

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CÂMPUS DE CHAPADÃO DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

ANA CAROLINA SALES

**SILÍCIO MITIGA ESTRESSE POR DEFICIÊNCIA NUTRICIONAL EM PLANTAS
DE QUINOA (*Chenopodium quinoa* Willd.)**

CHAPADÃO DO SUL – MS

2021

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
CÂMPUS DE CHAPADÃO DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

ANA CAROLINA SALES

**SILÍCIO MITIGA ESTRESSE POR DEFICIÊNCIA NUTRICIONAL EM PLANTAS
DE QUINOA (*Chenopodium quinoa* Willd.)**

Orientador: Prof. Dr. Cid Naudi Silva Campos

Coorientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Agronomia, área de concentração: Produção Vegetal.

CHAPADÃO DO SUL – MS

2021

08/03/2021

SEIUFMS - 2402403 - Certificado



Serviço Público Federal
Ministério da Educação
Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

DISCENTE: Ana Carolina Sales

ORIENTADOR: Dr. Cid Naudi Silva Campos

TÍTULO: Silício mitiga estresse por deficiência nutricional em plantas de quinoa (*Chenopodium quinoa Willd*)

AVALIADORES:

Prof. Dr. Presidente Cid Naudi Silva Campos

Profa. Dra. Larissa Pereira Ribeiro Teodoro

Prof. Dr. Rafael Ferreira Barreto

Chapadão do Sul, 24 de fevereiro de 2021.



Documento assinado eletronicamente por Rafael Ferreira Barreto, Professor do Magisterio Superior - Substituto, em 24/02/2021, às 16:42, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por Larissa Pereira Ribeiro, Professor do Magisterio Superior, em 24/02/2021, às 16:54, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por Cid Naudi Silva Campos, Professor do Magisterio Superior, em 24/02/2021, às 17:00, conforme horário oficial de Mato Grosso do Sul, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho primeiramente a Deus e a minha mãe, Gildete Ramos Sales por todo amor, amizade, apoio, incentivo e dedicação comigo durante toda minha jornada.

Dedico!

AGRADECIMENTO

A Deus por me permitir errar, aprender e crescer, por ser meu sustento em busca de mais um sonho, pelo amor e fazer acreditar que eu nunca estive só nessa caminhada.

À minha Mãe, Gildete Ramos Sales por sempre me apoiar, compreender e ajudar em todos os momentos, pela motivação incondicional.

Ao meu companheiro Evandro de Souza Almeida, por todo tempo de companheirismo, amizade, respeito e aprendizado um com o outro. Obrigada por sempre incentivar minhas escolhas para ser uma pessoa melhor.

Ao professor e orientador Cid Naudi Silva Campos, obrigada por acreditar no meu potencial, por ter sido um excelente profissional que ensina e repreende quando necessário. Obrigada pela sabedoria e suporte transmitido durante todo esse tempo.

Ao professor e coorientador Renato de Mello Prado, por ser exemplo e pelos ensinamentos prestados durante meus dias na “Universidade Estadual Paulista” Câmpus de Jaboticabal.

Aos meus amigos, Ariane de Andréa Pantaleão, Pamella Mingotti Dias, Priscilla Liber, pelo companheirismo e aprendizado durante a caminhada de estudos do mestrado. E a todos os outros colegas, especialmente, os que ingressaram juntamente comigo no processo seletivo do mestrado, pelas trocas de experiências e compartilhamento de aprendizado.

À Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, ao corpo docente do Programa de Pós-graduação em Agronomia, pela excelência e oportunidade de ter aprendido com cada um com quem tive as disciplinas. Aos demais profissionais que trabalham nesta instituição, pelas orientações e amizades.

Agradeço ao Grupo de Estudos do Cerrado em Nutrição de Plantas (GECENP) pela parceria e contribuição na execução dos experimentos.

À Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS) e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia – área de concentração Produção Vegetal, pela excelência e oportunidade de prosseguir meus estudos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de mestrado e Bolsa PROCAD.

A todos que de alguma forma contribuíram com carinho, atenção, amizade, apoio e incentivo para a conclusão desta importante etapa da minha vida. Deixo aqui meus sinceros e eternos agradecimentos.

Agradeço!

EPÍGRAFE

*“O meu socorro vem do **Senhor**, que fez os céus e a terra. **Ele** não permitirá que você tropece; o seu protetor se manterá alerta, sim, o protetor de Israel não dormirá; **ele está sempre alerta!** ”*

Salmos 121:2-4

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Temperatura mínima, máxima (°C) e umidade relativa do ar (%) registrados com uso de termo higrômetro durante o período experimental no interior da casa de vegetação.....15
- Figura 2.** Representação esquemática do projeto experimental. Após a germinação das sementes, as mudas foram cultivadas em diferentes forças iônicas da solução de Hoagland e Arnon (1950).....16
- Figura 3.** Sintomatologia de plantas de quinoa submetida à solução completa e omissão nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) na ausência e na presença de Si, (a) Solução completa, (b) omissão de nitrogênio, (c) omissão de fósforo, (d) omissão de potássio, (e) omissão de cálcio, (f) omissão de magnésio, (g) folhas de quinoa sob omissão de potássio, (h) inflorescência de quinoa sob omissão de cálcio, (i) comparação dos sintomas dos nutrientes em folhas de quinoa.....19
- Figura 4.** Acúmulo de nutrientes de plantas de quinoa sob solução completa e omissão de N, P, K, Ca e Mg na ausência (-Si) e presença de silício (+Si), (a) acúmulo de N, (b) média de acúmulo de P, (c) acúmulo de K, (d) acúmulo de Ca, (e) acúmulo de Mg e (f) acúmulo de Si. Letras minúsculas iguais demonstram semelhança entre os tratamentos com omissão e o completo, pelo teste de Tukey. Letras maiúsculas iguais demonstram semelhança entre os tratamentos (-Si) e (+Si), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade21
- Figura 5.** (a) Índice de coloração verde (ICV), (b) clorofila total e (c) carotenoides de plantas de quinoa sob omissão de N, P, K, Ca e Mg na ausência (-Si) e presença de silício (+Si). Letras minúsculas iguais demonstram semelhança entre os tratamentos com omissão e o completo, pelo teste de Tukey. Letras maiúsculas iguais demonstram semelhança entre os tratamentos (-Si) e (+Si), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.....22

Figura 6. Índice de vazamento de eletrólitos de plantas de quinoa sob solução completa e omissão de N, P, K, Ca e Mg na ausência (-Si) e presença de silício (+Si). Letras minúsculas iguais demonstram semelhança entre os tratamentos com omissão e o completo, pelo teste de Tukey. Letras maiúsculas iguais demonstram semelhança entre os tratamentos (-Si) e (+Si), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.....23

Figura 7. (a) Fluorescência inicial (F0), (b) médias de fluorescência máxima (Fm), (c) rendimento quântico basal do fotossistema II e (d) médias de eficiência do fotossistema II de plantas de quinoa sob omissão de N, P, K, Ca e Mg na ausência (-Si) e presença de silício (+Si). Letras minúsculas iguais demonstram semelhança entre os tratamentos com omissão e o completo, pelo teste de Tukey. Letras maiúsculas iguais demonstram semelhança entre os tratamentos (-Si) e (+Si), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.....24

Figura 8. Produção de biomassa de plantas de quinoa submetidas à solução completa e omissão de N, P, K, Ca e Mg na ausência (-Si) e presença de silício (+Si), (a) Área foliar, (b) massa seca da parte aérea e radicular. Letras minúsculas iguais demonstram semelhança entre os tratamentos com omissão e o completo, pelo teste de Tukey. Letras maiúsculas iguais demonstram semelhança entre os tratamentos (-Si) e (+Si), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.....26

Figura 9. Heatmap construído para demonstrar a relação entre tratamentos e variáveis avaliadas.....34

SILÍCIO MITIGA ESTRESSE POR DEFICIÊNCIA NUTRICIONAL EM PLANTAS DE QUINOA (*Chenopodium quinoa* Willd.)

RESUMO

A deficiência nutricional é comum em diversas regiões de cultivo da quinoa. O silício (Si) pode atenuar o estresse ocasionado pela deficiência nutricional, no entanto, estudos com uso do Si mitigando estresse por desordem nutricional em plantas de quinoa ainda são incipientes na literatura. Desta maneira, objetivou-se avaliar a nutrição, fisiologia, sintomatologia visual e a biomassa das plantas de quinoa submetidas ao estresse por deficiência de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) na ausência e presença de Si. O experimento foi constituído por um esquema fatorial 6 x 2, sendo solução completa (SC), -N, -P, -K, -Ca, -Mg combinado com ausência e presença de Si (1,5 mmol L⁻¹). Foram realizadas avaliações nutricionais, fisiológicas, sintomatologia visual e a biomassa das plantas de quinoa. A deficiência de N, P, K, Ca e Mg no cultivo de quinoa causou sintomas visuais característicos da deficiência nutricional dos respectivos nutrientes e consequentemente diminuiu a massa seca das plantas. No entanto, o fornecimento de Si atenuou os efeitos da deficiência por preservar o aparato fotossintético, por promover diminuição da degradação de clorofila e aumentar a integridade da membrana, diminuindo o vazamento de eletrólitos. Desta forma, a aplicação de Si atenuou os efeitos visuais, fisiológicos e nutricionais da deficiência em todos os tratamentos, a deficiência de N, P, K, e Mg afetou o aparato fotossintético de plantas de quinoa, no entanto, a adição de Si na restrição de P, preservou o aparato de fotossintético. A presença de Si, na restrição de Ca, mitigou os efeitos deletérios do estresse, por maior síntese e proteção de clorofilas. Para N e Ca, a presença de Si diminuiu os danos à parede celular pelo menor vazamento de eletrólitos e consequentemente aumentou massa seca das plantas de quinoa. E por fim, essa pesquisa evidenciou importantes resultados que estão relacionados aos efeitos do Si na mitigação de estresse, causados por deficiências nutricionais, os resultados obtidos são inéditos e servirão para futuras pesquisas, sobre o uso do Si minimizando os efeitos deletérios das desordens nutricionais em plantas de quinoa.

Palavras-chave: Elemento benéfico; desordem nutricional; fisiologia vegetal; silicato de sódio.

SILICON MITIGATES NUTRITIONAL STRESS IN QUINOA (*Chenopodium quinoa* Willd.)

ABSTRACT

Nutritional deficiency is common in several regions of quinoa cultivation. Silicon (Si) can attenuate the stress caused by nutritional deficiency, but studies on the effects of Si supply on quinoa plants are still scarce. Given this scenario, our objective was to evaluate the symptoms in terms of tissue, physiological and nutritional effects of quinoa plants submitted to nitrogen (N), phosphorus (P), potassium (K), calcium (Ca), and magnesium (Mg) deficiencies under Si presence. The experiment consisted of a factorial scheme 6 x 2, using a complete solution (CS), -N, -P, -K, -Ca, -Mg combined with absence and presence of Si (1.5 mmol L⁻¹). Symptomatic, physiological, nutritional and yield evaluations were performed in quinoa crop. The deficiencies of N, P, K, Ca and Mg in quinoa cultivation caused visual symptoms characteristic of the deficiency caused by respective nutrients, hence decreasing the plant dry mass. However, Si supply attenuated the deficiency effects by preserving the photosynthetic apparatus, increasing the chlorophyll production, increasing the membrane integrity, and decreasing the electrolyte leakage. Thus, the Si supply attenuated the visual effects provided by deficiency of all nutrients, but stood out for N and Ca, because it reflected in a higher dry mass production. This occurred because, the Si promoted higher synthesis and protection of chlorophylls, and lower electrolyte leakage under Ca restriction, as well as decreased electrolyte leakage under N restriction.

Keywords: Beneficial element; nutritional disorder; sodium silicate; plant physiology.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	10
MATERIAL E MÉTODOS.....	11
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	15
CONCLUSÕES.....	32
REFERÊNCIAS.....	34

INTRODUÇÃO

A quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) tem ganhado enfoque devido seu alto potencial nutritivo (CHOUKR-ALLAH et al., 2016). Suas sementes apresentam proteínas de alta qualidade, vitaminas, aminoácidos essenciais, com a inclusão de lisina, metionina e treonina, que se apresentam carentes em sementes de leguminosas e cereais (REPO-CARRASCO et al., 2003; KOETH et al., 2013; CARCHIOCHI et al., 2016).

No Brasil existem alguns estudos relacionados ao cultivo de quinoa na região do cerrado brasileiro (SPEHAR et al., 2011), nas condições tropicais (VASCONCELOS et al., 2013), e na região sul do Rio Grande do Sul (SOARES et al., 2014). O seu cultivo pode ser realizado durante a segunda safra ou até mesmo na entressafra (citar).

A principal causa de perdas de rendimento nos sistemas agrícolas são os estresses abióticos (MITTLER, 2006), sendo considerados limitantes da produção (AQUINO et al., 2013). Dentre os estresses abióticos, a desordem nutricional se destaca, pois, a capacidade das plantas absorver elementos depende da sua disponibilidade no solo e as carências de nutrientes podem afetar componentes importantes do metabolismo vegetal (GRUSAK et al., 2016).

Nesse cenário de estresse por desordem nutricional, a aplicação de elementos benéficos como o silício (Si) tem se indicado promissora. Apesar de não ser considerado um nutriente, o Si é responsável por proteger as plantas em condições de estresse abiótico (KURDALI et al., 2018; WALSH et al., 2018; CAMPOS et al., 2020), mas a maioria dos estudos se concentra na atenuação de toxicidade a exemplo do amônio e excesso de nitrato em plantas de pepino (CAMPOS et al., 2016) e de metais, comparado a deficiência nutricional. Os estudos indicando benefício do Si na deficiência nutricional se concentram nas grandes culturas, como na deficiência de nitrogênio em plantas de arroz (DEUS et al., 2019), potássio em plantas de sorgo (CHEN et al., 2016), magnésio em milho (HOSSEINI et al., 2019) e enxofre em cevada (MAILLARD ET AL, 2018).

Aliado ao conhecimento sobre exigência nutricional sabe-se que os nutrientes desempenham funções essenciais e específicas no metabolismo das plantas. Desta maneira, quando um nutriente não está presente em quantidades adequadas, o elemento se torna limitante, promovendo deficiência nas células e alterações metabólicas. Os sintomas de deficiência ou toxicidade geralmente são característicos para cada nutriente, sendo influenciado pela severidade, pela espécie e variedade, além dos fatores ambientais

(COELHO et al., 2002). Contudo, são escassas as pesquisas envolvendo deficiência nutricional na cultura da quinoa, principalmente com aplicação de Si.

O efeito benéfico do Si em plantas sob condições de estresse por deficiência nutricional tem sido atribuído à proteção do sistema fotossintético das plantas (VACULÍKOVA et al., 2014), à diminuição da degradação de clorofilas (JAFAREI et al., 2015), à estimulação de sistemas antioxidantes e a melhoria da integridade física das membranas (VACULÍKOVA et al., 2014), além da maximização da absorção de nutrientes (CHEN et al., 2016; KURDALI et al., 2018; MANTOVANI et al., 2018).

Portanto, surgem as hipóteses que: (i) a deficiência nutricional de macronutrientes resulte em distúrbios fisiológicos e sintomas no nível do tecido em plantas de quinoa de acordo com as funções de cada nutriente no metabolismo da planta, (ii) a aplicação de Si pode mitigar o estresse ocasionado pela deficiência nutricional em plantas de quinoa, por aumentar a absorção do elemento faltante e, principalmente, por aumentar a síntese de pigmentos e por proteger o aparato fotossintético.

Confirmando essas hipóteses, será possível compreender melhor os benefícios do Si na deficiência nutricional e consequentemente aumentar a sustentabilidade dos cultivos da quinoa especialmente cultivada em áreas com baixa fertilidade do solo.

Desta maneira, objetivou-se avaliar a nutrição, fisiologia, sintomatologia visual e a biomassa das plantas de quinoa submetidas ao estresse por deficiência de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) na ausência e presença de Si.

MATERIAL E MÉTODOS

Condições experimental

O experimento foi desenvolvido com plantas de quinoa da cultivar (BRS Piabiru) em casa de vegetação na Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho” - UNESP, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – FCAV, Câmpus de Jaboticabal, com coordenadas 21° 15' 22'' sul, 48° 18' 58'' oeste e altitude de 615 m, entre julho a setembro de 2019. Durante o período experimental a temperatura máxima, mínima e a umidade do ar foram registradas com um termo-higrômetro (Figura 1).

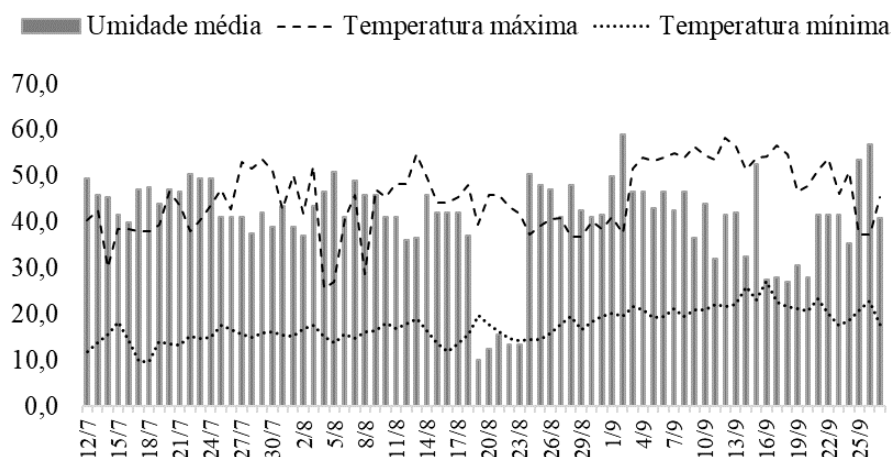


Figura 1. Temperatura mínima, máxima (°C) e umidade relativa do ar (%) registradas com uso de termo-higrômetro durante o período experimental no interior da casa de vegetação.

Houve ampla variação na umidade relativa do ar ($40,9\% \pm 18,9\%$), na temperatura máxima ($45,4 \pm 12,9^{\circ}\text{C}$) e na temperatura mínima ($17,53 \pm 9,6^{\circ}\text{C}$), que atingiu valores acima da temperatura ótima da cultura da quinoa (-4°C e 38°C) (FAO, 2011).

Foi realizada a semeadura em duas bandejas com 128 células (volume de 26,6 mL), contendo como substrato areia lavada (FILHO et al., 2018). Após a semeadura, as sementes foram irrigadas com água destilada até o período de emergência. Em seguida foi realizado o transplântio de seis mudas para vasos de polipropileno com capacidade de $1,7 \text{ dm}^3$ preenchido com $1,5 \text{ dm}^3$ de areia lavada.

Após o transplântio, as plantas foram irrigadas com solução nutritiva completa (HOAGLAND; ARNON, 1950) a 10% da concentração, com modificação na fonte de ferro, de Fe-EDTA para Fe-EDDHMA. O ajuste no valor pH para $5,5 \pm 0,1$ foi realizado com adição da solução NaOH (1 mol L^{-1}) ou HCl (1 mol L^{-1}).

Delineamento experimental

O experimento foi realizado em esquema fatorial 6×2 , sendo: controle (SC= Solução Completa), omissão de N (sendo fornecido 10% do N indicado na solução completa, durante todo o período experimental), P (10% do P indicado para solução completa a partir dos 10 DAT), K, Ca e Mg combinado com a ausência e a presença de Si ($1,5 \text{ mmol L}^{-1}$), dispostos em delineamento em blocos casualizados com nove repetições.

As soluções nutritivas com os tratamentos foram feitas de acordo com Hoagland e Arnon (1950).

Início dos tratamentos e fornecimento do Si

Em 5 DAT, iniciou-se o fornecimento do Si via solução nutritiva completa (Figura 2). A fonte de Si utilizada foi o silicato de sódio ($188,4 \text{ g L}^{-1}$ de Si; 121 g L^{-1} de Na_2O e $\text{pH} = 12$). O Si foi adicionado à água e após ajuste do pH para $5,5 \pm 0,2$ com soluções de HCl ($1,0 \text{ mol L}^{-1}$) ou NaOH ($1,0 \text{ mol L}^{-1}$), após esse processo, preparou-se a solução nutritiva. Foi realizada a aplicação adicional de $49,8 \text{ mg L}^{-1}$ de NaCl nos tratamentos sem Si para equilibrar o Na entre os tratamentos.

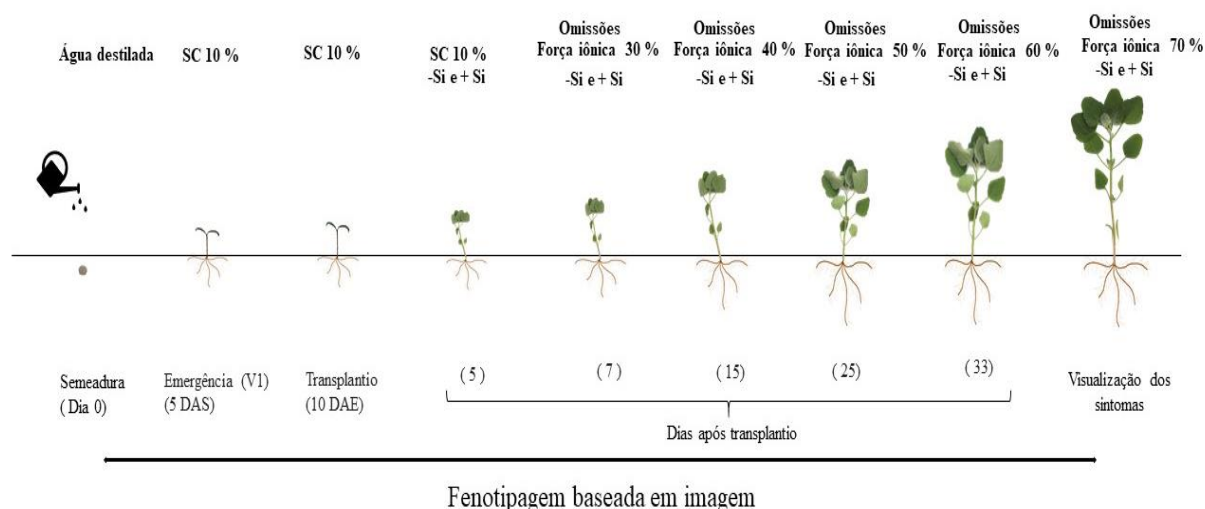


Figura 2. Representação esquemática do projeto experimental. Após a germinação das sementes, as mudas foram cultivadas em diferentes forças iônicas da solução de Hoagland e Arnon (1950). DAS= Dias após sementeira; DAE= Dias após emergência.

Aos 7 DAP, iniciou-se a oitmissão dos nutrientes na solução nutritiva e a concentração foi para 30% da indicada por Hoagland e Arnon (1950) por 7 dias, em seguida para 40% por 10 dias, 50% por 8 dias, 60% por 13 dias e 70% até o final do período experimental.

Uma vez por semana, foi realizada a lavagem do substrato para evitar salinização, sendo fornecida água deionizada, visando drenar o substrato e após duas horas foi aplicada novamente a solução nutritiva.

Tratamentos fitossanitários

Foi realizada a aplicação de inseticida (Thiamethoxam 141 g L^{-1} + Lambdacyhalothrin 106 g L^{-1}) na dosagem de $1,5 \text{ mL L}^{-1}$ aos 38 DAP, para controle de pragas. Além disto, foram realizadas aplicações de acaricida (Fenpiroximato 50 g L^{-1} e Abamectina 18 g L^{-1}) duas vezes por semana a partir dos 40 DAP, até a retirada do experimento, usando a dosagem de 1 mL L^{-1} .

Avaliações

Índice de coloração verde, fluorescência da clorofila, eficiência quântica do fotossistema II e teor de pigmentos

Aos 40 dias de cultivo com 10 dias de início do fornecimento dos tratamentos, os sintomas de deficiência foram caracterizados para restrição de N, P, K e Mg. Aos 60 dias de cultivo com 35 dias do início do fornecimento dos tratamentos, os sintomas foram caracterizados para restrição de Ca. Assim, logo com a caracterização dos sintomas, foram realizadas as avaliações fisiológicas referentes ao índice de coloração verde (ICV), fluorescência e eficiência quântica do fotossistema II (Fv/Fm) e teor de clorofilas e carotenoides.

No quarto folíolo a partir do ápice da haste principal foram mensurados o ICV e o teor de pigmentos. O ICV foi mensurado com um clorofilômetro (Opti-Sciences®, CCM-200, Chlorophyll Meter), sendo realizadas cinco leituras por planta.

Para análise dos pigmentos, foram coletados seis discos foliares (6 mm), obtidos do terço médio do limbo foliar. As análises foram realizadas de acordo com a metodologia proposta por Lichtenthaler (1987), realizando-se leituras nos comprimentos de onda de 663 nm para a clorofila a, 647 nm para a clorofila b e 470 nm para carotenoides, em espectrofotômetro de Beckman DU 640, sendo os teores definidos com base na massa fresca dos discos foliares.

A Fv/Fm foi obtida a partir da medida da fluorescência da clorofila com o auxílio de fluorômetro (Opti-sciences - Os30P). As medidas foram realizadas entre 7h30 e 9h30 em uma planta por vaso, sendo mensurado o terço médio da planta, avaliando-se o quarto folíolo a partir do ápice da haste principal. Para tanto, a região amostrada foi submetida ao escuro para adaptação de no mínimo 30 min antes da excitação do pulso de luz vermelha de 1 s. Os parâmetros avaliados foram: F0 (fluorescência mínima para excitação da clorofila) e Fm (fluorescência máxima para excitação da clorofila). A partir destes parâmetros obteve-se a F0/Fm (rendimento quântico basal) e Fv/Fm (eficiência quântica do fotossistema II).

Índice de vazamento de eletrólitos

Para a determinação do índice de vazamento celular, retirou-se seis discos foliares (6 mm) no terço médio da planta, que apresentava folhas novas, completamente desenvolvidas.

Os discos foram acondicionados em béquer com 20 mL de água deionizada à temperatura ambiente por 2 horas. Após este período, realizou-se a leitura da condutividade elétrica inicial (CE1) utilizando condutivímetro manual (Medidor digital TDS-3). Posteriormente, as amostras foram levadas à autoclave por 20 minutos em temperatura de 121 °C, e após o resfriamento, realizou-se uma nova leitura de condutividade para determinação da condutividade final (CE2). Para estimar o vazamento utilizou-se a fórmula: $EC1/EC2 \times 100$ (DIONISIO-SESE; TOBITA, 1998).

Área foliar e Massa seca

Avaliou-se a área foliar, com a utilização do aparelho Li-Cor, modelo L1-3000®, medida em cm².

Posteriormente, as folhas, o caule e as raízes foram lavadas com água, solução detergente (Extran® 0.1%), solução ácida (HCl 0.1%) e água deionizada e acondicionadas em sacos de papel e levadas para secar em estufa de circulação forçada de ar a 65 ± 5 °C até obtenção de massa constante.

Após secas, as amostras foram pesadas em balança de precisão (0,001) para obter a massa seca da parte aérea (folhas + caule) e massa seca da raiz.

Avaliações nutricionais e teor de Si

Após pesagem do material, as amostras foram moídas em moinho tipo Wiley para determinação dos teores de Si, N, P, K, Ca e Mg na parte aérea das plantas. Para determinação de Si a digestão do material vegetal foi realizada por via úmida com adição de peróxido de hidrogênio (H₂O₂) e hidróxido de sódio (NaOH) (KRASKA; BREITENBECK, 2010); e a determinação do teor de Si foi realizada a partir da reação com molibdato de amônio seguida por leitura em espectrofotômetro a 410 nm (KORNDORFER, 2004). Para a determinação dos teores de macronutrientes (N, P, K, Ca e Mg), adotou-se metodologia de Bataglia (BATAGLIA et al., 1983). O acúmulo de Si, N, P, K, Ca e Mg foram calculados pelo produto da massa seca e teor dos elementos, dados em mg por planta.

Análise estatística

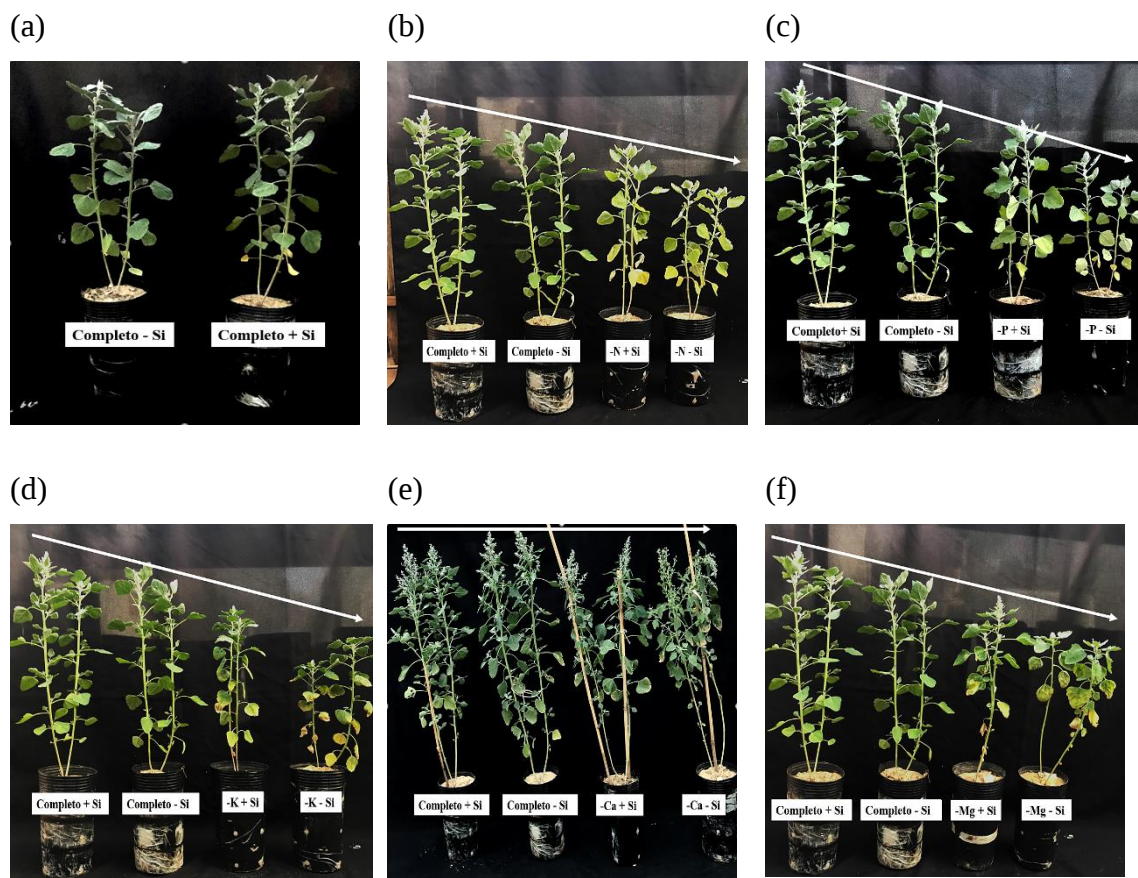
Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância pelo teste F e, quando significativo, procedeu-se à comparação de médias pelo teste de Tukey à comparação de médias realizou-se teste de Tukey a 5% de probabilidade utilizando o software Sisvar

(FERREIRA, 2011). Posteriormente, para uma visão da inter-relação entre os tratamentos e as variáveis avaliadas, foi construído um heatmap. Para isso, as variáveis foram padronizadas e utilizada a distância euclidiana entre os tratamentos. Foi utilizada a biblioteca “pheatmap” do software livre R (R CORE TEAM, 2017).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nitrogênio (N)

Na omissão de N às plantas de quinoa, os sintomas observados foram clorose das folhas mais velhas (Figura 3 i). A omissão do nutriente proporcionou diminuição de 92% na ausência e 88% na presença de Si no acúmulo de N, em comparação as plantas submetidas à solução completa, por isso, os sintomas de deficiência. Com a evolução dos sintomas, a clorose passou a ser observada na parte superior das plantas, no entanto, de forma menos acentuada, devido alta mobilidade do nutriente no floema (MARSCHNER, 2012) (Figura 3 b).



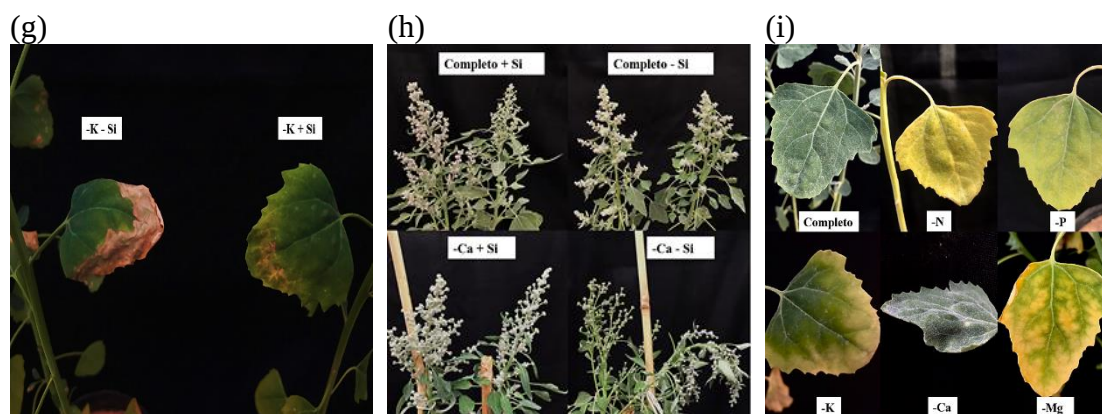


Figura 3. Sintomatologia de plantas de quinoa submetida a solução completa e omissão nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) na ausência e na presença de Si, (a) solução completa, (b) omissão de nitrogênio, (c) omissão de fósforo, (d) omissão de potássio, (e) omissão de cálcio, (f) omissão de magnésio, (g) folhas de quinoa sob omissão de potássio, (h) inflorescência de quinoa sob omissão de cálcio, (i) comparação dos sintomas dos nutrientes em folhas de quinoa.

O processo de evolução da despigmentação das folhas deficientes em N pode ser compreendido pelo processo de redistribuição de nutrientes dentro do metabolismo vegetal. A proteólise da enzima rubisco e de outras proteínas do cloroplasto, em razão da deficiência nutricional de N, possibilita a liberação e encaminhamento do nutriente para os novos órgãos (MARSCHNER, 2012), visando garantir crescimento e desenvolvimento vegetal.

Com relação aos acúmulos, a adição de Si proporcionou maiores acúmulos do elemento na parte aérea da planta (Figura 4 f), além disto, promoveu maior acúmulo de K, Ca e Mg em comparação as plantas que não receberam Si (Figura 4 c, d, e). O maior acúmulo de K na presença de Si se deve possivelmente a ativação da H⁺ATPase nas membranas quando adicionado o elemento Si na solução nutritiva (FELLER et al., 2008), promovendo melhoria na captação e translocação do K⁺ (LIANG, 1996; LIANG et al., 1996; LIANG, 2002; FELLER et al., 2008).

Já o acúmulo de Ca possivelmente se deve ao aumento do influxo e efluxo do Ca no citosol por canais transportadores de Ca localizados na membrana (HURTADO et al., 2020), pois na literatura, Bogen et al. (2011) trabalhando com estresse hídrico para cultura do milho, observaram que a adição de Si proporcionou aumento do acúmulo de Ca em plantas não estressadas. Assim como os resultados encontrados no nosso trabalho, demonstrando que o Si proporciona maior acúmulo de Ca no fornecimento de solução completa às plantas de quinoa.

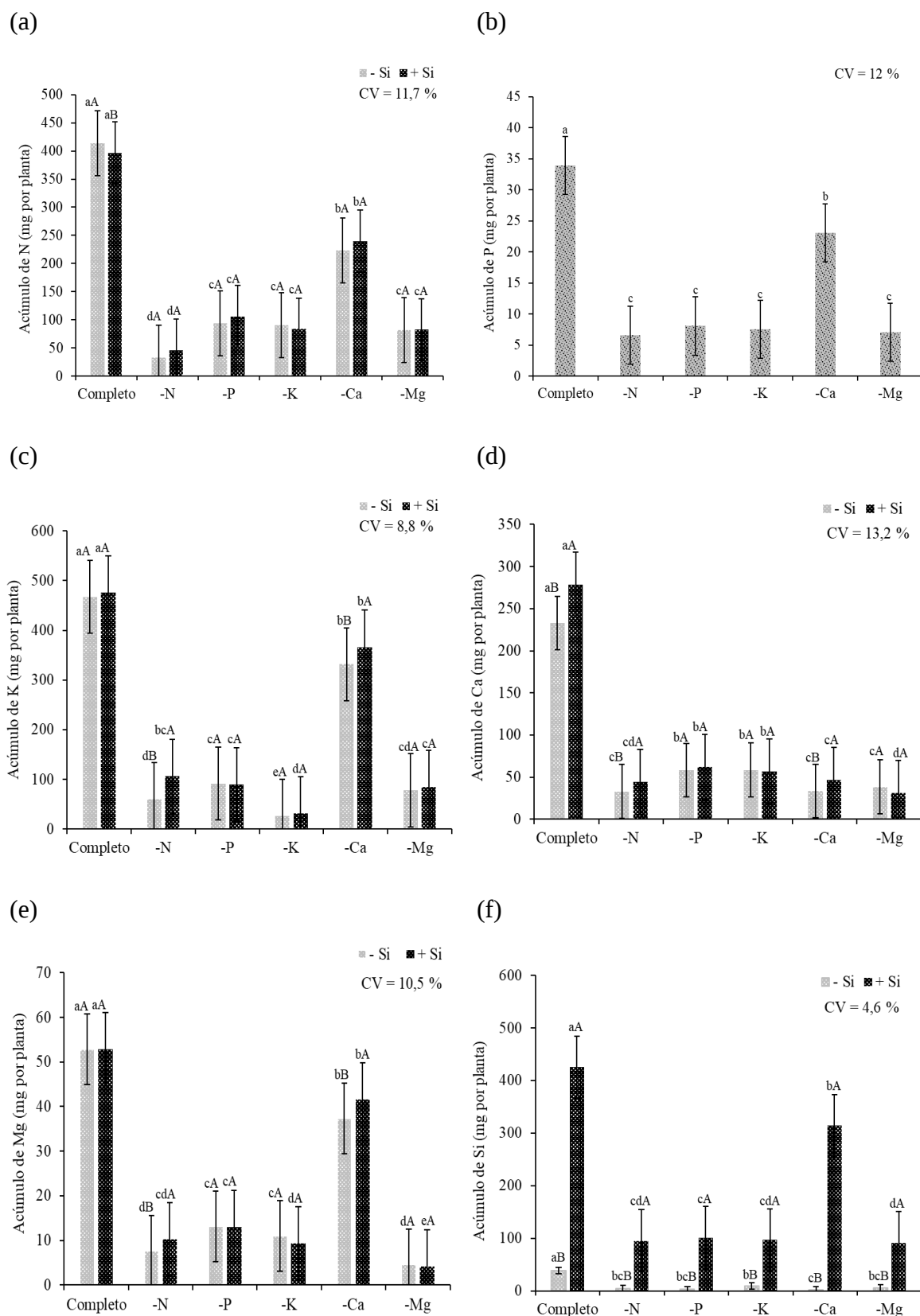
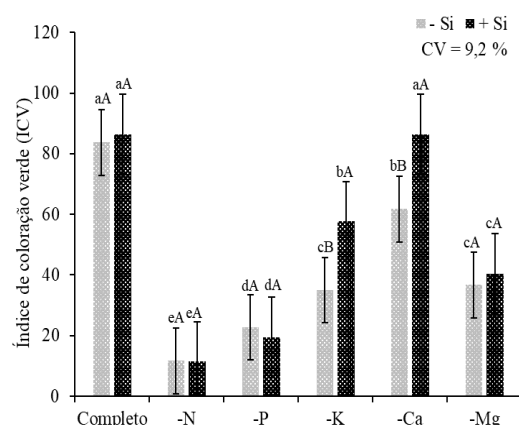


Figura 4. Acúmulo de nutrientes de plantas de quinoa sob solução completa e omissão de N, P, K, Ca e Mg na ausência (-Si) e presença de silício (+Si), (a) acúmulo de N, (b) médias do acúmulo de P, (c) acúmulo de K, (d) acúmulo de Ca, (e) acúmulo de Mg e (f) acúmulo de Si. Letras minúsculas iguais demonstram semelhança entre os tratamentos com omissão e o

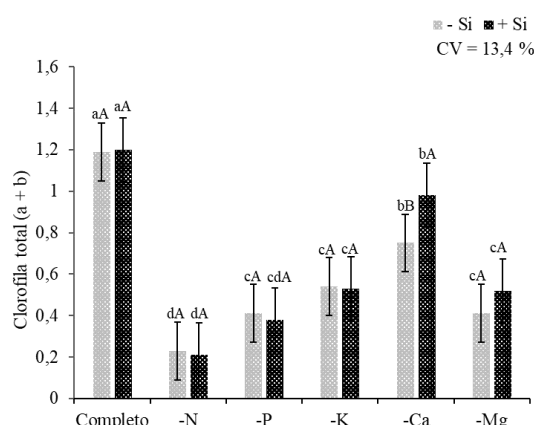
completo, pelo teste de Tukey. Letras maiúsculas iguais demonstram semelhança entre os tratamentos (-Si) e (+Si), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A deficiência nutricional de N proporcionou diminuição do ICV das plantas de quinoa (Figura 5 a), devido à diminuição do teor de pigmentos. O decréscimo do teor de clorofila total e de carotenoides é observado para as plantas de quinoa submetidas a omissão de N, independentemente da adição de Si (Figura 5 b, c). A omissão do macronutriente proporcionou diminuição de 81% e 83% em comparação ao teor de clorofila total e 79% e 76% de carotenoides, na ausência e na presença de Si, respectivamente, de plantas cultivadas em solução completa. Esse efeito na diminuição do teor de clorofila se deve pela participação estrutural do N na molécula de clorofila (KAYA et al., 2006). Em algumas culturas, o teor de clorofila nas folhas se correlaciona positivamente com a concentração de N, sendo que 70% do N contido nas folhas participa da síntese e estruturação química de clorofilas (PRADO, 2021).

(a)



(b)



(c)

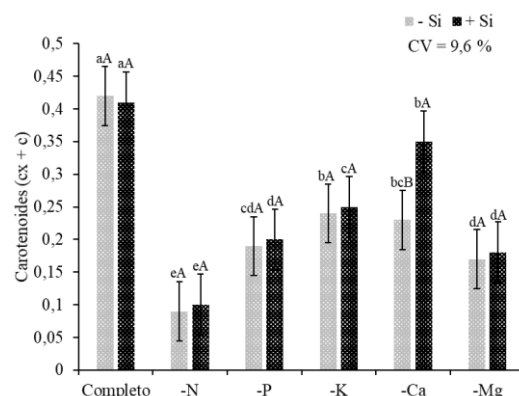


Figura 5. (a) Índice de coloração verde (ICV), (b) clorofila total e (c) carotenoides de plantas de quinoa sob omissão de N, P, K, Ca e Mg na ausência (-Si) e presença de silício (+Si). Letras minúsculas iguais demonstram semelhança entre os tratamentos com omissão e o completo, pelo teste de Tukey. Letras maiúsculas iguais demonstram semelhança entre os tratamentos (-Si) e (+Si), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A deficiência de N para a quinoa independentemente da presença de Si proporcionou maior índice de vazamento de eletrólitos em comparação às plantas cultivadas em solução completa. No entanto, a adição de Si na solução mitigou os efeitos deletérios da deficiência, reduzindo o vazamento de eletrólitos (Figura 6). Estudos indicam que o Si forma complexos com polímeros estruturais das células, tais como pectinas e calose (ARGENTA et al., 2004) e ainda ligações cruzadas com ligninas e carboidratos via associações com ácidos fenólicos ou anéis aromáticos (BOYLSTON et al., 1990), contribuindo com a estruturação da membrana celular.

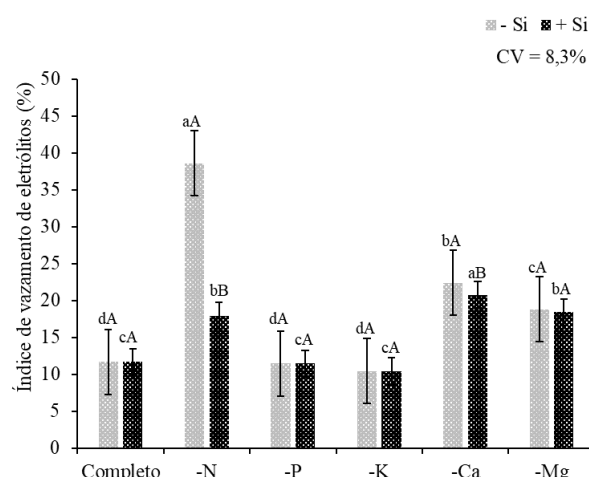


Figura 6. Índice de vazamento de eletrólitos de plantas de quinoa sob solução completa e omissão de N, P, K, Ca e Mg na ausência (-Si) e presença de silício (+Si). Letras minúsculas iguais demonstram semelhança entre os tratamentos com omissão e o completo, pelo teste de Tukey. Letras maiúsculas iguais demonstram semelhança entre os tratamentos (-Si) e (+Si), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Houve aumento da F0 na omissão de N, independentemente da presença de Si, em relação às plantas cultivadas em solução completa (Figura 7 a). Inanaga et al. (1995) relataram que a elevação da taxa de F0 indica a destruição do centro de reação do fotossistema II (PSII), da clorofila (P680) ou diminuição da capacidade de transferência da energia do complexo antenas ao PSII. Os autores acrescentaram ainda que isso ocorre quando a quinona (QA- receptora primária de elétrons) está oxidada e quando o centro de reação

(clorofila) está em estado “aberto”, indicando urgência para ativação das reações fotoquímicas.

Para a Fm a adição de Si na solução, não proporcionou diferença significativa (Figuras 7 b). A deficiência de N promoveu diminuição da taxa de Fm em comparação as plantas cultivadas em solução completa. Para Inanaga et al. (1995), o aumento da intensidade máxima de fluorescência (Fm) denota o estado em que os centros de reações do PSII são incapazes de aumentar as reações fotoquímicas. Revelando que a fluorescência atingiu sua capacidade máxima pela condição totalmente reduzida da quinona (QA), e quando o centro de reação (P680) está em estado “fechado”, afetando o transporte de elétrons ao fotossistema I (PSI).

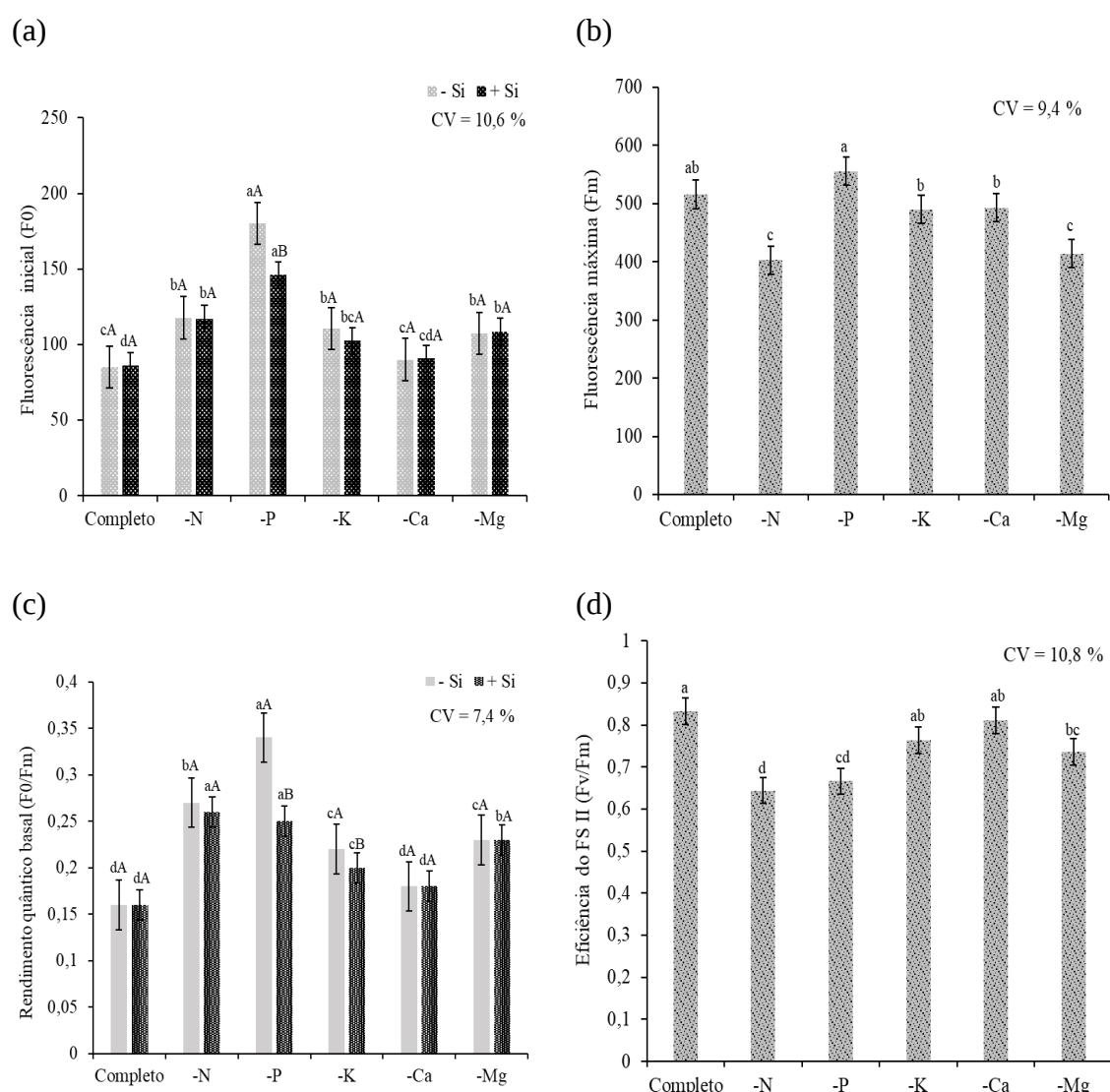


Figura 7. (a) Fluorescência inicial (F0), (b) médias de fluorescência máxima (Fm), (c) rendimento quântico basal do fotossistema II e (d) médias de eficiência do fotossistema II de plantas de quinoa sob omissão de N, P, K, Ca e Mg na ausência (-Si) e presença de silício (+Si). Letras minúsculas iguais demonstram semelhança entre os tratamentos com omissão e

o completo, pelo teste de Tukey. Letras maiúsculas iguais demonstram semelhança entre os tratamentos (-Si) e (+Si), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Para F0/Fm na omissão de N, foram observadas maiores taxas de rendimento em comparação às plantas cultivadas em solução completa, que apresentou razão de 0,16 independentemente do uso de Si, enquanto a deficiência apresentou razão de 0,27 na ausência de Si e 0,26 na presença de Si, evidenciando o estresse (Figura 7 c). Segundo Baker e Rosenqvist (2004), um aumento da razão F0/Fm é indicativo de estresse e sugere que valores normais próximos de 0,14 e 0,20 são comumente descritos na literatura para este parâmetro de fluorescência da clorofila.

A carência do N afetou a Fv/Fm de plantas de quinoa, tendo uma eficiência do PSII de 0,644, sendo 23% inferior às plantas cultivadas em solução completa, que apresentaram uma relação Fv/Fm de 0,833 (Figura 7d). Estudos mostram que plantas, em condições normais, apresentam relação Fv/Fm entre 0,85 e 0,75, para os quais valores menores que 0,75 seriam indicativos de condições inibitórias do PSII (ROHÁČEK, 2002). Assim sendo, este resultado evidencia que a deficiência de N afeta a eficiência fotossintética de plantas de quinoa, em razão do nutriente ser componente essencial para o funcionamento de proteínas e da clorofila e consequentemente para a fotossíntese (BOLHÁR-NORDENKAMPF; OQUIST 1993). Portanto, a capacidade fotossintética está associada ao teor de nitrogênio no metabolismo vegetal, principalmente porque os tilacóides e as proteínas do ciclo de Calvin representam a maior proporção do N (ASHLEY, 2011).

Em relação ao desenvolvimento das plantas deficientes em N, o menor teor de pigmentos, consequentemente menor taxa fotossintética, resultou em menor área foliar das plantas em comparação às cultivadas em solução completa (Figura 8 a). No entanto, a adição de Si proporcionou efeito positivo para desenvolvimento de plantas, obtendo área foliar 308% maior em comparação às plantas cultivadas na omissão de N na ausência de Si.

Ainda com relação ao desenvolvimento das plantas, para a massa seca da parte aérea fica evidente que a omissão de N promoveu a diminuição da biomassa cultivada com ou sem Si (Figura 8 b). Contudo, a presença do Si na solução nutritiva expressou efeitos benéficos sobre o desenvolvimento das plantas. Sendo observada maior biomassa da parte aérea em plantas que receberam Si, este é um possível reflexo do efeito mitigador do Si em situações de estresse nutricional, causado pela deficiência de N.

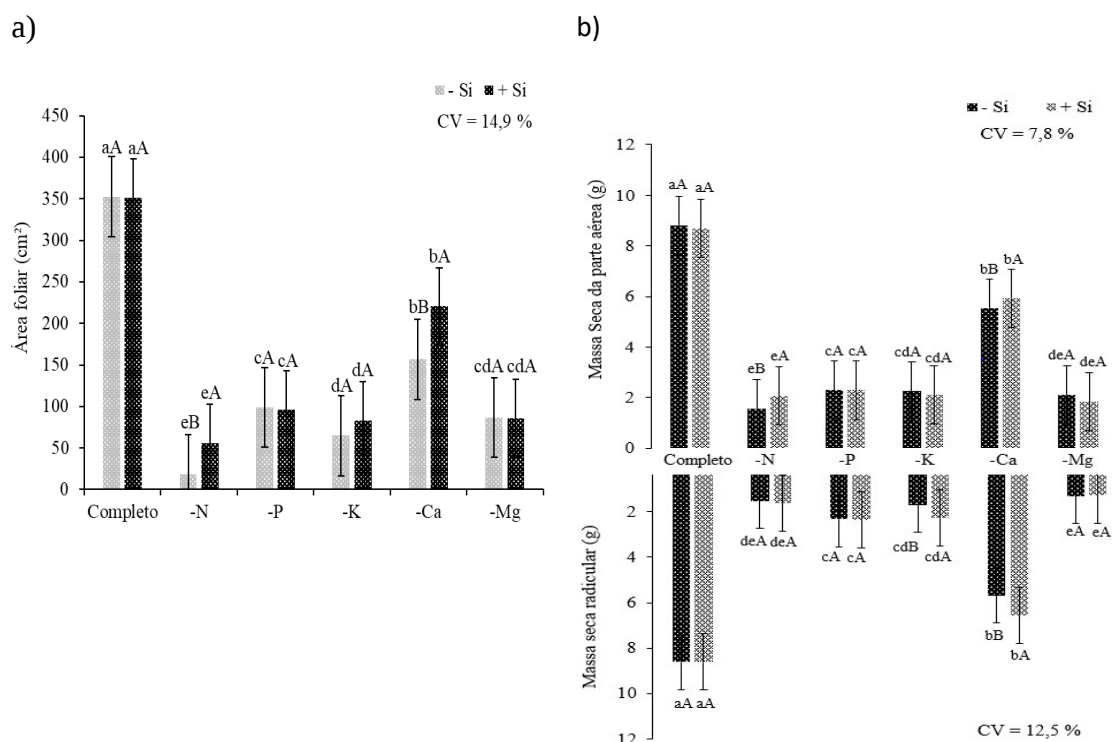


Figura 8. Produção de biomassa de plantas de quinoa submetidas à solução completa e omissão de N, P, K, Ca e Mg na ausência (-Si) e presença de silício (+Si), (a) área foliar, (b) massa seca da parte aérea e radicular. Letras minúsculas iguais demonstram semelhança entre os tratamentos com omissão e o completo, pelo teste de Tukey. Letras maiúsculas iguais demonstram semelhança entre os tratamentos (-Si) e (+Si), pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Também fica evidente que a omissão de N promoveu diminuição da massa seca radicular. No entanto, a presença do Si não foi suficiente para influenciar no crescimento radicular e amenizar os efeitos severos da deficiência.

O N foi um dos macronutrientes que mais limitou o crescimento das plantas de quinoa, com diminuição de 82% na massa seca da parte aérea e radicular na ausência de Si, e 76% na massa seca da parte aérea e 81% na massa seca de raízes na presença de Si. Tais resultados demonstram que a quantidade demandada e a importância desse nutriente para o crescimento das plantas são de grande relevância (EVANS, 1989), inclusive para a quinoa.

Contudo, a presença de Si proporcionou melhor desempenho das plantas estressadas, obtendo maior área foliar e biomassa da matéria seca da parte aérea. Assim, torna-se evidente que a adição do elemento benéfico proporciona melhor desempenho de plantas de quinoa submetidas ao estresse nutricional de deficiência de N.

Fósforo (P)

As plantas de quinoa, independentemente da presença de Si, apresentaram sintomas visuais de deficiência de P, como as folhas velhas com coloração verde-pálida e as superiores com tons verdes mais escuros, e com a evolução dos sintomas as folhas inferiores se tornam necróticas e as folhas superiores se tornaram verde-pálidas. Também ficou evidente o menor desenvolvimento das plantas de quinoa deficientes em relação às plantas cultivadas com solução completa (Figura 3 c; i).

Os sintomas de deficiência são em razão da menor disponibilidade de P, sendo observado acúmulo 76% menor no teor do nutriente em comparação com as plantas cultivadas em solução completa (Figura 4 b). Contudo, para acúmulo de Si a adição do elemento proporcionou maiores teores de Si na parte aérea da planta (Figura 4 f).

A alta mobilidade do P no floema ficou evidenciado com o avanço dos sintomas, as plantas em situações de deficiência nutricional realizam a redistribuição do P, buscando atender a demanda dos tecidos em desenvolvimento (EVANS, 1989). Para o ICV, as plantas deficientes independentemente da presença do Si apresentaram baixa intensidade de coloração em comparação com as plantas submetidas à solução completa (Figura 5 a).

O decréscimo no teor de clorofila total e de carotenoides na omissão de P confirmam que a diminuição na taxa de pigmentos expressa uma menor intensidade de coloração verde (Figura 5 b e c). A despigmentação das folhas sob omissão de P pode ser explicada pela degradação de pigmentos, e devido a isso, ocorre diminuição da atividade fotossintética, ocasionada pela menor síntese de ATP e da regeneração da rubisco (HAWKESFORD et al., 2012).

A omissão de P independentemente da presença de Si não proporcionou aumento no índice de vazamento de eletrólitos. As plantas cultivadas sob a omissão de P apresentaram índices semelhantes às plantas que foram cultivadas em solução completa (Figura 6).

Analisando a F0 das plantas sob a deficiência de P, independentemente da presença de Si, verifica-se que foram as apresentaram a maior perda de energia do fotossistema, em comparação com as plantas cultivadas em solução completa. No entanto, na presença de Si, na deficiência de P diminuiu a perda de energia por fluorescência, em comparação ao tratamento que não recebeu Si, revelando de forma inédita o efeito benéfico do Si no sistema fotossintético de plantas de quinoa (Figura 7 a). A omissão de P proporcionou maior Fm, no entanto, não diferenciou estatisticamente das plantas que receberam solução completa (Figura 7 b).

O F0/Fm para a omissão de P proporcionou a maior produção quântica basal em comparação as plantas cultivadas em solução completa. O uso de Si apresentou efeitos significativos, de modo que, na ausência do elemento benéfico ocorreu uma produção quântica basal de 0,35 enquanto que, com a adição do Si, a produção quântica basal obteve uma média de 0,25. Entretanto, apesar de não ser a média padronizada como normal entre 0,14 a 0,20, o Si apresentou efeitos benéficos para essa variável, sendo capaz de amenizar possíveis efeitos deletérios da deficiência (Figura 7 c).

A relação Fv/Fm foi de 0,66 com diminuição de 20% em comparação às plantas cultivadas em solução completa que apresentaram relação Fv/Fm de 0,83 (Fig 7 d). A Fv/Fm, segundo Lin et al. (2009) é um indicativo de perturbações no sistema fotossintético, oriundas de estresses ambientais e bióticos, quando essa razão decresce indica inibição da atividade fotoquímica. Além disso, o decréscimo da razão Fv/Fm pode representar desvio da energia luminosa absorvida, evidenciando danos no aparato fotossintético, por isso, o decréscimo na eficiência quântica (PEREIRA et al., 2000).

A área foliar para omissão de P independentemente da presença do Si, apresentou diminuição em comparação as plantas cultivadas em solução completa, demonstrando a relevância deste macronutriente para desenvolvimento vegetal (Figura 8 a). O menor desenvolvimento das plantas cultivadas na ausência de P ocorre devido a função metabólica que o nutriente exerce sobre o vegetal, no processo de transferência e armazenamento de energia (TAIZ; ZEIGER, 2004). A falta de P, afeta as ligações energéticas no metabolismo vegetal, devido esse nutriente ser constituinte de NADP e ATP (MALAVOLTA, 1989).

Com isso, os resultados de biomassa da parte área e radicular independentemente da presença de Si, reafirmam os prejuízos ocasionados no metabolismo de plantas deficientes de P, sendo evidenciado que o estresse nutricional limitou o desenvolvimento das plantas em comparação com as que foram cultivadas em solução completa (Figura 8 b). A escassez de energia no metabolismo vegetal compromete os processos de biossíntese da planta (KAYA et al., 2006; CALDERÓN-VAZQUEZ et al., 2011). Desta maneira, ocorre diminuição da formação de fosfolipídios que são componentes importantes das membranas celulares, decorrência disto tem-se menor síntese de novas células (MENGEL; KIRKBY, 2001), refletindo na limitação do desenvolvimento das plantas.

Potássio (K)

As plantas de quinoa apresentaram diminuição no acúmulo de K de 94% e 93% na ausência e na presença de Si respectivamente, em comparação as plantas cultivadas em

solução completa (Figura 4 c). A adição de Si proporcionou maior acúmulo de Si na parte área das plantas (Figura 4 f).

Os sintomas da deficiência de K foram caracterizados pela clorose apenas nas margens das folhas mais velhas, seguida de necrose (Figura 3 d, g, i). A baixa disponibilidade de K promove a diminuição da síntese proteica, refletindo no acúmulo de aminoácidos que são descarboxilados. Isso resulta no aumento do teor de putrescina, que em altas concentrações acentua o desequilíbrio celular e promove o sintoma de necrose marginal dos tecidos vegetais (SUN et al., 2016).

O ICV, para as plantas deficientes de K independentemente da presença do Si, expressou menor intensidade em comparação com as plantas cultivadas em solução completa (Figura 5 a). Porém, a adição de Si diminuiu o prejuízo da despigmentação ocasionado pela deficiência do macronutriente. Para clorofila total e carotenoides a omissão de K independentemente da presença de Si diminuiu o teor desses pigmentos, em comparação as plantas cultivadas em solução completa. Apesar do fornecimento de Si, o elemento benéfico não foi capaz de favorecer o aumento da taxa desses pigmentos fotossintetizante (Figura 5 b e c).

O índice de vazamento de eletrólitos para deficiência de K não apresentou diferença significativa com o tratamento completo, independentemente da presença de Si (Figura 6). Isso se deve, pois, o K não desempenha função estrutural como o N e o P, sua principal função no metabolismo da planta é ser ativador enzimático, atuando em várias enzimas, que necessitam do nutriente para executar suas atividades metabólicas (KAYA et al., 2006).

A F0 para plantas de quinoa carentes em K independentemente da presença de Si foi maior em comparação as plantas submetidas à solução completa, apesar disto, o uso de Si, não foi capaz de contribuir para melhor desempenho das plantas (Figura 7 a). O aumento da F0 em plantas deficientes em K pode ser atribuído aos danos no complexo receptor de luz do PSII, ou devido diminuição na transferência de energia de excitação do sistema coletor de luz para o centro de reação (INANAGA et al., 1995; KALAJI et al., 2011; PATHAK et al., 2014; SUN et al., 2016), decorrentes do estresse. Já a Fm não diferenciou estatisticamente das plantas que receberam solução completa (Figura 7 b).

Para o F0/Fm as plantas com restrição em K apresentaram efeito em relação ao tratamento completo, tendo aumento de produção quântica basal. O uso de Si na solução de omissão apresentou efeito benéfico, onde a ausência de Si proporcionou uma produção quântica basal de 0,22, evidenciando a condição de estresse, enquanto, na presença do Si a produção quântica observada foi de 0,20 correspondendo à faixa indicada como normal entre 0,14 a 0,20 (Figura 7 c), demonstrando possível efeito benéfico do Si, na preservação do

aparato fotossintético em situações de estresse abiótico. Visto que, a relação F_v/F_m para plantas deficientes em K foi de 0,764 não diferindo estatisticamente das plantas que receberam solução completa (Figura 7 d). Esse efeito do Si também foi constatado por CHEN et al. (2016) na cultura do sorgo, onde plantas sob estresse nutricional tratadas com Si, apresentaram maior eficiência do fotossistema II. Os autores relataram que, a adição de Si via sistema radicular, ocasionou melhorias no desenvolvimento das plantas e nas taxas de atividade fotossintética.

A área foliar foi reduzida pela deficiência nutricional de K, independentemente da adição de Si (Figura 8a). A biomassa de plantas de quinoa deficientes em K independentemente da presença de Si foi afetada, tendo uma diminuição de 74% e 76% na ausência e na presença de Si respectivamente, em comparação as plantas cultivadas em solução completa (Figura 8b). No entanto, para a massa seca da raiz a presença de Si em plantas deficientes de K, beneficiou o desenvolvimento radicular.

A carência de K proporciona menor translocação de carboidratos da parte aérea para as raízes, reduzindo seu desenvolvimento (KAYA et al., 2006). Com isso, nossos resultados demonstraram que apesar da deficiência reduzir a biomassa da parte aérea, a presença do Si refletiu em acréscimos de biomassa de raízes.

Cálcio (Ca)

As plantas de quinoa cultivadas na omissão de Ca apresentaram diminuição no acúmulo de Ca de 86% e 83%, na ausência e na presença de silício, respectivamente, em comparação as plantas de quinoa cultivadas em solução completa (Figura 4 d). A adição de Si proporcionou maiores acúmulos de Si na parte aérea das plantas de quinoa (Figura 4 f).

Os sintomas da deficiência de Ca se caracterizam pela má formação dos pontos de crescimento, as folhas mais novas, as brotações e a inflorescência apresentaram irregularidades (Figura 3 e, h, i). Estudos de Ghotbi-ravandi et al. (2014) na cultura do pinhão manso (*Jatropha curcas* L.) e de Silva et al. (2009) em feijão caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp), também relataram que a deficiência de cálcio faz com que plantas cresçam com folhas desorganizadas e com bordas onduladas. Isso ocorre devido ao Ca apresentar função estrutural, conferindo estabilidade da pectina na parede celular das folhas (MIRANDA et al., 2010; PROSEUS; BOYER, 2012).

Apesar da diminuição da absorção de Ca pelas plantas cultivadas na ausência do nutriente, a adição de Si proporcionou maior acúmulo do elemento faltante. Existem vários mecanismos que explicam os benefícios da utilização de Si no alívio da deficiência

nutricional de plantas, sendo um destes, aumentando a remobilização ou absorção do nutriente deficiente (LIANG et al., 2007, MIAI et al., 2010; HEPLER; WINSHIP, 2012; CHEN et al., 2016; PAVLOVIC et al, 2016), isso revela o efeito benéfico do Si, em melhorar a eficiência da planta estressada em absorver o elemento faltante, resultando em melhor desempenho de utilização do nutriente necessitado. O ICV na ausência do Si foi indicativo dos prejuízos ocasionado pela deficiência do Ca, uma vez que, houve diminuição da coloração verde nestas condições. Já as plantas deficientes de Ca na presença do Si, o ICV foi semelhante com as plantas cultivadas em solução completa (Figura 5 a). O uso de Si contribuiu na mitigação da deficiência de Ca, por aumentar o teor de clorofila total e carotenoide (Figura 5 b, c). Nossos resultados, reafirmam os benefícios do Si sobre plantas estressadas por aumentar os teores de clorofila (KOSTICL et al., 2017) ou por proteger a degradação da clorofila (XIE et al., 2014) em situações de estresse.

As plantas sob a deficiência de Ca, independentemente da presença de Si, apresentaram maiores índices de vazamento de eletrólitos em comparação às cultivadas em solução completa (Figura 6). Isso ocorre porque, o Ca é um nutriente com notória importância para estruturação celular, pois o cátion se liga às pectinas, formando os pectatos de cálcio, que são compostos que dão estabilidade a membrana plasmática (GOTTARDI et al., 2012), além da presença do Ca, reduzir a ação das enzimas Polimetilesterase (PME) e Poligaracturonase (PG) (BAI et al., 2009), que são enzimas que oxidam a pectina. Assim, a adição de Si na solução nutritiva sob omissão de Ca, proporcionou diminuição da taxa de vazamento de eletrólitos, esse resultado pode estar relacionado à melhor atividade de enzimas antioxidantes durante o estresse oxidativo (YAMAMOTO et al., 2011, TORABI et al., 2015, KIM et al., 2016).

Para plantas de quinoa deficientes em Ca, independentemente da presença de Si, não foram verificadas alterações para as variáveis fotossintéticas. Onde, as variáveis F0, Fm, F0/Fm e Fv/Fm, não apresentaram diferença significativa em relação as plantas cultivadas em solução completa (Figura 7 a, b, c, d). A área foliar apresentou diminuição em plantas cultivadas na omissão de Ca, em comparação as plantas cultivadas em solução completa. Em plantas cultivadas na carência de Ca, a adição de Si promoveu aumento de 140,49% no índice de área foliar em comparação as plantas de quinoa submetidas à omissão de Ca na ausência do elemento (Figura 8 a). O uso do Si pode ter contribuído para mitigar o estresse por deficiência de Ca, devido à associação indireta deste elemento benéfico no aumento dos teores de clorofila (KOSTICL et al., 2017), e conseqüentemente das taxas fotossintéticas

(FALQUETO et al., 2007; CHEN et al., 2016), que podem colaborar com melhor eficiência de uso do Ca absorvido.

Resultados da massa seca da parte aérea e da massa seca radicular corroboram com as hipóteses do benefício do Si na mitigação da deficiência nutricional de Ca em plantas de quinoa. Em razão que, a adição do elemento na deficiência de Ca, proporcionou melhor desenvolvimento das plantas estressadas, atenuando os efeitos deletérios da deficiência nutricional, influenciando em maior absorção do elemento faltante, maior índice de coloração verde, consequentemente maior teor de clorofila, menor vazamento de eletrólitos e maior área foliar, resultando em maior massa seca da parte aérea e radicular (Figura 8 b).

Magnésio (Mg)

Aos quarenta dias de cultivo, com 10 dias de aplicação da omissão de Mg as plantas de quinoa apresentaram sintomas de clorose nas folhas velhas (Figura 3 f). A omissão do nutriente, proporcionou diminuição de 91% e 92% a ausência e na presença de silício, respectivamente, no acúmulo de Mg em comparação as plantas submetidas a solução completa (Figura 4 e f), por isso, os sintomas de deficiência.

A deficiência de Mg se caracterizou com uma clorose padrão, sendo observada a clorose entre as nervuras das folhas velhas (Figura 3 i). Isso ocorre, devido à estrutura dos pigmentos da nervura permanecer inalterada por períodos mais longos quando comparada à clorofila das células presentes no limbo foliar (ZUCCARINI et al., 2008).

Para o ICV, as plantas deficientes de Mg independentemente da presença do Si, apresentaram baixa intensidade de coloração em comparação com as plantas submetidas a solução completa (Figura 5 a). A despigmentação se deve a diminuição dos teores de clorofila total (Figura 5 b). Dentre as principais funções do Mg no metabolismo vegetal, 20% do nutriente presente no cloroplasto, é responsável pela composição química da clorofila sendo o átomo central da estrutura da molécula (PRADO, 2021), desta forma, a deficiência nutricional de Mg afeta diretamente nos teores de clorofilas.

Em relação ao índice de vazamento de eletrólitos a deficiência de Mg independentemente da presença de Si, apresentou diferença significativa comparado as plantas cultivadas em solução completa, sendo que, o vazamento de eletrólitos foi superior na deficiência (Figura 6). Isso pode ter ocorrido, devido uma pequena parte do Mg (5 a 10%) acompanhar o Ca na síntese da parede celular (PRADO, 2021), desta forma, a deficiência do Mg, pode ter influenciado na estruturação da parede celular, possibilitando maior vazamento de eletrólitos.

A deficiência de Mg independentemente da presença de Si proporcionou maior F0 diferindo estatisticamente das plantas que receberam solução completa. No entanto, a adição de Si na deficiência, não foi suficiente para auxiliar no metabolismo fotossintético das plantas de quinoa, sendo evidenciado pelo aumento de F0 (Figura 7 a). A Fm foi reduzida na carência de Mg, diferindo-se estatisticamente das plantas que receberam solução completa (Figura 7 b).

Para o F0/Fm a omissão de Mg, apresentou diferença significativa com médias superiores em comparação as plantas cultivadas em solução completa, evidenciando o estresse promovido pela deficiência do macronutriente. A omissão de Mg independentemente do uso de Si, apresentou produção quântica de 0,23 indicando que a adição do elemento não foi suficiente para influenciar na atenuação do estresse (Figura 7 c).

A relação Fv/Fm foi afetada pelo estresse ocasionado pela deficiência nutricional. As plantas submetidas à omissão, apresentavam relação Fv/Fm de 0,73 sendo inferior da média 0,75, considerada padrão (ROHÁCEK, 2002) e que indica desempenho normal do aparato fotossintético das plantas (Figura 7 d), assim, a deficiência nutricional de Mg, alterou a eficiência fotossintética das plantas de quinoa, possivelmente por danificar o aparato fotossintético das plantas.

Para a área foliar independentemente da presença do Si, a omissão de Mg proporcionou diminuição, em comparação as plantas cultivadas em solução completa, demonstrando a importância deste macronutriente para desenvolvimento vegetal (Figura 8 a). Apesar da adição de Si na solução nutritiva de plantas de quinoa deficientes em Mg, a presença do elemento não foi suficiente para influenciar no desenvolvimento das plantas. Assim, a ausência de Mg como a ausência de N, foram os tratamentos que mais limitaram a produção de biomassa da cultura. A omissão de Mg diminuiu 75% e 79 % da massa seca da parte aérea na ausência e na presença de Si, respectivamente, além da diminuição de 85% do sistema radicular, independentemente da adição de Si (Figura 8 b).

Relação entre tratamentos e variáveis avaliadas

Para demonstrar a similaridade entre os tratamentos avaliados e a correlação entre as variáveis, foi construído o heatmap (Figura 9). É possível observar a formação de dois grupos em que os tratamentos em cada grupo possuem alta similaridade para todas as variáveis avaliadas. O grupo I alocou os tratamentos -Ca-Si, -Ca+Si, SC-Si e SC+Si. Os demais tratamentos compuseram o grupo II.

Os tratamentos contidos no grupo I apresentaram as maiores médias (células em vermelho) para as variáveis eficiência do PSII (Fv_Fm), índice de coloração verde (ICV), massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca do sistema radicular (MSR), clorofila total (Clorofila a + b), carotenoides (Caro), teor de Mg, teor de K, área foliar (AF) e teor de P, evidenciando melhor desenvolvimento das plantas.

Por outro lado, os tratamentos do grupo II apresentaram as maiores médias de fluorescência inicial (F0) e rendimento quântico basal (F0_Fm), que são variáveis que evidenciam que a planta se encontra em situação de estresse, demonstrando, possivelmente, que os tratamentos do grupo II foram mais críticos para o desenvolvimento de plantas de quinoa

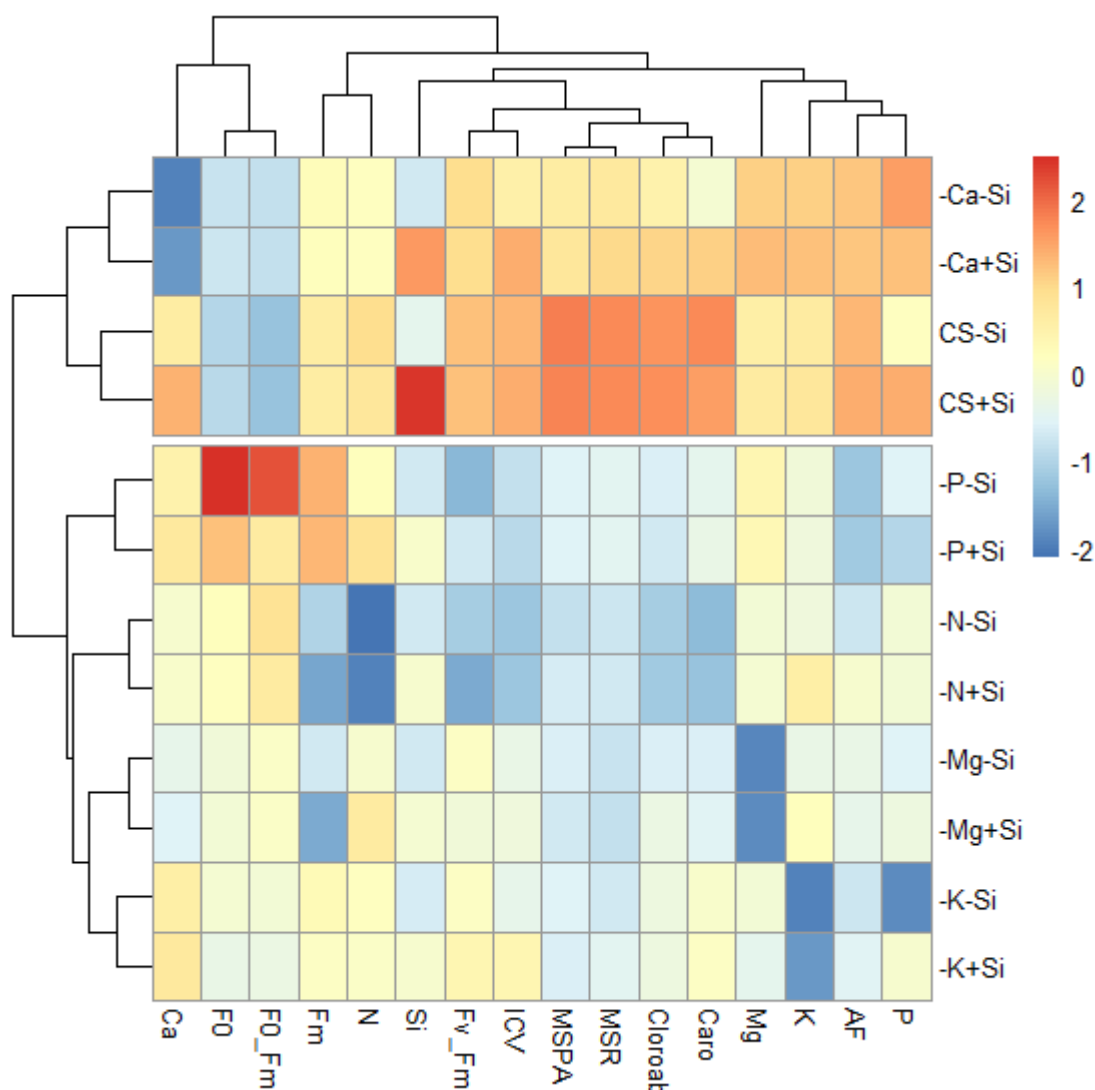


Figura 9. Heatmap construído para demonstrar a relação entre tratamentos e variáveis avaliadas.

As informações desta pesquisa possibilitaram compreender melhor os benefícios do Si na deficiência nutricional das plantas de quinoa e permite propor o uso do Si para aumentar a sustentabilidade do seu cultivo em escala global dada a vasta ocorrência de solos de baixa fertilidade.

CONCLUSÕES

A deficiência de N, P, K, Ca e Mg no cultivo de plantas de quinoa causou alterações fisiológicas e sintomas visuais característicos da deficiência nutricional dos respectivos nutrientes. A aplicação de Si atenuou os efeitos visuais da deficiência de todos os nutrientes.

A deficiência de N, P, K, e Mg afetou o aparato fotossintético de plantas de quinoa, no entanto, a adição de Si na restrição de P, preservou o aparato de fotossintético.

A presença de Si, na restrição de Ca, mitigou os efeitos deletérios do estresse, por maior síntese e proteção de clorofilas. Para N e Ca, a presença de Si diminuiu os danos à parede celular pelo menor vazamento de eletrólitos e consequentemente aumentou massa seca das plantas de quinoa.

Essa pesquisa evidenciou importantes resultados que estão relacionados aos efeitos do Si na mitigação de estresse, causados por deficiências nutricionais, os resultados obtidos são inéditos e servirão para futuras pesquisas, sobre o uso do Si minimizando os efeitos deletérios das desordens nutricionais em plantas de quinoa.

REFERÊNCIAS

- AQUINO, L. A.; SILVA, F. D. B.; BERGER, P. G. Características agronômicas e o estado nutricional de cultivares de girassol irrigado. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, v. 17, p. 551-557, 2013. (doi: 10.1590/S141543662013000500013).
- ARGENTA, G.; SILVA, P. R. F.; SANGOI, L. Leaf relative chlorophyll content as an indicator parameter to predict nitrogen fertilization in maize. **Ciência Rural**, n. 34, v. 05, p. 1379-1387, 2004.
- ASHLEY, R. **Grapevine nutrition-an Australian perspective**. Foster's wine estates americas, 2011, pp. 62-70.
- BAI, J. G.; XU, P. L.; ZONG, C. S.; WANG, C. Y. Effects of exogenous calcium on some postharvest characteristics of cut gladiolus. **Agr. Sci. China**, n.28, v. 3, p. 293–303, 2009.
- BAKER, N. R.; ROSENQVIST, E. Applications of chlorophyll fluorescence can improve crop production strategies: an examination of future possibilities. **J. Exp. Bot.**, v. 55, p. 1607-1621, 2004.
- BARRETO, R. F.; SCHIAVON JÚNIOR, A. A.; MAGGIO, M. A.; PRADO, R. M. Silicon alleviates ammonium toxicity in cauliflower and in broccoli. **Sci. Hortic.**, v. 225, p. 743–750, 2017. (doi: 10.1016/j.scienta.2017.08.014).
- BATAGLIA, O. C.; FURLANI, A. M. C.; TEIXEIRA, J. P. F.; FURLANI, P. R.; GALLO, J. R. **Métodos de análise química de plantas**. Campinas: Instituto Agronômico. (Boletim Técnico v.78), 1983.
- BOGESKI, I.; KAPPL, R.; KUMMEROW, C.; GULABOSKI, R.; HOTH, M.; NIEMEYER, B. A. Redox regulation of calcium ion channels: Chemical and physiological aspects. **Cell Calcium**, v. 50, p. 407–423, 2011.
- BOYLSTON, E. K.; HEBERT, J. J.; HENSARLING, T. P.; BRADOW, J. M.; THIBODEAUX, D. P. Role of silicon in developing cotton fibers. **J. Plant Nutr.**, v. 131-148, 1990.
- BYBORDI, A. Effect of ascorbic acid and silicium on photosynthesis, antioxidant enzyme activity, and fatty acid contents in canola exposure to salt stress. **J. Integr. Agric.**, v. 11, p. 1610–1620, 2012.
- BOLHÁR-NORDENKAMPF, H. R.; ÖQUIST, G. **Chlorophyll fluorescence as a tool in photosynthesis research**. In: Hall DO, Scurlock JMO, Bolhár-nordenkampf HR, Leegood RC, Long SP. (eds.). Photosynthesis and production in changing environment: a field and laboratory manual. London: Chapman e Hall, 1993, pp. 193-206.

- CALDERÓN-VÁZQUEZ, C.; SAWERS, R. J. H.; HERRERA-ESTRELLA, L. Phosphate deprivation in maize: genetics and genomics. **Plant Physiol.**, v.156, p. 1067–1077, 2011.
- CAMPOS, C. N. S.; DA SILVA JÚNIOR, G. B.; DE PRADO, R. M.; DE DAVID, C. H. O.; DE SOUZA JUNIOR, J. P.; TEODORO, P. E. Silicon mitigates ammonium toxicity in plants. **J. Agron**, v. 112, p. 635–647, 2020. (doi: 10.1002/agj2.20069)
- CAMPOS, C. N. S., PRADO, R. M.; CAIONE, R.; NETO, A. J. L.; MINGOTTE, F. L. C. Silicon and excess ammonium and nitrate in cucumber plants. **Afr. J. Agric. Res.**, n. 11, v. 4, 8:76-283, 2016. (doi: 10.5897/AJAR2015.1022).
- CARCIOCHI, R. A.; GALVÁN-D’ALESSANDRO, L.; VANDENDRIESSCHE, P.; CHOLLET, S. Effect of germination and fermentation process on the antioxidant compounds of quinoa seeds. **Plant Foods Hum. Nutr.**, v.71, p. 361–367, 2016.
- CHEN, D.; CAO, B.; WANG, S.; LIU, P.; DENG, X.; YIN, L.; ZHANG, S. Silicon moderated the K deficiency by improving the plant-water status in sorghum. **Sci Rep**, v. 6, p. 228-82, 2016. (doi: 10.1038/ srep22882).
- CHOUKR-ALLAH, R.; RAO, N. K.; HIRICH, A.; SHAHID, M.; ALSHANKITI, A.; TODERICH, K.; GILL, S.; BUTT, K. Quinoa for marginal environments: toward future food and nutritional security in MENA and central Asia regions. **Front. Plant Sci**, v.7, p.346, 2016. (doi:10.3389/fpls.2016.00346).
- COELHO, A. M.; WAQUI, J. M.; KARAM, D.; CASELA, C. R.; RIBAS, P. M.; **Seja o doutor do seu sorgo**. Piracicaba: Potafos, 2002. (Arquivo do agrônomo, 14).
- DEUS, A. C. F.; PRADO, R. M.; ALVAREZ, R. D. C. F.; OLIVEIRA, R. L. L.; FELISBERTO, G. Role of silicon and salicylic acid in the mitigation of nitrogen deficiency stress in rice plants. **Silicon**, p. 1:9, 2019 (doi: 10.1007/s12633-019-00195-5).
- DIONISIO-SESE, M. L.; TOBITA, S. Antioxidant responses of rice seedlings to salinity stress. **Plant Science**, v. 135, p. 1-9, 1998.
- EVANS, J. R. Photosynthesis and nitrogen relationship in leaves of C3 plants. **Oecologia**, Berlim, v. 78, p. 9-19, 1989.
- FALQUETO, A. R.; CASSOL, D., MAGALHÃES JÚNIOR, A. M.; OLIVEIRA, A. C.; BACARIN, M. A. Características da Fluorescência da Clorofila em Cultivares de Arroz Com Ciclo Precoces, Médio e Tardio. **Rev. Bras. de Biocienc**, Porto Alegre, n. 5, v. 2, p. 579-581, (2007).
- FAO. Regional Office for Latin America and the Caribbean. Quinoa: an ancient crop to contribute to world food security. PROINPA, 2011. 55p

- FELLER, U.; ANDERS, I.; DEMIREVSKA, K. Degradation of rubisco and other chloroplast proteins under abiotic stress. **Gen. Appl. Plant Physiol.**, v. 34, p. 5-18, 2008.
- FENG, J.; SHI, Q.; WANG, X.; WEI, M.; YANG, F.; XU, H. Silicon supplementation ameliorated the inhibition of photosynthesis and nitrate metabolism by cadmium (Cd) toxicity in *Cucumis sativus* L. **Scientia Horti**, v.123, p. 521–530, 2010.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 35, p. 1039-1042, 2011. (doi: 10.1590/S1413-70542011000600001).
- FILHO, O. F. de I.; SILVA, M. S.; VAREIRO, W. P. O.; ZANUTTO, R. P. Limpeza de Areia para Experimentos em Nutrição de Plantas. Comunicado Técnico 232. Dourados, MS. Embrapa, 2018.
- GHOTBI-RAVANDI, A. A.; SHAHBAZI, M.; SHARIATI, M.; MULO, P. Effects of Mild and Severe Drought Stress on Photosynthetic Efficiency in Tolerant and Susceptible Barley (*Hordeum vulgare* L.) Genotypes. **J. Agron. Crop Sci.**, v. 200, p. 403-415, 2014.
- GOTTARDI, S.; IACUZZO, F.; TOMASI, N.; CORTELLA, G.; MANZOCCO, L.; PINTON, R.; RÖMHELD, V.; MIMMO, T.; SCAMPICCHIO, M.; COSTA, L. D.; CESCO, S. Beneficial effects of silicon on hydroponically grown corn salad (*Valerianella locusta* (L.) Laterr) plants. **Plant Physiol. Biochem.**, v.56, p.14–23, 2012. (doi: 10.1016/j.plaphy.2012.04.002).
- GRUSAK, M. A.; BROADLEY, M. R.; WHITE, P. J. Plant macro-and micronutrient minerals, 2016. (doi: 10.1002/9780470015902.a0001306.pub2).
- HAWKESFORD, M.; HORST, W.; KICHEY, T.; LAMBERS, H.; SCHJOERRING, J.; MOLLER, I. S.; WHITE, P. Functions of macronutrients In: Marschner, P. (ed). **Mineral Nutrition of Higher Plants**. Academic Press, London, 2012, pp. 135-189.
- HEPLER P. K.; WINSHIP, L. J Calcium at the cell wall-cytoplasm interface. **Journal of Integrative Plant Biology**, 2010, 52(2):147–160 (doi: 10.1111/j.1744-7909.2010.00923.x).
- HOAGLAND, D. R.; ARNON, D. I. The water culture method for growing plants without soils. Berkeley, California agricultural experimental station, 1950.
- HOSSEINI, S. A.; NASERI, R. A. D. S.; ALI, N.; YVIN, J. C. The ameliorative effect of silicon on maize plants grown in mg-deficient conditions. **Int. J. Mol. Sci.**, v.20, p.969, 2019.
- HURTADO, A. C.; CHICONATO, D. A.; PRADO, R. M.; SOUSA JUNIOR, G. S.; VICIEDO, D. O.; DÍAZ, Y. P.; CALZADA, K. P.; GRATÃO, P. L. Silicon relieves the toxicity of sodium in sorghum and sunflower plants, improving ionic homeostasis in roots and sprouts and increasing the accumulation of dry matter. **Silicon**, 2020. (doi:10.1007/s12633-020-00449-7).

- INANAGA, S.; OKASAKA, A.; TANAKA, S. Does silicon exist in association with organic compounds in rice plant? **Soil Sci Plant Nutr.**, v.41, p.111-117, 1995.
- JAFAREI, Y.; TABRIZI, E. F. M.; BYBORDI, A. Effect of different stages and times of silicon foliar spray on yield and yield components of bean. **Cumhuriyet Science J.**, 36, 81-92, 2015.
- KALAJI, H. M.; GOVINDJE, E.; BOSA, K.; KOSCIELNIAK, J.; ZUK-GOŁASZEWSKAE, K. Effects of salt stress on photosystem II efficiency and CO₂ assimilation of two Syrian barley landraces. **Environ. Exp. Bot.**, v. 73, p. 64-72, 2011.
- KAYA, C, TUNA, L, HIGGS, D. Effect of Silicon on Plant Growth and Mineral Nutrition of Maize Grown Under Water-Stress Conditions, **J. Plant Nutr.**, n. 29, v. 8, p. 1469-1480, 2006. (doi: 10.1080/01904160600837238).
- KOETH, R. A.; WANG, Z.; LEVISON, B. S.; BUFFA, J. A.; ORG, E.; SHEEHY, B. T.; BRITT, E. B.; FU, X.; WU, Y.; LI, L. Intestinal microbiota metabolism of l-carnitine, a nutrient in red meat, promotes atherosclerosis, **Nat. Med.**, v. 19, p. 576–585, 2013.
- KURDALI, F.; AL-CHAMMAA, M.; AL-AIN, F. Growth and N₂-fixation in saline and/or water stressed *Sesbania aculeata* plants in response to silicon application. **Silicon**, v. 10, p. 1-8 2018. (doi:10.1007/s12633-018-9884-2).
- KOSTICL, N. N.; BOSNIC, D.; SAMARDZIC, J.; NIKOLIC, M. Silicon increases phosphorus (P) uptake by wheat under low P acid soil conditions. **Plant Soil**, p. 447–455, 2017. (doi: 10.1007/ s11104-017-3364-0).
- KRASKA, J. E.; BREITENBECK, G. A. Simple, robust method for quantifying silicon in plant Tissue. **Commun. Soil Sci. Plant.**, v. 41, p. 2075-2085, 2010.
- KIM, Y. H.; KHAN, A. L.; WAQAS, M.; SHAHZAD, R.; LEE, I. J. Silicon-mediated mitigation of wounding stress acts by up-regulating the rice antioxidant system. **Cereal Res. Commun**, v. 44, p. 111–121, 2016. (doi: 10.1556/0806.43.2015.031).
- KORNDÖRFER, GH. **Análise de silício: solo, planta e fertilizante**. Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, 2004.
- LICHTENTHALER, H. K. Chlorophylls and Carotenoids: Pigments of Photosynthetic Biomembranes. **Method. in Enzymol.**, v. 148, p. 350-382, 1987. (doi: 10.1016/0076-6879(87)48036-1).
- LIANG, Y. Effects of silicon on enzyme activity and sodium, potassium and calcium concentration in barley under salt stress. **Plant and Soil**, v. 209, p. 217, 1999. (doi: 10.1023/A:1004526604913).

- LIANG, Y.; SHEN, Q. R.; SHEN, Z. G.; MA, T. S. Effects of silicon on salinity tolerance of two barley cultivars. **J. Plant Nutr.**, v. 19, p. 73-183, 1996.
- LIANG, Y.; DING, R. X. Influence of silicon on microdistribution of mineral ions in roots of salt-stressed barley as associated with salt tolerance in plants. **Sci. China** (Series C), v. 45, p. 298-308, 2002.
- LIANG, Y. C.; SUN, W. C.; ZHU, Y. G.; CHRISTIE, P. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: A review. **Environ. pollut.**, n. 147, v. 2, p. 422-428, 2007. (doi:10.1016/j.envpol.2006.06.008).
- LIN, Z. H.; CHEN, L. S.; CHEN, R. B.; ZHANG, F. Z.; JIANG, H. X.; TANG, N. CO₂ assimilation, ribulose 1,5-bisphosphate carboxylase/oxygenase, carbohydrates and photosynthetic electron transport probed by the JIP-test, of tea leaves in response to phosphorus supply. **Plant Biology**, v. 9, p. 1-12, 2009.
- MAILLARD, A.; ALI, N.; SCHWARZENBERG, A.; JAMOIS, F.; YVIN, J. C.; HOSSEINI, A. S. Silicon transcriptionally regulates sulfur and ABA metabolism and delays leaf senescence in barley under combined sulfur deficiency and osmotic stress. **Environ. Exp. Bot.**, v. 155, p. 394-410, 2018.
- MALAVOLTA, E. **Abc da adubação**. São Paulo: Agronômica Ceres 1989, pp. 304.
- MANTOVANI, C.; PRADO, R. M.; PIVETTA, K. F. L. Silicon foliar application on nutrition and growth of Phalaenopsis and Dendrobium orchids. **Sci. Hortic.**, v. 241, v. 83-92, 2018. (doi:10.1016/j.scienta.2018.06.088).
- MARSCHNER P. Marschner's mineral nutrition of higher plants. London: Academic Press, 2012.
- MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. **Principles of plant nutrition**. 5.ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001, pp. 849.
- MITTLER, R. Abiotic stress, the field environment and stress combination. **Trends in Plant Science**, v. 11, p. 15-19, 2006.
- MIAO, B. H.; HAN, X. Z.; ZHANG, W. H. The ameliorative effect of silicon on soybean seedlings grown in potassium-deficient medium. **Ann Bot**, v. 105, p. 967-973, 2010.
- MIRANDA, R. S.; SUDÉRIO, F. B.; SOUSA, A. F.; GOMES FILHO, E. Nutritional deficiency in cowpea seedlings due to omission of macro and micronutrients. **Rev. Ciênc. Agron.**, n. 41, v. 3, p. 326-33, 2010. (doi: 10.1590/S1806-66902010000300002).
- PATHAK, MR, SILVA JAT, WANI SH. Polyamines in abiotic stress tolerance through transgenic approaches. **GM Crops & Food: Biotechnology in Agriculture and the Food Chain**, v. 5, p. 7-96, 2014.

- PAVLOVIC, J.; SAMARDZIC, J.; KOSTIC, L.; LAURSEN, K. H.; NATIC, M.; TIMOTIJEVIC, G.; SCHJOERRING, J. K.; NIKOLIC, M. Silicon enhances leaf remobilization of iron in cucumber under limited iron conditions. **Ann Bot**, v. 118, p. 271–280, 2016. (doi: 10.1093/aob/mcw105).
- PROSEUS, T. E.; BOYER, J. S. Pectate chemistry links cell expansion to wall deposition in *Chara corallina*. **Plant Signal. Behav.**, n. 7, v. 11, p. 1490–1492, 2012 (doi: 10.4161/psb.21777).
- PRADO, R. M. **Mineral nutrition of tropical plants**. Springer. 377, 2021. <https://www.springer.com/gp/book/9783030712617> 2021.
- PEREIRA, W. E.; SIQUEIRA, D. L.; MARTINEZ, C.; PUIATTI, M. Gas exchange and chlorophyll fluorescence in four citrus rootstocks under aluminium stress. **J. Plant Physiol.**, v. 157, p. 513-520, 2000.
- R Core Team (2017). R: A language and environment for statistical computing. R Found. Stat. Comput. Vienna, Austria, 2017.
- REPO-CARRASCO, R.; ESPINOZA, C.; JACOBSEN, S. Nutritional value and use of the andean crops quinoa (*Chenopodium quinoa*) and Kañiwa (*Chenopodium pallidicaule*). **Food Rev. Int.**, v. 19, p. 179–189, 2003. (doi:10.1081/FRI12001888>).
- ROHÁČEK, K. Chlorophyll fluorescence parameters: the definitions, photosynthetic meaning, and mutual relationships. **Photosynthetica**, v. 40, p. 13-29, (2002).
- SPEHAR, C. R.; ROCHA, J. E. S.; SANTOS, R. L. B. Desempenho agrônômico e recomendações para cultivo de quinoa (BRS Syetetuba) no cerrado. **Pesq. Agropec. Trop.**, v. 41, n. 1, p. 145-147, 2011.
- SILVA, E. B.; TANURE, L. P. P.; SANTOS, S. R.; RESENDE JÚNIOR, O, S. Sintomas visuais de deficiências nutricionais em pinhão-mansão. **Pesqui. Agropecu Bras.**, 2009. (doi: 10.1590/S0100-204X2009000400009).
- SILVA, G. F.; RESENDE, P. C.; FERREIRA, L. P.; OLIVEIRA, T.; SILVA, L. F. Aspectos morfoanatômicos de plantas de pepino (*Cucumis sativus* L.) sob omissão de nutrientes. **Rev. Verde**, v. 6, p. 13-20, (2011).
- SOARES, V.N.; COSTA, C.J.; BORGES, C.T.; GADOTTI, G.I.; MENEGHELLO, G.E.; VILLELA, F.A.; EICHOLZ, E.D. Produção de sementes de quinoa no sul do Brasil. Seminario Panamericano de Semillas, Guayaquil, Ecuador...**Anais...**, 2014.
- SUN, L.; TIAN, J.; ZHANG, H.; LIAO, H. **Phytohormone regulation of root growth triggered by P deficiency or Al toxicity**, 2016.

- TAIZ, L., ZEIGER, E. 2004. **Fisiologia Vegetal**. 3ed. Porto Alegre: ed. Porto Alegre: Artmed. P.719.
- TORABI, F.; MAJD, A.; ENTESHARI, S. The effect of silicon on alleviation of salt stress in borage (*Borago officinalis* L.). **Soil Sci. Plant Nut**, v. 61, p. 788–798, 2015. (doi: 10.1080/00380768.2015.1005540).
- TRIPATHI, D. K.; SINGH, S.; SINGH, V. P.; PRASAD, S. M.; DUBEY, N. K.; CHAUHAN, D. K. Silicon nanoparticles more effectively alleviated UV-B stress than silicon in wheat (*Triticum aestivum*) seedlings. **Plant Physiol. Biochem**, v. 110, p. 70–81, 2017. (doi: 10.1016/j.plaphy.2016.06.026).
- VASCONCELOS, E. S.; EGEWARTH, J. F.; OLIVEIRA, G. A.; PIANO, J. T. Características agronômicas de genótipos de quinoa. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 12, p. 371-376, 2013.
- YAMAMOTO, E. L. M.; FERREIRA, R. M. A.; FERNANDES, P. L. O.; ALBUQUERQUE, L. B.; ALVES, E. O. Função do cálcio na degradação da parede celular vegetal de frutos. **Rev. verde de agroec. e desen. sustentável**, v. 6, p. 49-55, 2011.
- ZUCCARINI, P. Effects of silicon on photosynthesis, water relations and nutrient uptake of *Phaseolus vulgaris* under NaCl stress. **Biol. Plant.**, v. 52, p. 157-160, 2008.
- VACULÍKOVÁ, M.; VACULÍK, M.; SIMKOVÁ, L.; FIALOVÁ; KOCHANOVÁ, Z.; SEDLÁKOVÁ, B.; LUXOVÁ, M. Influence of silicon on maize roots exposed to antimony – growth and antioxidative response. **Plant Physiol Bioch.**, v. 83, p. 279–284, 2014. (doi: 10.1016/j.plaphy.2014.08.014).
- WALSH, O. S.; SHAFIAN, S.; MCCLINTICK-CHESS, J. R.; BELMONT, K. M.; BLANSCET, S. M. Potential of Silicon Amendment for Improved Wheat Production. **Plants**, n. 7, v. 26, p. 1-13, 2018. (doi: 10.3390/plants7020026).
- XIE, Z.; SONG, F.; XU, H.; SHAO, H.; SONG, R. Effects of silicon on photosynthetic characteristics of maize (*Zea mays* L.) on alluvial soil. **Sci. World J.**, 201:1-6, (2014). (doi: 10.1155/2014/718716).