 2024). Os mecanismos pelos quais o Si influencia a produção e a qualidade do arroz ainda não são completamente elucidados (Jiang et al., 2024). No entanto, a adição de Si na cultura do arroz altera a relação fonte-dreno de fotoassimilados, aumentando a fotossíntese e a concentração de CO_2 nos cloroplastos, com efeitos mais bioquímicos do que físicos, associados à redução da perda de água por transpiração (Detmann et al., 2012; Lavinsky et al., 2016). No arroz, o Si é absorvido e transportado para a parte aérea na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4 ou SiOH_4) (Chaiwong et al., 2022; Ma; Yamaji; Mitani-Ueno, 2011).

O feijão é um dos alimentos mais consumidos no Brasil, com uma área plantada estimada em aproximadamente 2.908,1 mil hectares e expectativa de produção de 3.401,7 mil toneladas para a safra 2024/2025 (The National Supply Company/Brazil (CONAB), 2025). Em função do alto potencial produtivo do feijoeiro, é necessário buscar tecnologias para produzir com mais qualidade e quantidade. Dessa forma, o Si pode trazer ganhos à cultura do feijoeiro, como maior resistência a estresses por déficit hídrico e incidência de doenças (Dan Tatagiba et al., 2024; De Toledo; Pires; Nogueira, 2021; Menegale et al., 2015). Conforme os autores, o feijoeiro aumentou a produção com a aplicação de Si devido à melhoria da arquitetura das plantas, reduzindo o auto sombreamento, o que possivelmente explica o aumento da atividade fotossintética. Outro efeito da aplicação de Si no feijoeiro é a redução do contato das vagens com o solo, diminuindo as perdas por doenças, justificado pela melhoria da arquitetura das plantas (Crusciol et al., 2013).

Na cultura do arroz os efeitos do Si são mais pronunciados e mais facilmente mensurados quando comparado com a cultura do feijoeiro. Esse efeito ocorre em função da maior capacidade de absorção e transporte do Si para a parte superior das plantas de arroz. Já foi elucidado por diversos trabalhos a presença de transportadores de membrana de Si específicos na cultura do arroz (Yamaji; Mitatni; Jian, 2008), tornando essa cultura mais responsiva à adubação silicatada.

Após absorvido, em maior proporção no arroz e em menor intensidade no feijoeiro, o Si é transportado via fluxo transpiratório e depositado sob a cutícula das plantas formando uma camada que aumenta a resistência física das folhas, mantendo-as mais eretas e oferecendo maior resistência a penetração de estruturas de insetos sugadores e mastigadores (Atencio; Goebel; Guerra, 2019; Basagli et al., 2003; Boer; Sampaio; Pereira, 2019; Camargo et al., 2013; Carvalho; Moraes; Carvalho, 1999; De Oliveira et al., 2023; Goussain; Prado; Moraes, 2005; Hartley; DeGabriel, 2016; Jeer et al., 2017) e, também, maior resistência a penetração de estruturas de fungos, tanto mecanismos físicos como bioquímicos e alteração da expressão de genes (Ahammed; Yang, 2021; Datnoff; Deren; Snyder, 1997; Rodrigues; Datnoff, 2005; Santos et al., 2003; Sathe et al., 2021; Savant; Snyder; Datnoff, 1996).

Com as folhas mais eretas, as plantas nutridas com Si aumentam a intercepção de luz e conseqüentemente a taxa fotossintética (Crusciol et al., 2013; Santos et al., 2003). A sílica depositada sob a cutícula das folhas das plantas também reduz as perdas de água por transpiração, mantendo os estômatos abertos, mesmo sob condições de maiores temperaturas, o que mantém a maior taxa fotossintética por períodos maiores. (Agarie et al., 1998; Dan Tatagiba et al., 2024) A maior intercepção de luz, resulta em pequeno estresse oxidativo dentro dos cloroplastos. (Barber; Andersson, 1992; Shi et al., 2022). Todavia esse estresse oxidativo causado pelas folhas mais eretas não é suficiente para gerar danos em função de mecanismos de defesa ativados como aumento da atividade de enzimas antioxidativas ou mesmo mecanismos de dissipação do excesso de energia

como o ciclo das xantofilas (Bassi; Dall'Osto, 2021; Jiang et al., 2025; Shi et al., 2022) que consegue ser mensurado indiretamente pelo índice *quenching* não fotoquímico (NPQ) obtido nas cinéticas de fluorescência de clorofila A (Demmig-Adams; Adams, 2006; Ruban; Murchie, 2012; Strasser; Srivastava; Tsimilli-Michael, 2000; Strasser; Tsimilli-Michael; Srivastava, 2004). Outro mecanismo de proteção contra o excesso de energia é o aumento de clorofila B que serve como proteção para o aparato fotossintético (Dan Tatagiba; Peloso; Rodrigues, 2016; Taiz et al., 2017) ou mesmo a dissipação de energia na forma de fluorescência ainda nos complexos antenas, antes de iniciar o transporte de elétrons além da quinona *a* (Strasser; Srivastava; Tsimilli-Michael, 2000; Strasser; Tsimilli-Michael; Srivastava, 2004). Diante do exposto, a hipótese deste trabalho é que a aplicação de wollastonita pode ser uma alternativa viável para a agricultura no Cerrado Brasileiro, principalmente com efeitos benéficos em sistemas intensivos de produção de grãos, como áreas irrigadas, com melhoria dos índices de produtividade e de desempenho fotoquímico do arroz e os efeitos residuais sobre o feijoeiro cultivado em sucessão.

O objetivo do estudo foi avaliar o efeito de doses de Si aplicado via wollastonita sobre os índices de pigmentos fotossintéticos, de fluorescência de clorofila A e de componentes de produção do arroz de terras altas e seu efeito residual no feijoeiro cultivado em sucessão, em sistemas intensivos irrigados na segunda e terceira safra, respectivamente.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Arroz (*Oryza sativa* L.)

O arroz (*Oryza sativa* L.) é uma espécie monocotiledônea pertencente à família Poaceae, Considerado um dos cereais mais importantes em termos de segurança alimentar global, o arroz destaca-se por seu elevado teor de carboidratos e proteínas, sendo um componente essencial da dieta humana em todas as regiões do planeta. Em escala mundial, ocupa a segunda posição em produção, com o continente asiático respondendo pela maior parcela da produção, liderada pela China e Índia. No continente americano, os Estados Unidos e o Brasil emergem como os principais produtores (Silva; Wander, 2023; Walter; Marchezan; De Avila, 2008)

No Brasil, o consumo interno atingiu 10,5 milhões de toneladas em 2024, demandando investimentos contínuos no setor agrícola para suprir a demanda doméstica. Na safra 2024/2025, a área cultivada foi estimada em 1.170,0 mil hectares, com uma produção total de 11.790,5 mil toneladas Dentro desse contexto produtivo, destaca-se o arroz de terras altas, que registrou uma produção de 928 mil toneladas na mesma safra. (The National Supply Company/Brazil (CONAB), 2025)

Historicamente, o arroz de terras altas foi amplamente utilizado como cultura pioneira em áreas recém-desbravadas, devido à sua adaptação a solos pobres em nutrientes e ácidos, típicos do bioma Cerrado. Atualmente, essa cultura retornou ao cenário agrícola, porém inserida em um contexto de agricultura altamente tecnificada. Sua utilização tem sido estratégica em sistemas de recuperação de pastagens degradadas, visando reduzir custos de reforma, além de atuar como cultura de rotação em esquemas de diversificação produtiva, especialmente em sistemas irrigados por pivô central (Peixoto, 2022).

2.2 Feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.)

O feijão é uma leguminosa que em sua composição básica é rico em carboidratos, proteínas, minerais e vitaminas (Bassinello, 2009). Proveniente das américas teve como maiores centros de domesticação a região central da América, principalmente no México dando origem a cultivares de grão pequeno e no sul dos Andes no norte da Argentina e no sul do Peru de onde se originou cultivares de sementes grandes.(Santos et al., 2015) O feijão é um dos alimentos mais consumidos no Brasil, com uma área plantada estimada em aproximadamente 2.908,1 mil hectares e expectativa de produção de 3.401,7 mil toneladas para a safra 2024/2025. Essa expectativa de área plantada e produção assegura a autossuficiência do Brasil no cultivo do grão, além de consolidar sua posição como um importante exportador (CONAB, 2025).

O feijoeiro comum tem disponibilidade de diversas cultivares adaptadas a plantios em todas as regiões do Brasil e em diferentes épocas do ano, podendo ter até três safras por ano, como o feijão da safra de setembro a janeiro, 1ª safrinha de janeiro a abril e 2ª safrinha de maio a julho. No Cerrado, já existem técnicas de cultivo e cultivares de feijoeiro adaptadas a variadas condições edafoclimáticas (Moura; Brito, 2015; Pereira et al., 2012).

2.3 Wollastonita

A wollastonita é um mineral silicatado do grupo dos inosilicatos resultante de metamorfismo metasomático, ou seja, pelo contato com o corpo ígneo. Consiste em um mineral natural composto predominantemente por silicatos de cálcio, principalmente CaSiO_3 com traços de $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$. Por ser um inosilicato, sua resistência ao intemperismo é baixa e pode ocorrer facilmente a liberação de Silício (Si), cálcio (Ca) e minerais associados que podem ou não ocorrer, como Mg, Fe, S e K. No solo, esses elementos são liberados nas formas absorvidas pelas plantas, auxiliando na correção da fertilidade, além de induzir a formação de carbonatos, pela reação com CO_2 dissolvido na solução do solo (Dudhaiya et al., 2019; Hangx; Spiers, 2009; Haque; Chiang; Santos, 2019; Moosdorf; Renforth; Hartmann, 2014)

No Cerrado Brasileiro a limitação de fontes de silício (Si) e os custos elevados de logística representam obstáculos importantes. Como opção, há a wollastonita, que por sua proximidade geográfica a torna uma alternativa economicamente viável para o fornecimento de Si à agricultura da região Centro-Oeste, em contraste com as escórias siderúrgicas produzidas no Vale do Aço (MG). Estudos científicos já comprovam os benefícios da wollastonita como fonte de silício, com resultados promissores em diversas culturas (De Camargo; Korndörfer; Wyler, 2014; De Camargo; Rocha; Korndörfer, 2013; De Oliveira et al., 2023; Deus et al., 2014; Korndörfer; Datnoff; Corrêa, 1999).

2.4 Efeitos do silício no Arroz (*Oryza sativa* L.) e no Feijoeiro comum (*Phaseolus vulgaris* L.)

O arroz é uma das plantas classificadas como acumuladoras de silício (Si), respondendo com aumentos de produtividade devido a melhorias no manejo fitossanitário e maior resistência a estresses abióticos, como déficit hídrico e altas temperaturas (Jiang et al., 2024). Os mecanismos pelos quais o Si influencia a produção e a qualidade do arroz ainda não são completamente elucidados (Jiang et al., 2024). No entanto, a adição de Si na cultura do arroz altera a relação fonte-dreno de fotoassimilados, aumentando a fotossíntese e a concentração de CO_2 nos cloroplastos, com efeitos mais bioquímicos do que físicos, associados à redução da perda de água por transpiração (Detmann

et al., 2012; Lavinsky et al., 2016). No arroz, o Si é absorvido e transportado para a parte aérea na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4 ou $SiOH_4$) (Chaiwong et al., 2022; Ma; Yamaji; Mitani-Ueno, 2011).

O feijão é um dos alimentos mais consumidos no Brasil, com uma área plantada estimada em aproximadamente 2.908,1 mil hectares e expectativa de produção de 3.401,7 mil toneladas para a safra 2024/2025 (The National Supply Company/Brazil (CONAB), 2025). Essa expectativa de área plantada e produção assegura a autossuficiência do Brasil no cultivo do grão, além de consolidar sua posição como um importante exportador. Em função do alto potencial produtivo do feijoeiro, é necessário buscar tecnologias para produzir com mais qualidade e maior quantidade. Dessa forma, o Si pode trazer ganhos à cultura do feijoeiro, como maior resistência a estresses por déficit hídrico e incidência de doenças. (Dan Tatagiba et al., 2024b; Epifanio de Toledo; Junqueira Pires; Carlos Mohn Nogueira, 2021; Menegale et al., 2015) Conforme os autores, o feijoeiro aumentou a produção com a aplicação de Si devido à melhoria da arquitetura das plantas, reduzindo o auto sombreamento, o que possivelmente explica o aumento da atividade fotossintética. Outro efeito da aplicação de Si no feijoeiro é a redução do contato das vagens com o solo, diminuindo as perdas por doenças, justificado pela melhoria da arquitetura das plantas (Crusciol et al., 2013).

Na cultura do arroz os efeitos do Si são mais pronunciados e mais facilmente mensurados quando comparado com a cultura do feijoeiro. Esse efeito ocorre em função da maior capacidade de absorção e transporte do Si para a parte superior das plantas de arroz. Já foi elucidado por diversos trabalhos a presença de transportadores de membrana de Si específicos na cultura do arroz (Yamaji; Mitatni; Jian, 2008), tornando essa cultura mais responsiva à adubação silicatada.

Após absorvido, pelas plantas de arroz e de feijão, o Si é transportado via fluxo transpiratório e depositado sob a cutícula das plantas formando uma camada que aumenta a resistência física das folhas, mantendo-as mais eretas e oferecendo maior resistência a penetração de estruturas de insetos sugadores e mastigadores (Atencio; Goebel; Guerra, 2019; Basagli et al., 2003; Boer; Sampaio; Pereira, 2019; Camargo et al., 2013; Carvalho; Moraes; Carvalho, 1999; De Oliveira et al., 2023; Goussain; Prado; Moraes, 2005; Hartley; DeGabriel, 2016; Jeer et al., 2017) e, também, maior resistência a penetração de estruturas de fungos, tanto mecanismos físicos como bioquímicos e alteração da expressão de genes (Ahammed; Yang, 2021; Datnoff; Deren; Snyder, 1997; Rodrigues; Datnoff, 2005; Santos et al., 2003; Sathe et al., 2021; Savant; Snyder; Datnoff, 1996).

Com as folhas mais eretas, as plantas nutridas com Si aumentam a interceptação de luz e conseqüentemente a taxa fotossintética (Crusciol et al., 2013; Santos et al., 2003). A sílica depositada sob a cutícula das folhas das plantas também reduz as perdas de água por transpiração, mantendo os estômatos abertos, mesmo sob condições de maiores temperaturas, o que mantém a maior taxa fotossintética por períodos maiores. (Agarie et al., 1998; Tatagiba et al., 2024).

A maior intercepção de luz, resulta em pequeno estresse oxidativo dentro dos cloroplastos. (Barber; Andersson, 1992; Shi et al., 2022). Todavia esse estresse oxidativo causado pelas folhas mais eretas não é suficiente para gerar danos em função de mecanismos de defesa ativados como aumento da atividade de enzimas antioxidativas ou mesmo mecanismos de dissipação do excesso de energia como o ciclo das xantofilas (Bassi; Dall'Osto, 2021; Jiang et al., 2025; Shi et al., 2022) que consegue ser mensurado indiretamente pelo índice *quenching* não fotoquímico (NPQ) obtido nas cinéticas de fluorescência de clorofila *A* (Demmig-Adams; Adams, 2006; Ruban; Murchie, 2012; Strasser; Srivastava; Tsimilli-Michael, 2000; Strasser; Tsimilli-Michael; Srivastava, 2004). Outro mecanismo de proteção contra o excesso de energia é o aumento de clorofila *B* que serve como proteção para o aparato fotossintético (Dan Tatagiba; Peloso; Rodrigues, 2016; Taiz et al., 2017) ou mesmo a dissipação de energia na forma de fluorescência ainda nos complexos antenas, antes de iniciar o transporte de elétrons além da quinona *a* (Strasser; Srivastava; Tsimilli-Michael, 2000; Strasser; Tsimilli-Michael; Srivastava, 2004).

3 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em condições de campo na fazenda Marambaia, Rio Verde, Goiás, sob Latossolo Vermelho acriférrico (Santos et al., 2018; Santos et al., 2011; “Solos Goiás”, 2024) com irrigação por aspersão. Durante o período de condução do experimento foi aplicada lâmina d’água de 10 mm com turno de rega de 2 e 3 dias para as culturas do arroz e do feijoeiro, respectivamente. Os dados de temperatura máxima e mínima e precipitação diária durante o período de condução do experimento foram obtidos da estação meteorológica do município de Rio Verde, Goiás junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (INMET, 2020) (Figura 1). O clima da região foi classificado como Aw, tropical com estação seca no inverno, segundo a classificação de Köppen, e como B1wA’, subtipo a’, megatérmico úmido com deficiência moderada no inverno, conforme a classificação de Thornthwaite (Alvares, 2013; Sobrinho et al., 2020). Antes da instalação do experimento foram coletadas amostras de solo na profundidade de 0 a 0,2 m de profundidade para a caracterização química (SILVA, 2009) (Tabela 1).

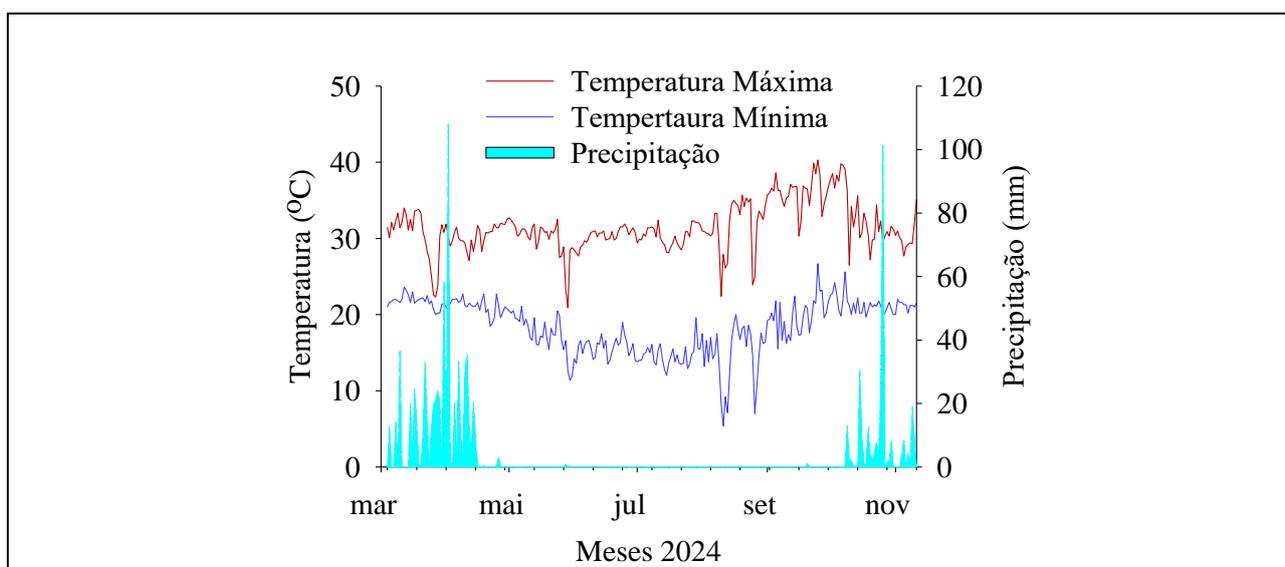


FIGURA 2 Dados meteorológicos durante o período de condução do experimento (abril a novembro de 2024).

TABELA 1 Caracterização química do solo antes da aplicação dos tratamentos na profundidade de 0 a 0,2 m.

pH	Ca ¹	Mg ¹	K ²	Al ¹	H+Al ³	T ⁴	P-M ¹²	S-SO ₄ ²⁻⁵	MO ⁶	V ⁷
CaCl ₂	-----cmol _c dm ⁻³ -----					mg dm ⁻³			%	
6,10	3,60	1,76	0,30	0,00	2,48	8,15	31,50	4,00	2,90	70,00

¹Ca, Mg e Al – extração com KCl 1 mol L⁻¹ com determinação do Ca e Mg em espectrometria de absorção atômica e Al por titulométrica com NaOH; ²K e P – extração pelo método de Mehlich 1 sendo o K determinação por espectrofotometria de chama e o P determinado por colorimétrica pela intensidade da cor azul desenvolvida pela formação do complexo fósforo-molibdênio na presença de ácido ascórbico; ³H+Al – extração com acetato de cálcio pH 7.0 e determinação por titulometria; ⁴T = CTC potencial determinada pela fórmula T = Ca+Mg+K+(H+Al); ⁵Extração com fosfato de cálcio e determinação por turbidimetria com BaCl₂.2H₂O; ⁶Extração por oxidação com dicromato de sódio e determinação colorimétrica e ⁷V – Saturação por bases estimado pela fórmula $V(\%) = \left(\frac{Ca + Mg + K}{T} \right) \times 100$.

O delineamento experimental foi em blocos casualizados com cinco doses de Si (0, 100, 200, 300 e 400 kg ha⁻¹) e quatro repetições. As parcelas foram constituídas de 5 m de largura por 5 m de comprimento, totalizando 25 m² de área total. Para as avaliações foram desconsiderados 1 m de cada extremidade da parcela perfazendo área útil de 9 m².

A semeadura do arroz cv. BRS 504 CL foi semeada mecanicamente com 90 kg ha⁻¹ de semente com linhas espaçadas a cada 0,17 m. Após a germinação foi realizada a aplicação dos tratamentos à lanço e em superfície. A fonte de Si foi a wolastonita (7% de Si, 44% de CaO, PRNT de 58% e PN de 80%).

Na fase de emissão da panícula foram coletadas 20 folhas bandeira por parcela, dentro da área útil. Essas folhas foram lavadas em água corrente para retirada do excesso de poeira e em seguida em água destilada. Em seguida, as folhas foram secas em papel toalha e acondicionadas em sacos de papel tipo kraft e secas em estufa de circulação forçada de ar a 65-70°C até peso constante. Em seguida o material foi moído em moinho tipo Willey em peneira de 2 mm de abertura, acondicionados em sacos plásticos e destinada à análise química de tecido para determinar os teores foliares de silício (Si) pelo método colorimétrico (Elliott; Snyder, 1991).

Na fase de enchimento de grãos, foram avaliadas a incidência e a severidade da mancha parda e brusone (Lenz et al., 2010). A avaliação da incidência e da severidade do complexo de doenças brusone e marcha parda foi realizado em conjunto, não diferenciado as doenças, por apresentarem sintomas semelhantes. No mesmo dia, também, foram realizadas as avaliações da fluorescência da clorofila *a* e índices dos pigmentos fotossintéticos com os aparelhos portáteis FluorPen FP100 e ClorofiLog, respectivamente. Com o FluorPen FP100 foi utilizado os índices obtidos pelos protocolos OJIP e NPQ1 (Roháček, 2002; Sánchez-Reinoso; Ligarreto-Moreno; Restrepo-Díaz, 2019; Strasser; Srivastava; Tsimilli-Michael, 2000; Strasser; Tsimilli-Michael; Srivastava, 2004).

Na colheita, foram coletados 1 m² de cada parcela dentro da área útil. Foram avaliados o número de espiguetas por m², a produtividade de grãos e o peso de mil grãos com casca. Os dados de produtividade de grãos e peso de mil grãos foram estimados com a umidade dos grãos corrigida para 13%. Com base nos dados de produtividade de grãos foi estimada a eficiência agrônômica (EA) e de uso (EU) do Si (Equação 1 e 2, respectivamente)

$$EA(\%) = \frac{(PG_{Dose\ Si} - PG_{0\ Si})}{PG_{0\ Si}} \times 100 \dots\dots\dots \text{Equação 1}$$

$$EU = \frac{(PG_{Dose\ Si} - PG_{0\ Si})}{Dose\ Si\ (kg\ ha^{-1})} \dots\dots\dots \text{Equação 2}$$

Onde,

EA (%) – eficiência agrônômica;

EU eficiência de uso

PG_{Dose Si} (kg ha⁻¹) – produtividade de grãos do tratamento com dose de Si (100, 200, 300 e 400 kg ha⁻¹);

PG_{0 Si} (kg ha⁻¹) – produtividade de grãos do tratamento sem Si (0 kg ha⁻¹) e

Dose Si (kg ha⁻¹) – dose de Si aplicada (100, 200, 300 e 400 kg ha⁻¹).

Após a colheita do arroz foi semeado o feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) tipo carioca cultivar IPR Águia. O feijoeiro foi semeado no espaçamento de 0,5 m entre linha com população de 8 plantas m linear⁻¹.

No início do florescimento do feijoeiro foram coletados 20 trifólios completamente maduros com o pecíolo dentro da área útil de cada parcela. As folhas foram lavadas em água corrente para retirada do excesso de poeira e em seguida em água destilada. Em seguida, as folhas foram secas em papel toalha e acondicionadas em sacos de papel tipo kraft e secas em estufa de circulação forçada de ar a 65-70°C até peso constante. Em seguida o material foi moído em moinho tipo Willey em peneira de 2 mm de abertura, acondicionados em sacos plásticos e destinada à análise química de tecido para determinar os teores foliares de silício (Si) pelo método colorimétrico (Elliott; Snyder, 1991).

No mesmo período, florescimento, foi realizada a avaliação de fluorescência de clorofila *a* e índices de pigmentos de clorofila com auxílio dos equipamentos FluorPen FP100 e ClorofiLog, respectivamente. Com o FluorPen FP100 foi utilizado os índices obtidos pelos protocolos OJIP e NPQ1 (Roháček, 2002; Sánchez-Reinoso; Ligarreto-Moreno; Restrepo-Díaz, 2019; Strasser; Srivastava; Tsimilli-Michael, 2000; Strasser; Tsimilli-Michael; Srivastava, 2004).

Na colheita, foram coletados 3 linhas de 3 metros de comprimento, totalizando 9 m lineares. Foram avaliados o número de vagens por planta, a produtividade de grãos e o peso de mil grãos. Para a avaliação do número de vagens foram escolhidas aleatoriamente 10 plantas colhidas por parcela e contado o número de vagens e o valor médio obtido representa o número de vagens de cada parcela. Os dados de produtividade de grãos e peso de mil grãos foram estimados com a umidade dos grãos corrigida para 13%. Com base nos dados de produtividade de grãos foi estimada a eficiência agronômica (EA) e de uso (EU) do Si (Equação 1 e 2, respectivamente)

Os dados obtidos foram submetidos a análise de variância e regressão em função das doses de Si com auxílio do pacote *ExpDes.pt* (Ferreira; Cavalcanti; Nogueira, 2021) do programa R (R CORE TEAM, 2024).

4 RESULTADOS

4.1 Arroz (*Oryza sativa* L.) cv. BRS 504 CL

Os índices Clorofilog de clorofila *a* (ChlA) aumentaram até a dose de 117 kg ha⁻¹ de Si, seguido de redução (Figura 2 A). Os índices de clorofila *b* (ChlB) e total (ChlT) reduziram com o incremento das doses de Si (Figuras 1 B e C). A relação ChlA:ChlB aumentou linearmente com as doses de Si (Figura 2 D). Houve, em geral, com as doses de Si redução dos índices de ChlA e ChlB e aumento da relação ChlA:ChlB. O aumento da relação ChlA:ChlB significa que a redução de ChlB foi mais intensa que a redução de ChlA com o aumento das doses de Si. A ChlB, além de ter como função a proteção contra a fotoxidação (Taiz et al., 2017), também possui como função aumentar a absorção de luz quando há redução da intensidade luminosa, o que ocorre por sombreamento. Assim, pode-se afirmar que a redução mais intensa da ChlB em relação à ChlA com as doses de Si no arroz pode ser um indicativo de aumento da eficiência de absorção de luz nas folhas avaliadas. E a redução dos teores de clorofila, em geral, pode ser uma resposta ao aumento da eficiência da interceptação da energia luminosa, reduzindo possíveis danos por estresse oxidativo. A melhoria da interceptação de luz pelo arroz quando nutrido com Si pode ser explicado pela melhora da arquitetura das plantas em função de folhas mais eretas (Dan Tatagiba; Peloso; Rodrigues, 2016).

A eficiência fotoquímica máxima (Φ_{MAX}) não alterou com os tratamentos obtendo valor médio (média \pm erro) de $0,79 \pm 0,02$, valor abaixo do considerado o mínimo ideal, que é 0,80, ou seja, Φ_{MAX} igual ou superior a 80% (Strasser; Srivastava; Tsimilli-Michael, 2000; Strasser; Tsimilli-Michael; Srivastava, 2004). A eficiência fotoquímica operacional (Φ_{Op}) e o *quenching* não fotoquímico (NPQ) alteraram em função das doses de Si (Figuras 2 E e F, respectivamente). O maior valor da eficiência fotoquímica operacional (Φ_{Op}) (0,64) e menor *quenching* não fotoquímico (NPQ) (0,30) foram obtidos com a dose de 200 kg ha⁻¹ de Si (Figuras 2 E e F, respectivamente).

Em trabalho realizado com a cultura do arroz para avaliar o efeito do Si na alteração de parâmetros de fotoquímica, tratamentos sem e com (2 mmol L⁻¹) Si, em solução nutritiva, observa-se resultados semelhantes se comparado aos tratamentos com as doses de 0 e 100 kg ha⁻¹ de Si, ou seja, aumento dos teores dos pigmentos fotossintéticos (Figuras 2 A, B e C) com a aplicação da primeira dose de Si comparado ao tratamento sem Si (Dan Tatagiba; Peloso; Rodrigues, 2016). Os autores justificam esses resultados devido a melhora da arquitetura das plantas. No mesmo trabalho, observa-se ausência de efeito do Si sobre a eficiência fotoquímica máxima (Φ_{MAX}) e aumento da eficiência fotoquímica operacional (Φ_{Op}) e redução do *quenching* não fotoquímico (NPQ) (Dan Tatagiba; Peloso; Rodrigues, 2016).

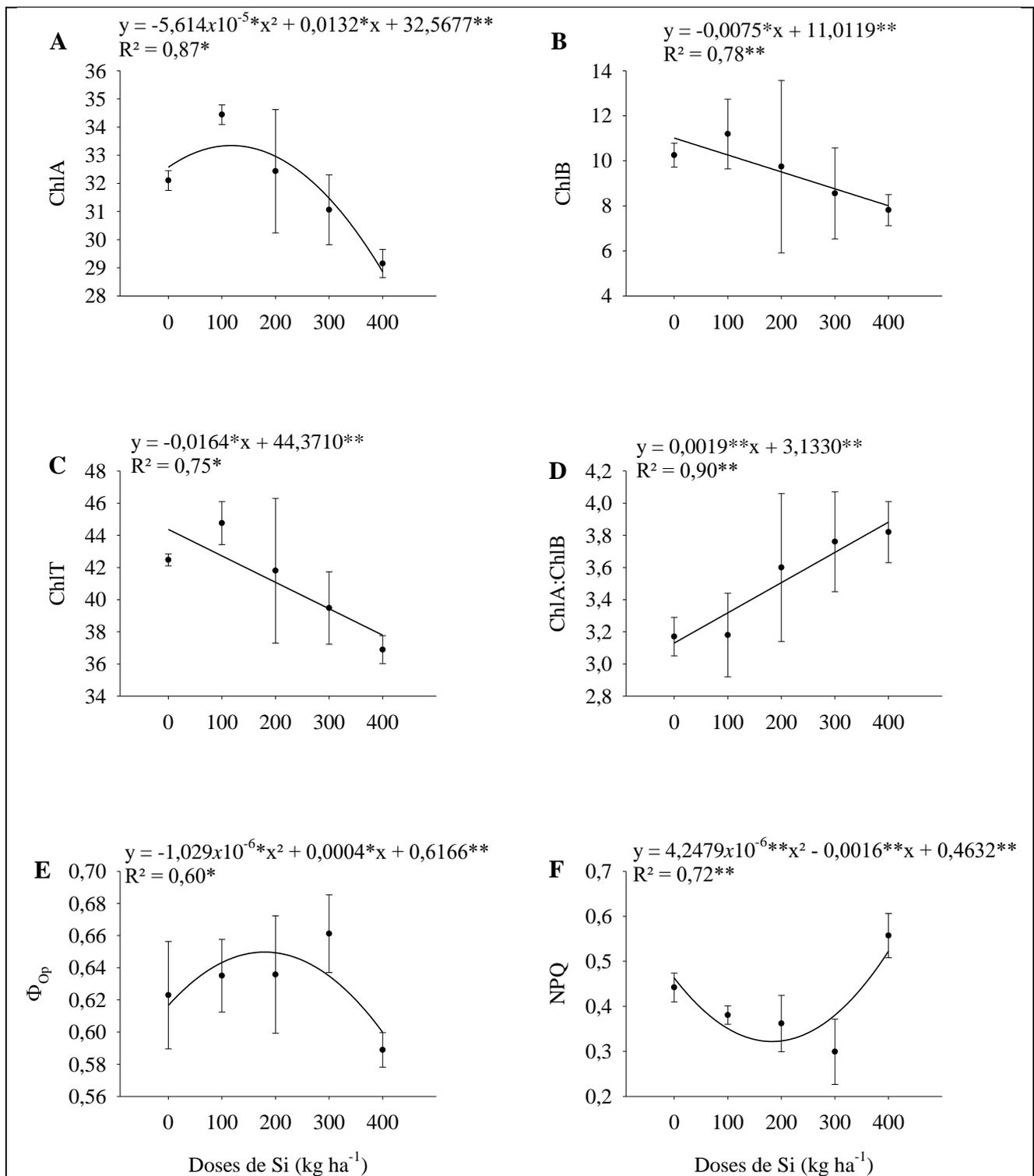


FIGURA 2 Índices Clorofilog de pigmentos fotossintéticos e índices FluorPen FP100 de fluorescência de clorofila *a* obtidos em folhas completamente expandidas de arroz cv. BRS A504 CL em função de doses de Si: (A) Clorofila a (ChlA); (B) Clorofila b (ChlB); (C) Clorofila total (ChlT); (D) relação clorofila *a*:*b* (ChlA:ChlB); (E) Eficiência Fotoquímica Operacional (Φ_{Op}) e (F) *Quenching* não fotoquímico (NPQ). **, * e ns Significativo a 1 e 5% e não significativo, pelo teste de F, respectivamente.

De forma semelhante, se comparado os tratamentos com 0 e 100 kg ha^{-1} de Si, será obtido o mesmo comportamento para as variáveis de eficiência fotoquímica máxima (Φ_{MAX}), operacional (Φ_{Op}) e

quenching não fotoquímico (NPQ). Doses acima de 100 kg ha⁻¹ de Si, demonstrou efeitos negativos sob os pigmentos fotossintéticos e sobre os índices de clorofila, para as condições do atual trabalho.

A melhora na eficiência fotoquímica operacional e a redução da perda de energia dissipando na forma de calor, ou seja, *quenching* não fotoquímico (NPQ) com a aplicação de Si, também foi explicada pela melhoria da arquitetura das plantas (Dan Tatagiba; Peloso; Rodrigues, 2016). A maior absorção de luz pelas plantas resulta em maior taxa de transporte de elétrons pelo fotossistema (De Carvalho et al., 2020; Oxborough, 2004) e conseqüentemente disponibiliza maior quantidade de energia na forma de poder redutor (NADPH e ATP) para os processos dentro dos cloroplastos, como assimilação de carbono (Kramer et al., 2004), e conseqüentemente de nitrogênio e enxofre. A maior disponibilidade de poder redutor para os processos de assimilação de nutrientes nos cloroplastos em plantas de arroz nutridas com Si pode explicar a maior eficiência dessas em utilizar o N, reduzindo problemas como aumentos da susceptibilidade a doenças e acamamento do arroz sob altas doses de N (Ávila et al., 2010; Mauad et al., 2003; Osuna-Canizalez; De Datta; Bonman, 1991; Tao-wen et al., 2021).

A maior interceptação de energia luminosa pelas folhas mais eretas das plantas nutridas com Si pode, além de disponibilizar energia para processos metabólicos, também pode, em pequena escala, gerar um pequeno estresse fotoquímico (Barber; Andersson, 1992; Shi et al., 2022), não o suficiente para gerar danos irreversíveis ao sistema fotossintético, mas o suficiente para ativar uma série de respostas de indução de resistência. O aumento da taxa líquida do fechamento dos centros de reações do fotossistema dois (CR/PSII) (M_0) até 150 kg ha⁻¹ (Figura 3 A) é um indicativo de que com o aumento das doses de Si gerou esse dano. Todavia, esse dano não foi suficiente, até a dose de 100 kg ha⁻¹ de Si, para reduzir a eficiência fotoquímica operacional (Φ_{Op}) (Figura 2 E). Esse aumento eficiência fotoquímica operacional (Φ_{Op}) (Figura 2 E) pode ser explicado pelo aumento linear do número de aceptores (AREA) (Figura 3 B) com o incremento das doses de Si, sugerindo melhor organização da estrutura dos cloroplastos.

Os efeitos obtidos com o aumento das doses de Si podem ser observados com o incremento da eficiência fotoquímica das plantas adaptadas ao escuro (Φ_{P_0}) (Figura 3 C), o aumento na probabilidade de um fóton absorvido mover um elétron após a Quinona A (Φ_{E_0}) (Figura 3 D) e o aumento do fluxo de energia além da Quinona A (ET_0) (Figura 3 F). Com a melhoria na fotoquímica devido ao aumento do Si, há uma redução no rendimento da dissipação de energia na forma de calor (Φ_{D_0}) (Figura 3 E). Em geral, o leve estresse fotoquímico induzido pelo Si ativa respostas de defesa, como aumento de enzimas antioxidantes e regulação de fitormônios, sem comprometer a fotossíntese (Debona; Rodrigues; Datnoff, 2017; Mukarram et al., 2022). O Si protege a maquinaria fotossintética, especialmente sob estresse, reduzindo danos oxidativos e melhorando o desempenho global da planta (Debona; Rodrigues; Datnoff, 2017; Laifa et al., 2023; Pereira et al., 2018; Rastogi et al., 2021).

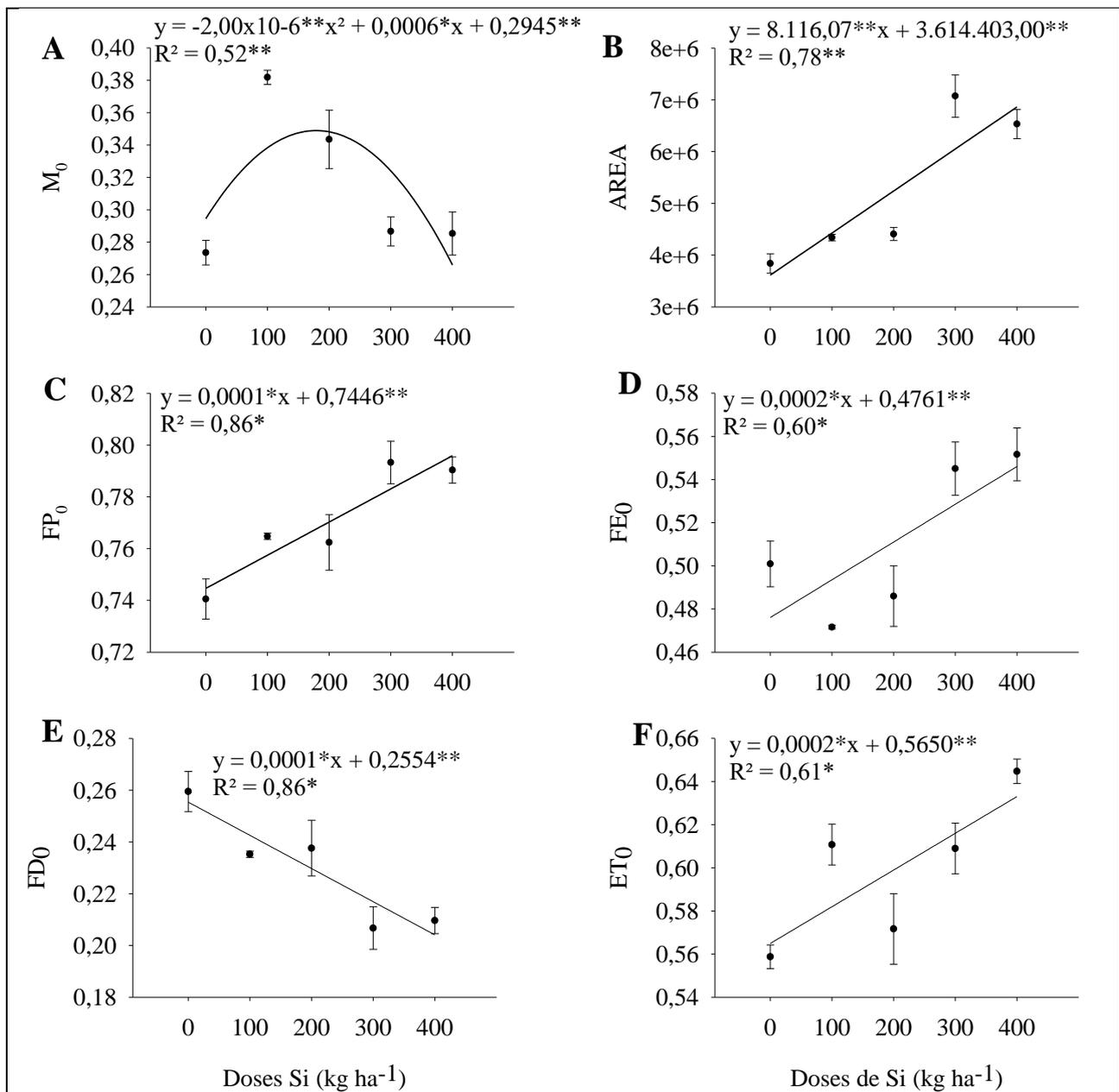


FIGURA 3 Índices Clorofilog de pigmentos fotossintéticos e índices FluorPen FP100 de fluorescência de clorofila *a* obtidos em folhas completamente expandidas de arroz cv. BRS A504 CL em função de doses de Si: taxa líquida do fechamento dos centros de reação do PSII (M_0) (A); quantidade de aceptores de elétrons (AREA) (B); eficiência quântica do PSII da planta adaptada ao escuro (ΦP_0) (C); probabilidade de a energia de um fóton absorvido mover um elétron após a Quinona A (ΦE_0) (D); rendimento de dissipação de energia (ΦD_0) (E) e fluxo de energia correspondente ao transporte além da Quinona A (ET_0) (F). **, * e ns Significativo a 1 e 5% e não significativo, pelo teste de F, respectivamente.

A energia total necessária para o fechamento de todos os centros de reação do PSII (S_M), quantificada como múltiplos turnover ($AREA/(F_m - F_0)$), apresentou valor médio de $779,70 \pm 40,51$ (média \pm erro padrão), indicando homogeneidade na capacidade de acumulação de elétrons no sistemaceptor. De forma consistente, a energia necessária para a redução única da quinona A (S_S) manteve-se em $1,12 \pm 0,02$, enquanto o número de reduções da Quinona A em relação ao tempo zero

(N) registrou $701,62 \pm 37,38$. Esses resultados sugerem que os processos iniciais do transporte de elétrons no fotossistema II não foram alterados pelas condições experimentais. A probabilidade de transferência de elétrons além da quinona A (Ψ_0) mostrou valor constante de $0,66 \pm 0,01$, corroborando a estabilidade observada nos demais parâmetros de fluxo eletrônico. O rendimento quântico médio das reações fotoquímicas primárias (Φ_{Pav}) apresentou mínima variação ($933,65 \pm 1,75$), reforçando a eficiência preservada na conversão energética. Quanto aos índices de desempenho fotoquímico, o parâmetro πABS (índice de desempenho baseado na absorção) registrou $7,34 \pm 0,81$, enquanto os fluxos específicos demonstraram valores característicos de sistemas fotossintéticos íntegros: fluxo de absorção (ABS) = $1,19 \pm 0,02$, fluxo de captura (TR_0) = $0,91 \pm 0,01$ e fluxo de dissipação (DI_0) = $0,28 \pm 0,01$.

A incidência e a severidade do complexo de doenças mancha parda (*Bipolaris oryzae*) + brusone (*Magnaporthe oryzae*) reduziram linearmente em função do incremento das doses de silício (Figura 4A e 4B, respectivamente). A aplicação de silício promove sua deposição sob a cutícula foliar, constituindo uma barreira física que dificulta a penetração de estruturas fúngicas e subsequente colonização dos tecidos. Esse mecanismo explica a redução progressiva na incidência e severidade de ambas as doenças, uma vez que a resistência estrutural mediada pelo silício limita a eficiência da infecção pelos patógenos (Ahammed; Yang, 2021; Datnoff; Deren; Snyder, 1997; Rodrigues; Datnoff, 2005; Santos et al., 2003; Sathe et al., 2021; Savant; Snyder; Datnoff, 1996).

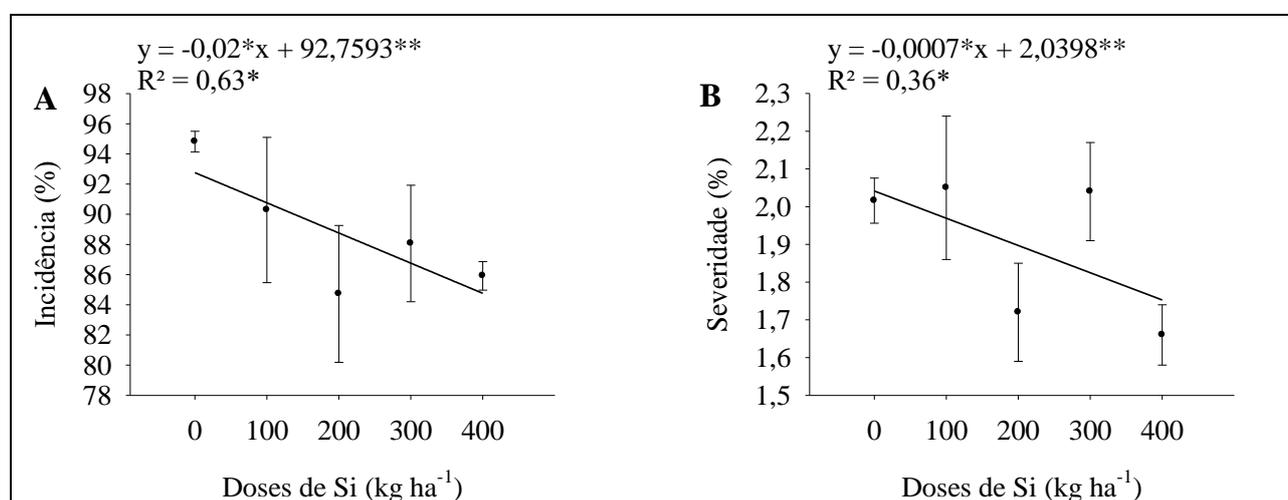


FIGURA 4 Incidência (%) (A) e Severidade (%) (B) do complexo de doença mancha parda + brusone na primeira folha completamente expandida do arroz, cv. BRS A504, no estágio fenológico R6-R7 em função de doses de Si. **, * e ns Significativo a 1 e 5% e não significativo, pelo teste de F, respectivamente.

Houve incremento de 235 para 281 espiguetas m², ou seja, um incremento de 19%, com a dose de 215 kg ha⁻¹ de Si (Figura 5 A). O peso de mil sementes (PMS) não variou, e o valor médio

(média \pm erro) foi de $25,5 \pm 0,32$ gramas. A produtividade de grãos de arroz aumentou de 3.402,28 para 3.759,29 kg ha⁻¹ com a dose de 178 kg ha⁻¹ de Si (Figura 5 B). O incremento de 357 kg ha⁻¹ (5,8 sacas ha⁻¹ de arroz em casca) equivale a um aumento na eficiência agrônômica de 10,5% na produtividade de grãos (Figura 5 C).

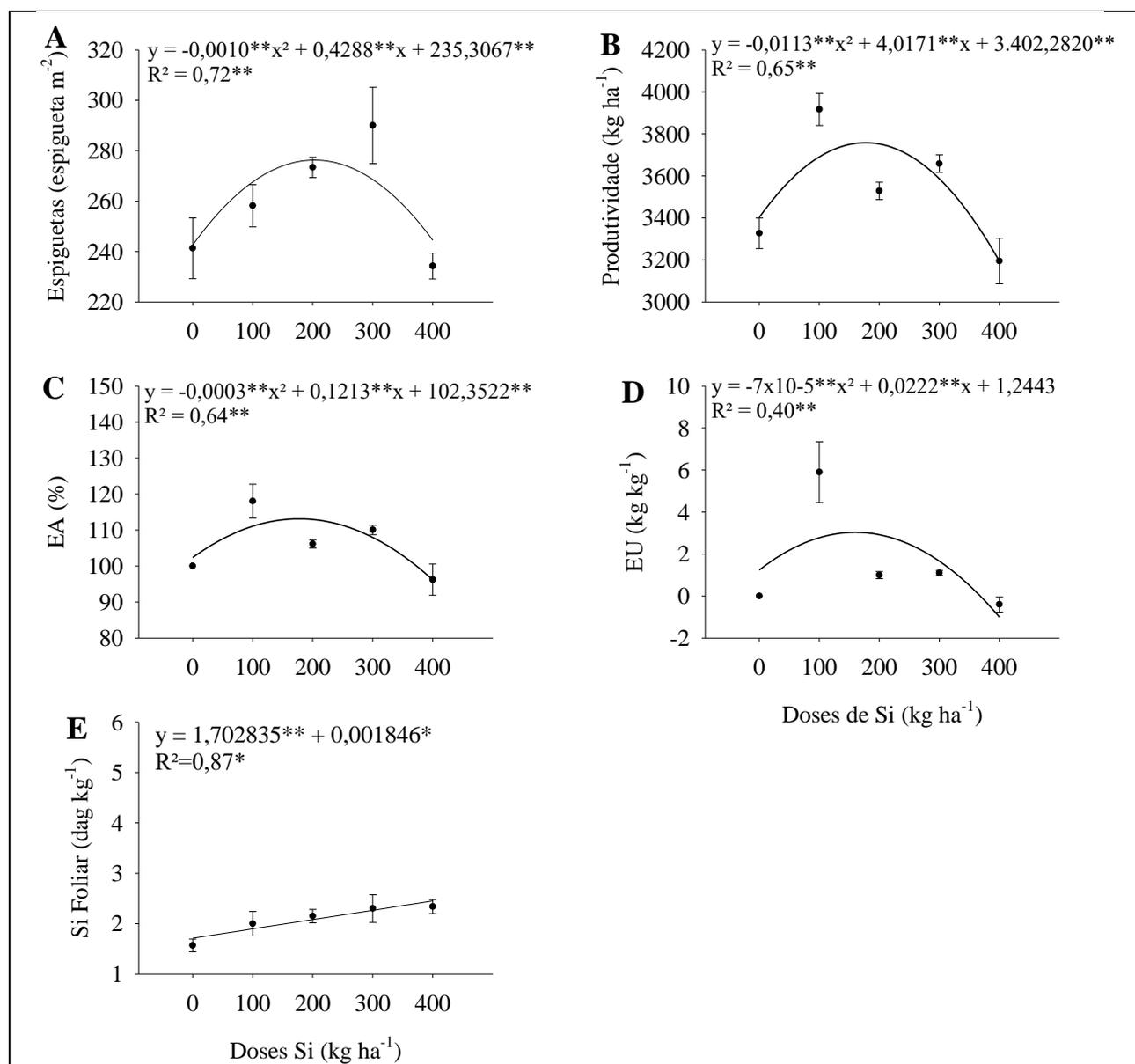


FIGURA 5 Índice de produtividade, produtividade de grãos, eficiência agrônômica e de uso do silício (Si) e teores foliares de Si no terço médio de folhas bandeira no estágio R2 (formação do colar da folha bandeira) do arroz cv. BRS A504 CL em função de doses de Si: (A) número de espiguetas por metro quadrado (Espiguetas) (espiguetas m⁻²); (B) produtividade de grãos (kg ha⁻¹); (C) eficiência agrônômica (EA) (%), (D) eficiência de uso do Si (EU) e (E) teor foliar de Si (Si Foliar) (dag kg⁻¹) no estágio R2 no terço médio da folha bandeira. **, * e ns Significativo a 1 e 5% e não significativo, pelo teste de F, respectivamente.

Se considerando os dados brutos, a dose de 100 kg ha⁻¹ de Si proporcionou a maior produtividade de grãos (3.916,5 kg ha⁻¹), com incremento de 590 kg ha⁻¹ em relação ao tratamento

sem aplicação de Si (0 kg ha^{-1} de Si), representado incremento de $9,8 \text{ sacas ha}^{-1}$ de arroz em casca ou de 18% (Figura 5 B). Com dose de 100 kg ha^{-1} de Si houve incremento de $5,9 \text{ kg}$ de arroz em casca a mais produzido por Kg de Si aplicado (Figura 5 D).

Os teores de Si no solo após a colheita do arroz não alteraram com os tratamentos e obteve valor médio de $5,65 \pm 0,28 \text{ mg kg}^{-1}$. A não alteração do Si no solo após a colheita do arroz pode ser explicado pela aplicação com as plantas no início do perfilhamento e devido a solubilidade mais baixa da wolastonita. A não alteração significativa dos teores de Si no solo com a aplicação de até 400 kg ha^{-1} de Si via wolastonita pode ser atribuída à baixa disponibilidade de Si em solos agrícolas, especialmente quando não há histórico de adubação silicatada ou quando fontes de Si de baixa solubilidade, como a wolastonita, são utilizadas (Haynes, 2014; Huang et al., 2024). A disponibilidade de Si no solo depende fortemente da solubilidade do material aplicado e das características do solo, como pH, matéria orgânica e textura, que influenciam a liberação e retenção do Si disponível para as plantas. Ainda, mesmo não alterando os teores no solo, houve incremento linear dos teores foliares da folha bandeira do arroz avaliado no estágio R2 (Figura 5 E). Os teores foliares de Si variaram de $1,6$ a $3,4 \text{ dag kg}^{-1}$, valores inferiores aos já relatados para plantas de arroz adubadas com Si o que pode ser justificado pela baixa disponibilidade no solo (Haynes, 2014; Huang et al., 2024; Sun et al., 2019).

O aumento da produtividade em plantas de arroz (*Oryza sativa* L.) decorrente da aplicação de silício (Si) está associado a múltiplos mecanismos induzidos por esse elemento benéfico. O Si promove melhorias na arquitetura da planta deixando as folhas mais eretas, otimizando a captação de luz (Crusciol et al., 2013; Santos et al., 2003) além disso, ele estimula a síntese de clorofila, aumentando a capacidade fotossintética das plantas (Dan Tatagiba; Peloso; Rodrigues, 2016; Taiz et al., 2017). Um outro efeito observado do Si é sua deposição na epiderme, formando uma camada cuticular silicatada que atua como barreira física contra patógenos e inibe a os danos causados por insetos. (Ahammed; Yang, 2021; Atencio; Goebel; Guerra, 2019; Basagli et al., 2003; Boer; Sampaio; Pereira, 2019; Camargo et al., 2013; Carvalho; Moraes; Carvalho, 1999; Datnoff; Deren; Snyder, 1997; De Oliveira et al., 2023; Goussain; Prado; Moraes, 2005; Hartley; DeGabriel, 2016; Jeer et al., 2017; Rodrigues; Datnoff, 2005; Santos et al., 2003; Sathe et al., 2021; Savant; Snyder; Datnoff, 1996) Adicionalmente, o Si fortalece as respostas de defesa das plantas, mitigando os danos causados por estresses bióticos e abióticos, incluindo a redução da produção de espécies reativas de oxigênio EROs (Bassi; Dall'Osto, 2021) Outro mecanismo relevante é a regulação estomática induzida pelo Si, que diminui a perda de água por transpiração, (Agarie et al., 1998; Dan Tatagiba et al., 2024b) melhorando a eficiência hídrica. Esses efeitos combinados resultam em plantas mais vigorosas, com maior tolerância a estresses e, conseqüentemente, maior produtividade de grãos.

4.2 Feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) cv. IPR Águia

Os índices de clorofila *a* (ChlA), *b* (ChlB) e total (ChlT) (Figuras 4 A, B e C, respectivamente) ajustaram a modelos quadráticos inversos em função das doses de Si. Os menores valores (37,60; 14,65 e 52,50 de ChlA, ChlB e ChlT, respectivamente) foram obtidos com 243,00; 215,42; 234,30 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente (Figuras 6 A, B e C, respectivamente). A relação clorofila *a:b* (ChlA:ChlB) (Figura 6 D) ajustou a modelo quadrático positivo em função das doses de Si, com o maior valor (2,56) obtido com 211,25 kg ha⁻¹ de Si. A redução dos teores de clorofila nas folhas do feijoeiro inicialmente até as doses próximas de 215 a 234 kg ha⁻¹ de Si pode ser explicado pela redução da absorção de Fe, K e Mg, que são essências para a biossíntese de clorofila (Pereira et al., 2018; Rastogi et al., 2021). O aumento da deposição de sílica nas folhas pode reduzir as trocas gasosas das plantas com consequente redução do crescimento das folhas, o que consequentemente leva a incremento dos teores de clorofila por efeito de concentração (Trejo-Téllez et al., 2020).

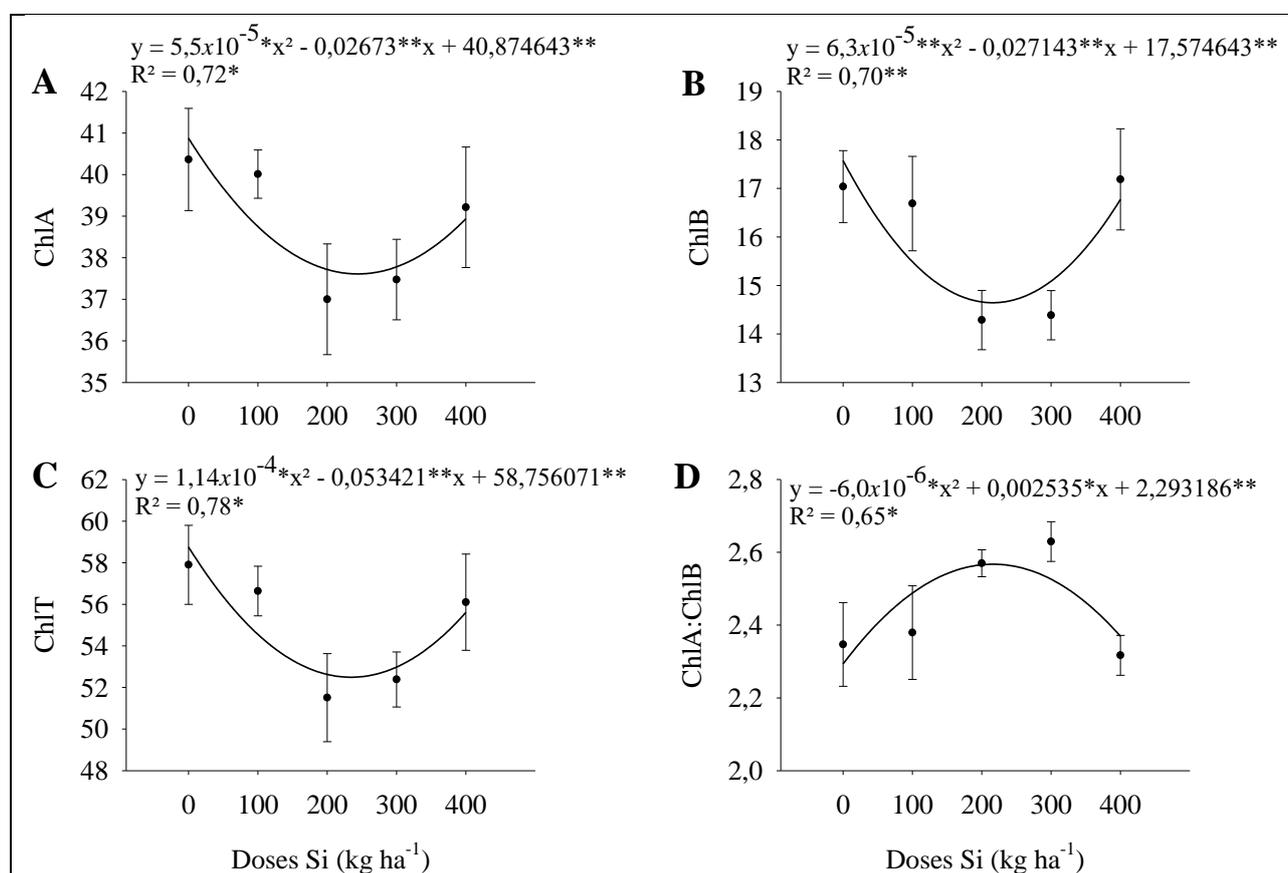


FIGURA 6 Índices ClorofiLog de pigmentos fotossintéticos em folhas completamente expandidas do feijoeiro comum tipo carioca cv. IPR Águia no estágio V4-R5 em função de efeito residual de doses de Si: (A) índice de clorofila *a* (ChlA); (B) índice de clorofila *b* (ChlB); (C) índice de clorofila total (ChlT) e (D) relação clorofila *a:b* (ChlA:ChlB). **, * e ns Significativo a 1 e 5% e não significativo pelo teste de *F*, respectivamente.

Os parâmetros de fluorescência da clorofila *a* analisados não se ajustaram a modelos matemáticos e não apresentaram correlação significativa com as doses de Si aplicadas, dessa forma

foram obtidos os seguintes valores (média \pm erro) respectivamente: a intensidade de fluorescência inicial (F_j) foi de $4934,35 \pm 127,8783$, enquanto a intensidade em 60 ms (F_I) registrou $5024,4 \pm 127,6438$. A intensidade de fluorescência máxima (F_M) atingiu $7525,75 \pm 240,0961$. Em relação aos aceptores de elétrons, observou-se um valor de área correspondente a $4619975 \pm 212927,7$. A energia necessária para reduzir a quinona A uma única vez (S_s) foi quantificada em $0,6449 \pm 0,01378$, enquanto o número de reduções da quinona A em relação ao tempo zero (N) apresentou valor de $2086,701 \pm 211,7212$. O rendimento quântico médio das reações fotoquímicas primárias (Φ_{Pav}) foi de $925,7477 \pm 2,41639$. O quenching não fotoquímico (NPQ) registrou $0,640822 \pm 0,033067$. Quanto aos fluxos energéticos, o fluxo de absorção (ABS/RC) apresentou valor de $3,8912 \pm 0,54539$, o fluxo de captura (TR_0/RC) foi de $1,60325 \pm 0,037364$, o fluxo de transporte de elétrons (ET_0/RC) atingiu $0,7906 \pm 0,043497$, e o fluxo de dissipação (DI_0/RC) foi quantificado em $2,2878 \pm 0,519354$.

Houve aumento linear da fluorescência inicial (F_0), da taxa líquida de fechamento do CR/PSII (M_0) e na quantidade de energia necessária para fechar todos os CR/PSII (S_M) com o aumento das doses de Si (Figuras 7 A, B e C). Com a redução dos teores de clorofila até 213 a 243 kg ha⁻¹ de Si (Figuras 6 A, B e C), espera-se que pouca energia interceptada seja transmitida, o que resulta em perdas na forma de fluorescência, principalmente na fase de captação de energia pelos complexos antena (F_0). Em consequência disso, com o aumento das doses de Si houve redução da eficiência fotoquímica com a planta adaptada ao escuro (Φ_{P_0}), da probabilidade da energia de excitação mover um elétron após a Quinona A (Ψ_0), probabilidade da energia de um fóton absorvido mover um elétron após a Quinona a (Φ_{E_0}) e do índice de desempenho da fotoquímica (Π_{ABS}) (Figuras 7 D, E, F e H, respectivamente). A energia não absorvida está sendo perdida o que resultou em aumento da eficiência da energia dissipada na forma de calor (Φ_{D_0}) com o aumento das doses de Si (Figura 7 G).

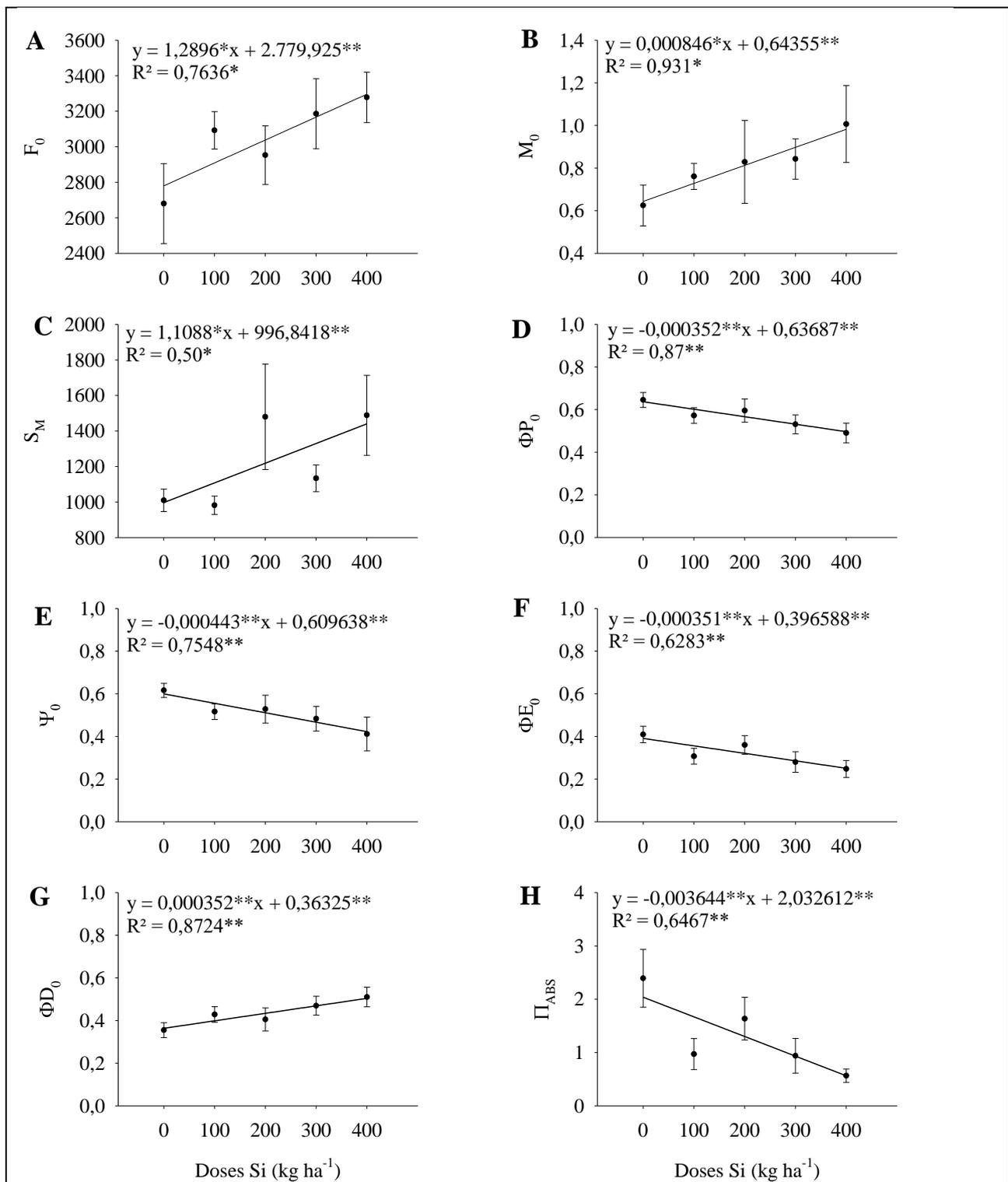


FIGURA 7 Índices de fluorescência de clorofila *a* na 1ª folha completamente expandida do feijoeiro comum tipo carioca cv. IPR Água no estágio V4-R5 em função de efeito residual de doses de Si: fluorescência da clorofila *a* inicial (F_0) (A); taxa líquida do fechamento dos centros de reação do fotossistema II (M_0) (B); quantidade de energia necessária para fechar todos os centros de reação do PSII (S_M) (C); eficiência fotoquímica com a planta adaptada ao escuro (ΦP_0) (D); probabilidade de a energia de excitação mover um elétron após a Quinona A (Ψ_0) (E); probabilidade de a energia de um fóton absorvido mover um elétron após a Quinona a (ΦE_0) (F); rendimento de dissipação de energia (ΦD_0) (G) e índice de desempenho da fotoquímica (Π_{ABS}) (H). **, * e ns Significativo a 1 e 5% e não significativo pelo teste de *F*, respectivamente.

Quando avaliada a eficiência fotoquímica máxima (Φ_{MAX}) e a operacional (Φ_{Op}) pelo procolo NPQ do Fluorpen, observa-se incremento quadrático com as máximas eficiências (0,66 e 0,45) foram obtidas com 274,75 e 258,125 kg ha⁻¹ de Si, respectivamente (Figuras 8 A e B, respectivamente). Observa-se que as doses que obtiveram o máximo de eficiência fotoquímica máxima (Φ_{MAX}) e a operacional (Φ_{Op}) são próximas das doses que obtiveram os menores índices dos pigmentos fotossintéticos ChlA, ChlB e ChlT (Figuras 6 A, B e C, respectivamente). Assim, pode-se inferir que a redução nos teores de pigmentos fotossintéticos pode ter sido uma estratégia para ajustar a máxima eficiência fotoquímica das plantas, ou seja, um mecanismo de ajuste para evitar estresse oxidativo.

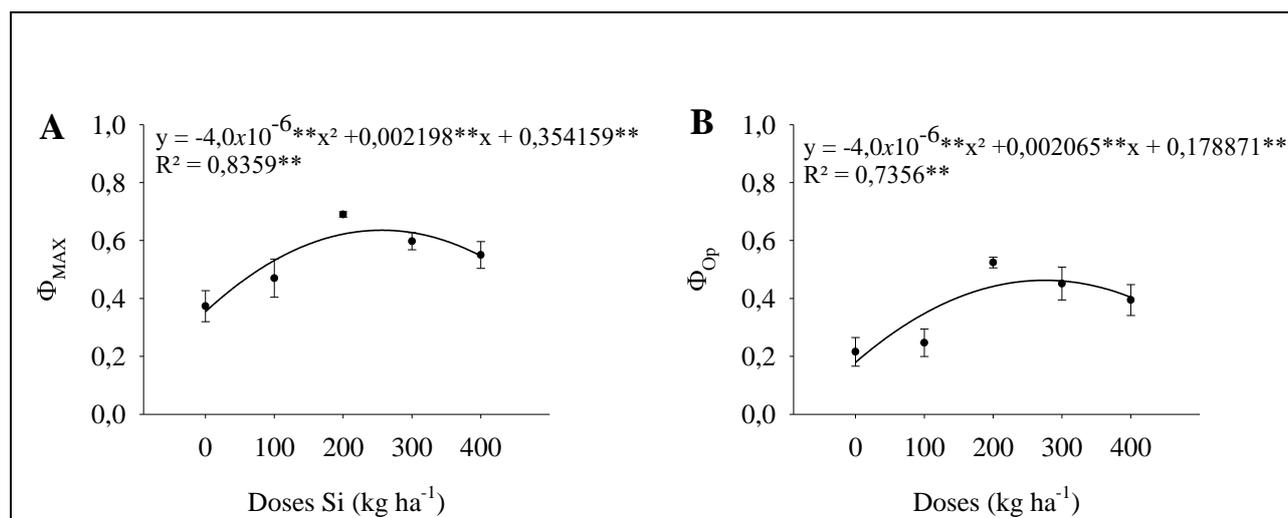


FIGURA 8 Índices de fluorescência de clorofila *a* na 1ª folha completamente expandida do feijoeiro comum tipo carioca cv. IPR Águia no estágio V4-R5 em função de efeito residual de doses de Si: rendimento quântico máximo (Φ_{MAX}) (A) e operacional do PSII (Φ_{Op}) (B). **, * e ns Significativo a 1 e 5% e não significativo pelo teste de *F*, respectivamente.

O aumento do F_0 , M_0 e S_M indica que mais energia está sendo perdida como fluorescência logo na fase inicial da captação de luz, e que é necessária mais energia para fechar todos os centros de reação do PSII. Isso ocorre porque, com menos clorofila, menos energia é absorvida e utilizada eficientemente, resultando em maior emissão de fluorescência (Anchondo-Páez et al., 2024; Gonzalez-Porras et al., 2024). Dose elevada de Si pode reduzir a síntese ou a estabilidade dos pigmentos fotossintéticos, limitando a capacidade de absorção de luz e, conseqüentemente, a eficiência da fotossíntese (Anchondo-Páez et al., 2024; Dos Santos Sarah et al., 2021; Gonzalez-Porras et al., 2024). Com menos clorofila e maior dissipação de energia, a eficiência de conversão da energia luminosa em energia química diminui, refletindo a eficiência fotoquímica e aumentando a dissipação de energia na forma de calor (Anchondo-Páez et al., 2024; Cao; Ma; Xu, 2020; Dos Santos Sarah et al., 2021; Gonzalez-Porras et al., 2024).

Os maiores índices de produtividade foram observados com a aplicação da dose máxima de silício (400 kg Si ha⁻¹), como observado para o número de vagens por planta (25 vagens planta⁻¹)

(Figura 9A), a massa de mil grãos (257 g) (Figura 9B) e a produtividade (3.079,68 kg ha⁻¹) (Figura 9C). Os incrementos do número de vagens, do peso de mil grãos e da produtividade de grãos do feijoeiro com residual de 400 kg ha⁻¹ de Si em relação ao controle (sem silício – 0 kg ha⁻¹ de Si), foi de 6 vagens planta⁻¹, 17 g e 793,32 kg ha⁻¹, respectivamente. Esses valores equivalem a aumentos percentuais de 31,6% no número de vagens, 7% no peso de mil grãos e 34,7% na produtividade. Com os dados pode-se inferir que o aumento na produtividade do feijoeiro com o residual de 400 kg ha⁻¹ de Si pode ser explicado pelo aumento equivalente percentual do número de vagens.

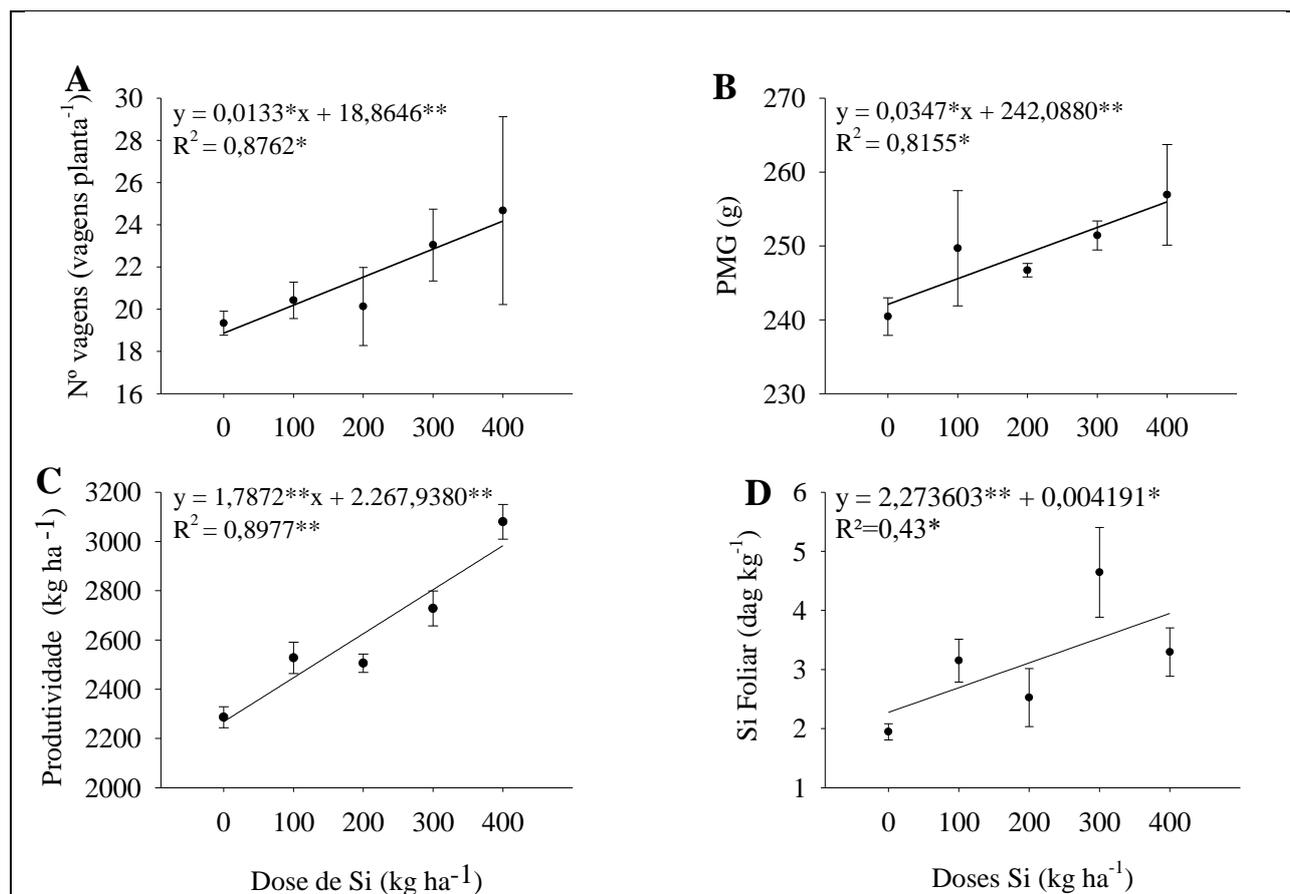


FIGURA 9 Índices de produtividade e teores foliares de Si no estágio de desenvolvimento R6 do feijoeiro comum tipo carioca cv. IPR Águia em função de efeito residual de doses de Si: (A) número de vagens por planta (vagens planta⁻¹); (B) peso de mil grãos (PMS) (g); (C) produtividade (kg ha⁻¹) e teor foliar de Si (Si Foliar) (dag kg⁻¹). **, * e ns Significativo a 1 e 5% e não significativo pelo teste de *F*, respectivamente.

Estudos recentes demonstram que a aplicação de silício (Si) em *Phaseolus vulgaris* L. promove benefícios agrônômicos significativos, incluindo maior tolerância a estresses abióticos, como déficit hídrico, e maior resistência a patógenos (Dan Tatagiba et al., 2024b; Epifanio de Toledo; Junqueira Pires; Carlos Mohn Nogueira, 2021; Menegale et al., 2015). De acordo com essas investigações, a suplementação com Si incrementa a produtividade do feijoeiro mediante a otimização da arquitetura foliar, reduzindo o autossombreamento e, conseqüentemente, potencializando a eficiência fotossintética. O aumento da eficiência fotossintética explica a maior produção de vagens (Figura 5 C). Além disso, o Si atua como um agente mitigador de perdas pós-colheita, uma vez que sua aplicação diminui o contato direto das vagens com o solo, reduzindo a incidência de doenças fúngicas e bacterianas (CRUSCIOL et al., 2013). Considerando que o feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) não é uma espécie considerada acumuladora de silício e que os efeitos observados estão associados a resíduos do Si aplicado previamente na cultura do arroz (*Oryza sativa* L.) – uma espécie acumuladora com elevada capacidade de extração desse elemento do solo. Assim, os resultados sugerem que o solo apresentou baixa disponibilidade de Si após a colheita do arroz, conforme quantificado em análises pós-colheita. Diante disso, hipotetiza-se que um novo estudo, envolvendo a reaplicação de silício em diferentes doses no feijoeiro, possa elucidar a relação dose-resposta dessa cultura ao Si, com potencial ajuste a um modelo de regressão quadrática para determinação da dose ótima de aplicação.

Os teores de Si no solo após os cultivos não apresentaram diferenças significativas e não se ajustaram a modelos matemáticos em relação as doses de silício. As concentrações médias de Si no solo (média \pm erro) após a colheita do arroz (*Oryza sativa* L.) foram de $5,65 \pm 0,1413 \text{ mg kg}^{-1}$, enquanto após a colheita do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), os valores foram de $7,17 \pm 0,2699 \text{ mg kg}^{-1}$.

Observou-se maior teor de Si no solo após o cultivo do feijão em comparação ao arroz, padrão que se repetiu no tecido foliar (Figura 5 E) e (Figura 9 D), onde o feijão exibiu maior concentração de Si em relação ao arroz. Esse fenômeno pode ser atribuído à baixa solubilidade da wollastonita (CaSiO_3), que libera Si no solo de forma gradual resultando em maior disponibilidade do elemento no período correspondente ao cultivo do feijoeiro (Dey; Boldt; Bugbee, 2023).

A diferença na acumulação de Si entre as culturas pode ser atribuída, em parte, ao estágio fenológico no momento da aplicação. No arroz (*Oryza sativa* L.), a adubação silicatada foi realizada durante o estágio inicial de perfilhamento (fase R1), enquanto no feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), o Si esteve disponível desde a emergência (fase V0). Essa diferença temporal resultou em um período prolongado de exposição e absorção pelo feijoeiro.

5 CONCLUSÕES

Com o estudo pode se concluir que a wollastonita:

- No arroz aumenta os teores de clorofila *a* até 117 kg ha⁻¹ de Si, seguido de redução, enquanto clorofila *b* e total diminuíram linearmente, indicando maior eficiência na absorção de luz;
- No arroz, também, houve melhora a eficiência fotoquímica operacional (Φ_{Op}) e reduziu o *quenching* não fotoquímico (NPQ), sugerindo menor perda de energia como calor e maior transporte de elétrons;
- A aplicação de Si aumentou o número de espiguetas (19%) e a produtividade (10,5%) do arroz, com a dose ótima de 100 kg ha⁻¹ e
- O efeito residual da wollastonita no feijoeiro reduziu os pigmentos fotossintéticos (ChlA, ChlB, ChlT) até 230 kg ha⁻¹, mas aumentou a produtividade (34,7%) e a eficiência fotoquímica máxima (Φ_{MAX}).

6 BIBLIOGRAFIA CITADA

AGARIE, Sakae *et al.* Effects of silicon on transpiration and leaf conductance in rice plants (*Oryza saliva* L.). **Plant Production Science**, v. 1, n. 2, p. 89–95, 1998.

AHAMMED, Golam Jalal; YANG, Youxin. Mechanisms of silicon-induced fungal disease resistance in plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 165, p. 200–206, 1 ago. 2021.

ALVARES, Clayton Alcarde. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

ANCHONDO-PÁEZ, Julio C. *et al.* Photosynthetic Gas Exchange and Nitrogen Assimilation in Green Bean Plants Supplied with Two Sources of Silicon. **Phyton**, v. 93, n. 5, p. 963–980, 1 maio 2024.

ATENCIO, Randy; GOEBEL, François Régis; GUERRA, Abby. Effect of Silicon and Nitrogen on *Diatraea tabernella* Dyar in Sugarcane in Panama. **Sugar Tech**, v. 21, n. 1, p. 113–121, 13 fev. 2019.

ÁVILA, Fabrício William *et al.* Interação entre silício e nitrogênio em arroz cultivado sob solução nutritiva. **Revista Ciência Agronômica**, v. 41, n. 2, p. 184–190, 2010.

BARBER, James; ANDERSSON, Bertil. Too much of a good thing: light can be bad for photosynthesis. **Trends in Biochemical Sciences**, v. 17, n. 2, p. 61–66, 1 fev. 1992.

BASAGLI, Marco A. B. *et al.* Efeito da aplicação de silicato de sódio na resistência de plantas de trigo ao pulgão-verde *schizaphis graminum* (Rond.) (Hemiptera: Aphididae). **Neotropical Entomology**, v. 32, n. 4, p. 659–663, 2003.

BASSI, Roberto; DALL'OSTO, Luca. Dissipation of Light Energy Absorbed in Excess: The Molecular Mechanisms. **Annual Review of Plant Biology**, v. 72, n. Volume 72, 2021, p. 47–76, 17 jun. 2021.

BASSINELLO, Priscila Zaczuk. Qualidade Nutricional, Funcional e Tecnológica do Feijão/Nutritional, Functional and Technological Quality of Beans. *In*: KLUTHCOUSKI, J.; STONE, L. F.; AIDAR, H. (Orgs.). **Fundamentos para uma agricultura sustentável, com ênfase na cultura do feijoeiro**. Santo Antônio de Goiás, GO: EMBRAPA Rice and Beans, 2009. p. 383–424.

BOER, C. A.; SAMPAIO, M. V.; PEREIRA, H. S. Silicon-mediated and constitutive resistance to *Rhopalosiphum maidis* (Hemiptera: Aphididae) in corn hybrids. **Bulletin of Entomological Research**, v. 109, n. 3, p. 356–364, 1 jun. 2019.

CAMARGO, Joelma Melissa Malherbe *et al.* INTERAÇÃO SILÍCIO E INSETOS-PRAGA: DEFESA MECÂNICA OU QUÍMICA? **BRAZILIAN JOURNAL OF AGRICULTURE - Revista de Agricultura**, v. 86, n. 1, p. 62, 4 out. 2013.

CAO, Bi li; MA, Qiang; XU, Kun. Silicon restrains drought-induced ROS accumulation by promoting energy dissipation in leaves of tomato. **Protoplasma**, v. 257, n. 2, p. 537–547, 1 mar. 2020.

CARVALHO, Sérgio P.; MORAES, Jair C.; CARVALHO, Janice G. Efeito do silício na resistência do sorgo (*Sorghum bicolor*) ao pulgão-verde *Schizaphis graminum* (Rond.) (Homoptera: Aphididae). **Anais da Sociedade Entomológica do Brasil**, v. 28, n. 3, p. 505–510, set. 1999.

CHAIWONG, Nanthana *et al.* Silicon Application Promotes Productivity, Silicon Accumulation and Upregulates Silicon Transporter Gene Expression in Rice. **Plants 2022, Vol. 11, Page 989**, v. 11, n. 7, p. 989, 5 abr. 2022.

CONAB. **Brazilian National Supply Company (CONAB) - Grain production for 2024/25 is estimated at 322.3 million tons, with favorable weather conditions for first-season crops**. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5895-producao-de-graos-2024-25-e-estimada-em-322-3-milhoes-de-toneladas-com-clima-favoravel-para-as-culturas-de-1-safra>>. Acesso em: 23 mar. 2025.

CRUSCIOL, Carlos Alexandre Costa *et al.* Aplicação foliar de ácido silícico estabilizado na soja, feijão e amendoim. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 2, p. 404–410, 2013.

DAN TATAGIBA, Sandro *et al.* Uso do silício no crescimento e produção do feijoeiro submetido a diferentes condições hídricas. **Scientific Electronic Archives**, v. 17, n. 3, 30 abr. 2024a.

DAN TATAGIBA, Sandro *et al.* Uso do silício no crescimento e produção do feijoeiro submetido a diferentes condições hídricas. **Scientific Electronic Archives**, v. 17, n. 3, 30 abr. 2024b.

DAN TATAGIBA, Sandro; PELOSO, Anelisa de Figueiredo; RODRIGUES, Fabrício Ávila. O SILÍCIO POTENCIALIZA O DESEMPENHO FOTOQUÍMICO EM FOLHAS DE ARROZ. **Revista Univap**, v. 22, n. 40, p. 750–750, 13 abr. 2016.

DATNOFF, L. E.; DEREN, C. W.; SNYDER, G. H. Silicon fertilization for disease management of rice in Florida. **Crop Protection**, v. 16, n. 6, p. 525–531, 1 set. 1997.

DE CAMARGO, Mônica Sartori; KORNDÖRFER, Gaspar Henrique; WYLER, Patricia. Silicate fertilization of sugarcane cultivated in tropical soils. **Field Crops Research**, v. 167, p. 64–75, 1 out. 2014.

DE CAMARGO, Mônica Sartori; ROCHA, Gabriela; KORNDÖRFER, Gaspar Henrique. Silicate fertilization of tropical soils: silicon availability and recovery index of sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 5, p. 1267–1275, 2013.

DE CARVALHO, Ricardo Cruz *et al.* Using Chlorophyll a Fluorescence Imaging to Select Desiccation-Tolerant Native Moss Species for Water-Sustainable Green Roofs. **Water** 2020, Vol. 12, Page 1748, v. 12, n. 6, p. 1748, 19 jun. 2020.

DE OLIVEIRA, Reinaldo Silva *et al.* Silicon amendments reduce aphid numbers and improve yield of aphid-resistant and susceptible wheat cultivars in a dose-dependent manner. **Crop Protection**, v. 172, p. 106296, 1 out. 2023.

DE TOLEDO, Cristian Epifanio; PIRES, Gabriel Junqueira; NOGUEIRA, João Carlos Mohn. Influence of silicon application on black bean agronomic characteristics. **Journal of Plant Nutrition**, v. 44, n. 14, p. 2138–2145, 2021.

DEBONA, Daniel; RODRIGUES, Fabrício A.; DATNOFF, Lawrence E. Silicon's Role in Abiotic and Biotic Plant Stresses. **Annual review of phytopathology**, v. 55, p. 85–107, 4 ago. 2017.

DEMMIG-ADAMS, Barbara; ADAMS, William W. Photoprotection in an ecological context: The remarkable complexity of thermal energy dissipation. **New Phytologist**, v. 172, n. 1, p. 11–21, 1 out. 2006.

DETMANN, Kelly C. *et al.* Silicon nutrition increases grain yield, which, in turn, exerts a feed-forward stimulation of photosynthetic rates via enhanced mesophyll conductance and alters primary metabolism in rice. **New Phytologist**, v. 196, n. 3, p. 752–762, 1 nov. 2012.

DEUS, Angélica Cristina Fernandes *et al.* Nutrient accumulation and biomass production of alfafa after soil amendment with silicates. **Revista Ceres**, v. 61, n. 3, p. 406–413, 2014.

DEY, Mackenzie G.; BOLDT, Jennifer K.; BUGBEE, Bruce. Dissolution of Silicon from Soilless Substrates and Additives. **HortScience**, v. 58, n. 11, p. 1282–1290, 1 nov. 2023.

DOS SANTOS SARAH, Marcilene Machado *et al.* Silicon supplied via foliar application and root to attenuate potassium deficiency in common bean plants. **Scientific Reports**, v. 11, n. 1, 1 dez. 2021.

DUDHAIYA, Aashvi *et al.* Characterization of Physically Fractionated Wollastonite-Amended Agricultural Soils. **Minerals** **2019**, Vol. **9**, Page **635**, v. 9, n. 10, p. 635, 16 out. 2019.

ELLIOTT, C. L.; SNYDER, George H. Autoclave-Induced Digestion for the Colorimetric Determination of Silicon in Rice Straw. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 39, n. 6, p. 1118–1119, 1 jun. 1991.

EPIFANIO DE TOLEDO, Cristian; JUNQUEIRA PIRES, Gabriel; CARLOS MOHN NOGUEIRA, João. Journal of Plant Nutrition Influence of silicon application on black bean agronomic characteristics. 2021.

FERREIRA, Eric Batista; CAVALCANTI, Portya Piscitelli; NOGUEIRA, Dnismar Alves. **ExpDes.pt: Pacote Experimental Designs (Portugues). R package version 1.2.1./ExpDes.pt: Experimental Designs Package (Portuguese Version)**.

GONZALEZ-PORRAS, Carlos Vital *et al.* Silicon via fertigation with and without potassium application, improve physiological aspects of common beans cultivated under three water regimes in field. **Scientific Reports**, v. 14, n. 1, 1 dez. 2024.

GOUSSAIN, Marcio M.; PRADO, Ernesto; MORAES, Jair C. Efeito do silício, aplicado em plantas de trigo, na biologia e comportamento alimentar do pulgão-verde *Schizaphis graminum* (Rond.) (Hemiptera: Aphididae). **Neotropical Entomology**, v. 34, n. 5, p. 807–813, 2005.

HANGX, Suzanne J. T.; SPIERS, Christopher J. Coastal spreading of olivine to control atmospheric CO₂ concentrations: A critical analysis of viability. **International Journal of Greenhouse Gas Control**, v. 3, n. 6, p. 757–767, 1 dez. 2009.

HAQUE, Fatima; CHIANG, Yi Wai; SANTOS, Rafael M. Alkaline Mineral Soil Amendment: A Climate Change ‘Stabilization Wedge’? **Energies** **2019**, Vol. **12**, Page **2299**, v. 12, n. 12, p. 2299, 16 jun. 2019.

HARTLEY, Susan E.; DEGABRIEL, Jane L. The ecology of herbivore-induced silicon defences in grasses. **Functional Ecology**, v. 30, n. 8, p. 1311–1322, 1 ago. 2016.

HAYNES, Richard J. A contemporary overview of silicon availability in agricultural soils. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 177, n. 6, p. 831–844, 1 dez. 2014.

HUANG, Sihua *et al.* Silicon in soil and its interaction with nitrogen, phosphorus, and potassium nutrients on rice yield: A case study of paddy fields in the Taihu Lake region, China, without a history of silicon fertilization. **Soil and Tillage Research**, v. 238, 1 maio 2024.

INMET. **Banco de Dados do Instituto Nacional de Meteorologia do Brasil**. Disponível em: <<https://bdmep.inmet.gov.br/>>. Acesso em: 7 jul. 2021.

JEER, M. *et al.* Soil application of silicon reduces yellow stem borer, *Scirpophaga incertulas* (Walker) damage in rice. **Journal of Applied Entomology**, v. 141, n. 3, p. 189–201, 1 abr. 2017.

JIANG, Dexing *et al.* Silicon alleviates aluminum-induced inhibition of photosynthetic and growth attributes in rice by modulating competitive pathways between ethylene and polyamines and activating antioxidant defense. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 222, p. 109785, 1 maio 2025.

JIANG, Hao *et al.* Silicon nutrition improves the quality and yield of rice under dry cultivation. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 104, n. 4, p. 1897–1908, 15 mar. 2024.

KORNDÖRFER, G. K.; DATNOFF, L. E.; CORRÊA, G. F. Influence of silicon on grain discoloration and upland rice grown on four savanna soils of Brazil. **Journal of Plant Nutrition**, v. 22, n. 1, p. 93–102, 1999.

KRAMER, David M. *et al.* New fluorescence parameters for the determination of QA redox state and excitation energy fluxes. **Photosynthesis Research**, v. 79, n. 2, p. 209–218, 2004.

LAIFA, Israa *et al.* Silicon (Si) Treatment has Preferential Beneficial Effects on Photosystem I Photochemistry in Salt-Treated *Hordeum marinum* (Huds.) Plants. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 23, n. 3, p. 3232–3248, 1 set. 2023.

LAVINSKY, Alyne O. *et al.* Silicon improves rice grain yield and photosynthesis specifically when supplied during the reproductive growth stage. **Journal of plant physiology**, v. 206, p. 125–132, 1 nov. 2016.

LENZ, Giuvan *et al.* Escala diagramática para avaliação de severidade de mancha-parda em arroz. **Ciência Rural**, v. 40, n. 4, p. 752–758, 2010.

MA, Jian Feng; YAMAJI, Naoki; MITANI-UENO, Namiki. Transport of silicon from roots to panicles in plants. **Proceedings of the Japan Academy. Series B, Physical and biological sciences**, v. 87, n. 7, p. 377–385, 2011.

MAUAD, Munir *et al.* Nitrogen and silicon fertilization of upland rice. **Scientia Agricola**, v. 60, n. 4, p. 761–765, 1 out. 2003.

MENEGALE, Marcella *et al.* **SILÍCIO: INTERAÇÃO COM O SISTEMA SOLO-PLANTA**. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/282008661>>.

MOOSDORF, Nils; RENFORTH, Phil; HARTMANN, Jens. Carbon dioxide efficiency of terrestrial enhanced weathering. **Environmental Science and Technology**, v. 48, n. 9, p. 4809–4816, 6 maio 2014.

MOURA ALTAIR DIAS; BRITO LÉLIS MAIA. Aspectos Socioeconômicos/Socio-economic aspects. *In*: CARNEIRO, José Eustáquio; PAULA JUNIOR, Trazilbo José; BORÉM, Aluizio (Orgs.). **Feijão: do plantio à colheita/Beans: from sowing to harvesting**. Viçosa- MG: Editora UFV, 2015. p. 16–36.

MUKARRAM, Mohammad *et al.* Silicon nanoparticles in higher plants: Uptake, action, stress tolerance, and crosstalk with phytohormones, antioxidants, and other signalling molecules. **Environmental pollution**, v. 310, 1 out. 2022.

OSUNA-CANIZALEZ, F. J.; DE DATTA, S. K.; BONMAN, J. M. Nitrogen form and silicon nutrition effects on resistance to blast disease of rice. **Plant and Soil**, v. 135, n. 2, p. 223–231, ago. 1991.

OXBOROUGH, Kevin. Using Chlorophyll a Fluorescence Imaging to Monitor Photosynthetic Performance. **Chlorophyll a Fluorescence**, p. 409–428, 10 nov. 2004.

PEIXOTO, Rodrigo. **EMBRAPA: Arroz de terras altas é usado para diversificar produção de grãos no Cerrado / Upland rice is used to diversify grain production in the Cerrado**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/69010963/arroz-de-terras-altas-e-usado-para-diversificar-producao-de-graos-no-cerrado>>. Acesso em: 23 mar. 2025.

PEREIRA, Helton Santos *et al.* Influência do ambiente em cultivares de feijoeiro-comum em cerrado com baixa altitude. **Bragantia**, v. 71, n. 2, p. 165–172, 2012.

PEREIRA, Talitha Soares *et al.* Silicon deposition in roots minimizes the cadmium accumulation and oxidative stress in leaves of cowpea plants. **Physiology and Molecular Biology of Plants**, v. 24, n. 1, p. 99–114, 1 fev. 2018.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>. Acesso em: 14 maio. 2024.

RASTOGI, Anshu *et al.* Does silicon really matter for the photosynthetic machinery in plants...? **Plant physiology and biochemistry : PPB**, v. 169, p. 40–48, 1 dez. 2021.

RODRIGUES, Fabrício A.; DATNOFF, Lawrence E. Silicon and rice disease management. **Fitopatologia Brasileira**, v. 30, n. 5, p. 457–469, out. 2005.

ROHÁČEK, K. Chlorophyll fluorescence parameters: The definitions, photosynthetic meaning, and mutual relationships. **Photosynthetica**, v. 40, n. 1, p. 13–29, 2002.

RUBAN, Alexander V.; MURCHIE, Erik H. Assessing the photoprotective effectiveness of non-photochemical chlorophyll fluorescence quenching: A new approach. **Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Bioenergetics**, v. 1817, n. 7, p. 977–982, 1 jul. 2012.

SÁNCHEZ-REINOSO, Alefsi David; LIGARRETO-MORENO, Gustavo Adolfo; RESTREPO-DÍAZ, Hermann. Chlorophyll α Fluorescence Parameters as an Indicator to Identify Drought Susceptibility in Common Bush Bean. **Agronomy 2019, Vol. 9, Page 526**, v. 9, n. 9, p. 526, 9 set. 2019.

SANTOS, Gil Rodrigues Dos *et al.* ADUBAÇÃO COM SILÍCIO: INFLUÊNCIA SOBRE AS PRINCIPAIS DOENÇAS E SOBRE PRODUTIVIDADE DO ARROZ IRRIGADO POR INUNDAÇÃO / SILICON FERTILIZATION: ITS INFLUENCE ON SOME OF THE MOST IMPORTANT DISEASES AND YIELD OF FLOODEDRICE CROP. **Revista Ceres**, v. 50, n. 287, 2003.

SANTOS, H. G. dos *et al.* **Brazilian Soil Classification System. - Portal Embrapa**. 5th. ed. Brasília-DF: EMBRAPA, 2018.

SANTOS, Humberto Gonçalves dos *et al.* **O Novo Mapa de Solos do Brasil Legenda Atualizada**. Documentos 130 ed. Rio de Janeiro, RJ: Embrapa Solos, 2011.

SANTOS, João Bosco *et al.* Botânica/Botany. *In*: CARNEIRO, José Eustáquio; PAULA JUNIOR, Trazilbo José de; BORÉM, Aluizio (Orgs.). **Feijão: do plantio a colheita/Beans: from sowing to harvesting**. Viçosa -MG: Editora UFV, 2015. p. 37–66.

SATHE, Atul Prakash *et al.* Role of silicon in elevating resistance against sheath blight and blast diseases in rice (*Oryza sativa* L.). **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 166, p. 128–139, 1 set. 2021.

SAVANT, N. K.; SNYDER, G. H.; DATNOFF, L. E. Silicon Management and Sustainable Rice Production. **Advances in Agronomy**, v. 58, n. C, p. 151–199, 1 jan. 1996.

SHI, Yafei *et al.* Plants response to light stress. **Journal of Genetics and Genomics**, v. 49, n. 8, p. 735–747, 1 ago. 2022.

SILVA, Fábio Cesar da. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2a Edição ed. Brasília-DF: EMBRAPA Informações Tecnológicas, 2009.

SILVA, Osmira Fatima da; WANDER, Alcido Elenor. **EMBRAPA Arroz: Estatística de produção**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/arroz/pre-producao/socioeconomia/estatistica-de-producao>>. Acesso em: 23 mar. 2025.

SOBRINHO, Lopes *et al.* Balanço hídrico climatológico mensal e classificação climática de Köppen e Thornthwaite para o município de Rio Verde, Goiás. **Brazilian Journal of Climatology**, v. 27, p. 19, 2020.

Solos Goiás. Disponível em: <<https://goias.gov.br/imb/mapeamento-desolos-1250-000/>>. Acesso em: 16 abr. 2024.

STRASSER, R. J.; SRIVASTAVA, A.; TSIMILLI-MICHAEL, M. The fluorescence transient as a tool to characterize and screen photosynthetic samples. *In*: YUNUS, M.; PATHRE, U.; MOHANTY, P. (Orgs.). **Probing Photosynthesis: Mechanism, Regulation & Adaptation**. Boca Raton, FL: CRC Press/Taylor & Francia Group, LLC, 2000. p. 445–483.

STRASSER, Reto J.; TSIMILLI-MICHAEL, Merope; SRIVASTAVA, Alaka. Analysis of the Chlorophyll a Fluorescence Transient. p. 321–362, 2004.

SUN, Xing *et al.* Silicon Fertilizer Application Promotes Phytolith Accumulation in Rice Plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 10, 16 abr. 2019.

TAIZ, Lincoln *et al.* **Plant Physiology and Development**. 6nd. ed. Sunderland: Sinauer Associates, 2017.

TAO-WEN, PAN *et al.* Effect of Nitrogen and Silicon Fertilizer on Plant Nutrient Content, Yield and Quality of High Quality Rice. **Journal of Ecology and Rural Environment**, 2021, Vol. 37, Issue 1, Pages: 120-126, v. 37, n. 1, p. 120–126, 25 jan. 2021.

THE NATIONAL SUPPLY COMPANY/BRAZIL (CONAB). **ACOMPANHAMENTO DA SAFRA BRASILEIRA: Grãos Safra 2024/25 4º Levantamento**. Brasília: [S.n.].

TREJO-TÉLLEZ, Libia Iris *et al.* Silicon induces hormetic dose-response effects on growth and concentrations of chlorophylls, amino acids and sugars in pepper plants during the early developmental stage. **PeerJ**, v. 8, n. 6, 2020.

WALTER, Melissa; MARCHEZAN, Enio; DE AVILA, Luis Antonio. Arroz: composição e características nutricionais. **Ciência Rural**, v. 38, n. 4, p. 1184–1192, 2008.

YAMAJI, Naoki; MITATNI, Namiki; JIAN, Feng Ma. A Transporter Regulating Silicon Distribution in Rice Shoots. **The Plant Cell**, v. 20, n. 5, p. 1381–1389, 30 jun. 2008.