

SILÍCIO E SÓDIO AUMENTAM A QUALIDADE DA RÚCULA COM DEFICIÊNCIA EM POTÁSSIO

EL SILICIO Y EL SODIO AUMENTAN LA CALIDAD DE LA ARUGULA CON CARENCIA DE POTASIO

SILICON AND SODIUM INCREASE THE QUALITY OF AROCLA WITH POTASSIUM DEFICIENCY

Deyvielen Maria Ramos Alves¹; Renato de Mello Prado²; Rafael Ferreira Barreto³

DOI : <https://doi.org/10.31692/IICIAGRO.0010>

RESUMO

Os fertilizantes potássicos provêm de fontes não renováveis sujeitas a escassez. Uma alternativa para a redução da adubação de potássio (K) é o uso de elementos que atenuem danos causados pela deficiência desse macronutriente e aumentem a sua eficiência de uso. Apesar do sódio (Na) e do silício (Si) serem relatados como benéficos para as plantas deficientes em K, a relação destes com a nutrição e a qualidade de hortaliças folhosas como a rúcula ainda é desconhecida. Nesse estudo, objetivamos verificar os efeitos do Na e do Si sobre parâmetros nutricionais, fisiológicos, de crescimento e de qualidade da rúcula em condições de deficiência e de suficiência de K. O experimento foi desenvolvido em casa de vegetação em sistema hidropônico com fornecimento de solução nutritiva para plantas cultivadas em areia como substrato. Os tratamentos foram: suficiência de K (+K), suficiência de K mais Na (+K +Na), suficiência de K mais Si (+K +Si), deficiência de K (-K), deficiência de K mais Na (-K +Na) e deficiência de K mais Si (-K +Si) dispostos em delineamento inteiramente casualizado, com seis repetições. Foram realizadas avaliações de aspectos fisiológicos, bioquímicos e de crescimento das plantas de rúcula. A oferta de Si aumentou a produção de compostos não-enzimáticos: fenóis totais, ácido ascórbico e carotenoides das plantas com deficiência de K. O Na aumentou os conteúdos de clorofila total e a eficiência quântica do fotossistema II de plantas com deficiência de K. O Si na solução nutritiva deficiente em K se destacou em comparação ao Na para o aumento da eficiência de uso de K. Os dois elementos atenuaram os danos causados pela deficiência de K e melhoraram a qualidade da rúcula. Contudo, o Si atenuou todos os danos causados pela deficiência de K, por conta disso, entre Na e Si, preferível que o Si seja ofertado para as plantas de rúcula deficiente em K constituindo estratégia inovadora para o cultivo sustentável desta espécie.

Palavras-Chave: nutrição de plantas, elemento benéfico, *Eruca sativa* Mill.

RESUMEN

Los fertilizantes potásicos provienen de fuentes no renovables sujetas a escasez. Una alternativa para reducir la fertilización con potasio (K) es el uso de elementos que mitiguen el daño causado por la deficiencia de este macronutriente y aumenten su eficiencia de uso. Aunque se reporta que el sodio (Na) y el silicio (Si) son beneficiosos para las plantas con deficiencia de K, aún se desconoce su relación con la nutrición y la calidad de los vegetales de hojas como la rúcula. En este estudio se tuvo como objetivo verificar los efectos del Na y Si sobre parámetros nutricionales, fisiológicos, de crecimiento y de calidad de la rúcula en condiciones de deficiencia y suficiencia de K. El experimento se realizó en invernadero en un sistema hidropónico con aporte de K nutritivo para plantas cultivadas en arena como sustrato. Los tratamientos fueron: suficiencia de K más Na (+K), suficiencia de K más Na (+K +Na), suficiencia de K más Si (+K +Si), deficiencia de K (-K), deficiencia de K más Na (-K + Na) y deficiencia de K más Si

¹ Mestranda, FCAV/Unesp, deyvielen.alves@unesp.br

² Docente, FCAV/Unesp, rmprado@unesp.br

³ Docente, UFMS/Chapadão do Sul, rafael.barreto@ufms.br

(-K +Si) dispuestas en un diseño completamente al azar, con seis repeticiones. Se realizaron evaluaciones de aspectos fisiológicos, bioquímicos y de crecimiento de plantas de rúcula. El suministro de Si incrementó la producción de compuestos no enzimáticos: fenoles totales, ácido ascórbico y carotenoides en plantas deficientes en K. Na incrementó el contenido total de clorofila y la eficiencia cuántica del fotosistema II en plantas deficientes en K. El Si en la solución nutritiva deficiente en K se destacó en comparación con Na para aumentar la eficiencia en el uso de K. Ambos elementos atenuaron el daño causado por la deficiencia de K y mejoraron la calidad de la rúcula. Sin embargo, el Si atenuó todo el daño causado por la deficiencia de K, por lo que, entre Na y Si, es preferible ofrecer Si a las plantas de rúcula deficientes en K, constituyendo una estrategia innovadora para el cultivo sustentable de esta especie.

Palabras Clave: nutrición vegetal, elemento beneficioso, *Eruca sativa* Mill.

ABSTRACT

Potassium fertilizers come from non-renewable sources subject to scarcity. An alternative for reducing potassium (K) fertilization is the use of elements that mitigate the damage caused by the deficiency of this macronutrient and increase its use efficiency. Although sodium (Na) and silicon (Si) are reported to be beneficial for plants deficient in K, their relationship with the nutrition and quality of leafy vegetables such as arugula is still unknown. In this study, we aimed to verify the effects of Na and Si on nutritional, physiological, growth and quality parameters of arugula under conditions of K deficiency and sufficiency. The experiment was carried out in a greenhouse in a hydroponic system with supply of K nutrient for plants grown in sand as a substrate. The treatments were: K plus Na sufficiency (+K), K plus Na sufficiency (+K +Na), K plus Si sufficiency (+K +Si), K deficiency (-K), K plus Na deficiency (-K +Na) and K plus Si deficiency (-K +Si) arranged in a completely randomized design, with six replications. Evaluations of physiological, biochemical and growth aspects of arugula plants were carried out. Si supply increased the production of non-enzymatic compounds: total phenols, ascorbic acid and carotenoids in K-deficient plants. Na increased total chlorophyll contents and photosystem II quantum efficiency in K-deficient plants. Si in the K-deficient nutrient solution stood out compared to Na for increasing K-use efficiency. Both elements attenuated the damage caused by K deficiency and improved arugula quality. However, Si attenuated all the damage caused by K deficiency, therefore, between Na and Si, it is preferable that Si be offered to arugula plants deficient in K, constituting an innovative strategy for the sustainable cultivation of this species.

Keywords: plant nutrition, beneficial element, *Eruca sativa* Mill.

INTRODUÇÃO

O potássio (K) é um recurso essencial para garantir altas produtividades agrícolas e a segurança alimentar. Porém, a diminuição das reservas de sais de K e o aumento do preço das fontes indicam preocupações com um cenário de escassez, principalmente em países que dependem da importação de fertilizantes potássicos (SIPERT; NASCIMENTO, 2020) e a ocorrência de guerras como da Ucrânia induz mais instabilidades no mercado mundial dos fertilizantes. O K está presente em funções vitais dos seres vivos (BRITTO et al., 2021; Johnson et al., 2022). Nas plantas, apesar de não desempenhar função estrutural, o K participa na conformação de moléculas aumentando a exposição aos sítios ativos, além de promover a regulação osmótica, a expansão e o turgor das células (PRADO, 2021).

As hortaliças são alimentos importantes para a segurança alimentar por apresentarem um alto valor nutricional (ROUPHAEL et al. 2018), pois contém diversos minerais essenciais

para a saúde humana e compostos antioxidantes (KU et al., 2016), a exemplo dos compostos fenólicos e ácido ascórbico. Diante da importância do K nesta espécie novas alternativas têm sido discutidas para aumentar a eficiência de uso deste elemento pelas plantas e ao mesmo tempo atender sua demanda nutricional. No entanto, o desafio é que isso precisa ocorrer em condição de uma menor oferta de K e essa nova abordagem vem sendo pesquisadas a partir do uso de elementos benéficos como o sódio (Na) (BARRETO et al. 2022) e o silício (Si) (CHEN et al. 2016).

O Na tem sido relatado como um elemento atenuador de deficiência de K para algumas espécies vegetais, ou seja, na oferta reduzida de K, o Na exerce algumas das funções do K, como a osmose nos vacúolos celulares (KRONZUCKER et al., 2013). No entanto, em condições de suficiência de K e presença do Na, podem ocorrer danos no metabolismo como a diminuição de pigmentos fotossintéticos e da área foliar, e conseqüentemente da massa seca das plantas de couve (BARRETO et al., 2022), mas faltam pesquisas em outras espécies pois o fator genético afeta a tolerância das plantas ao Na (PRADO, 2021).

Nesse contexto, o Si também tem sido relatado na literatura como um elemento benéfico para plantas (LIANG et al., 2015), desses benefícios, tem-se a participação no ajuste da regulação osmótica (AHIRE et al., 2021) uma das funções desempenhada pelo K (KUMAR et al., 2020; Prado, 2020). Além de possibilitar a eficiência do uso de nutrientes em plantas, como o uso eficiente do K (BARRETO et al., 2022).

Para avançar nas pesquisas para maior compreensão da sinergia ou não do K especialmente em sub-dose com elementos benéficos para cultivo mais eficiente e sustentável da rúcula é importante ter respostas para algumas hipóteses como: i) o uso de Na e de Si na solução nutritiva atenuam os sintomas da deficiência de K em rúcula, em especial o Si, devido a sua atuação em maior intensidade nos processos fisiológicos da planta; ii) na rúcula em condição de suficiência nutricional de K, o acréscimo de Si na solução nutritiva seja indiferente e o de Na já prejudica o crescimento das plantas. Para testar essas hipóteses foi realizada essa pesquisa objetivando-se verificar os efeitos do Na e do Si nanoparticulado sobre os aspectos nutricionais, fisiológicos e de crescimento e de qualidade da rúcula em condições de deficiência e de suficiência de K.

REFERENCIAL TEÓRICO

A rúcula apresenta em sua composição diversos minerais essenciais para a saúde humana, além destes nutrientes apresenta uma quantidade de carboidratos e lipídeos relevantes, assim como compostos antioxidantes como fenóis e vitamina C (KU et al., 2016). No entanto,

a adubação potássica influência diretamente no incremento desses compostos (LOMBARDO et al., 2015).

A diminuição do uso do K nos cultivos tem implicações ambientais, pois, provém de um recurso natural não renovável e econômicas dado elevado custo dos fertilizantes devido a pouca oferta, visto que existem poucos países produtores desse nutriente no mundo e com surgimento de instabilidades geopolíticas pode agravar sua disponibilidade no mercado (SOUMARE et al., 2022).

O Na é um elemento benéfico para as plantas, pois, em baixas concentrações seus efeitos benéficos são evidenciados (ROUPHAEL et al., 2018). Nesse contexto, existe uma classificação quanto a tolerância à salinidade em que plantas que toleram altas concentrações de Na são ditas como halófitas (FLOWERS; COLMER, 2015) e as que são sensíveis à salinidade são classificadas como glicófitas (BARROS et al., 2021), estando entre glicófitas a rúcula, pois em altas concentrações de sais ($> 200 \text{ mol.L}^{-1} \text{ NaCl}$) têm-se a redução da matéria seca das plantas (PETRETTO et al., 2019).

Estudos recentes indicam que o Si em fontes convencionais como silicato de potássio ou silicato de sódio atenua deficiência de K em plantas de quinoa (SALES et al., 2021), em forrageiras (BUHELDT et al., 2020), feijão (SARAH et al., 2021) e milho (SARAH et al., 2022), mas ainda não foi estudado em rúcula e especialmente com fontes inovadoras do Si como nanosilica. As nanopartículas de sílica podem permitir uma maior absorção do Si pelas plantas quando comparadas a sílica não nanoparticuladas (RASTOGI et al., 2019), pois, baixas concentrações de nano partículas de dióxido de silício (SiO_2) possibilitam um bom crescimento e desenvolvimento de plantas (KARIMI; MOHSENZADEH, 2016). Isso ocorre porque materiais nanoparticulados apresentam um tamanho menor de partículas que os convencionais, permitindo que as plantas absorvam de forma rápida pelo aumento da superfície de contato e reatividade das partículas (SIDDIQUI et al., 2020).

METODOLOGIA

O experimento foi desenvolvido em sistema hidropônico com uso de areia lavada com substrato na casa de vegetação da Universidade Estadual Paulista, Campus de Jaboticabal, Brasil, no período de abril a agosto de 2022.

A semeadura de rúcula (*Eruca sativa* Mill.) cultivar cultivada foi realizada com vinte sementes por vaso a 0,5 cm de profundidade. Posteriormente, aos doze dias após a semeadura, o raleio foi realizado mantendo dez plantas por vaso. Durante o período experimental, a temperatura e a umidade relativa do ar na casa de vegetação foram monitoradas e registradas

diariamente após a emergência das plantas com auxílio de um sensor termo-higrômetro. A variação de temperatura do ar dentro da casa de vegetação foi de máxima 49.3°C, mínima 7° C e média de 27.3°C. A umidade relativa do ar variou de máximo 90%, mínimo 32% e média 50.6%.

Os tratamentos foram fornecidos com a aplicação da solução nutritiva via substrato. Foi utilizada a solução de Hoagland e Arnon (1950), diluída a 50% e com modificações, conforme os tratamentos (Tabela 1).

Tabela 1. Composição da solução nutritiva com os tratamentos estudados

Fertilizantes Mol L ⁻¹	+K -Na	+K + Na	- K +Na	-K -Na	+K +Si	-K +Si
	mL L ⁻¹					
KH ₂ PO ₄	0.5	0.5	-	-	0.5	-
MgSO ₄ 7H ₂ O	-	-	1.0	1.0	-	1.0
KCl	2.5	2.5	1.5	1.5	2.5	1.5
NH ₄ H ₂ PO ₄	-	-	0.5	0.5	-	0.5
NH ₄ NO ₃	-	-	1.0	1.0	-	1.0
(NH ₄) ₂ SO ₄	1.0	1.0	-	-	1.0	-
MgNO ₃ 6H ₂ O	1.0	1.0	-	-	1.0	-
NaCl	-	2.0	2.0	-	-	-
Ca(NO ₃) ₂ 4H ₂ O	2.25	2.25	2.5	2.5	2.25	2.5
CaCl ₂ 2H ₂ O	0.25	0.25	-	-	0.25	-
SiO ₂ Nano	-	-	-	-	0.33	0.33
Micronutrientes*	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Fe-EDDHA**	1	1	1	1	1	1

(*) Em 1L: 2.86 g H₃BO₃; 1.81 g MnCl₂.4H₂O; 0.22 g ZnSO₄.7H₂O; 0.04 g CuCl₂; 0.02 g H₂MoO₄H₂O.

(**) Fe-EDDHA com 6% de Fe (83.33 g L⁻¹).

Elaboração da solução nutritiva

A solução nutritiva foi preparada com água deionizada, a qual apresentava o valor pH próximo à neutralidade. Após o preparo da solução nutritiva, o valor pH era corrigido para 5,5-6,0 com solução de ácido clorídrico. Esta solução foi adicionada com o cuidado para não diminuir o pH para valores inferiores a 5,5.

Delineamento experimental e tratamentos

O experimento foi conduzido em delineamento inteiramente casualizado, com seis tratamentos e seis repetições. Duas vezes por semana, os vasos foram trocados de posição de forma aleatória como medida preventiva para evitar possíveis influências mínimas de intensidade luminosa provocado pela estrutura da casa de vegetação (BANZATO E KRONKA,

2013).

Os tratamentos foram: suficiência de K (+K), suficiência de K mais Na (+K +Na), suficiência de K mais Si (+K +Si), deficiência de K (-K), deficiência de K mais Na (-K +Na) e deficiência de K mais Si (-K +Si). A concentração de K nos tratamentos com +K e -K foi de 3,0 mmol L⁻¹ e 1,5 mmol L⁻¹, respectivamente.

A concentração de 3,0 mmol L⁻¹ foi definida considerando-se 50% da recomendação de Hoagland e Arnon (1950), que resultou em bom desenvolvimento das plantas de feijão-vagem (Osório et al. 2020). A metade dessa concentração, isto é, 1,5 mmol L⁻¹ foi utilizada para induzir a deficiência de K, 18 dias após a emergência da planta. Anterior a isso, as plantas receberam 1,0 mmol L⁻¹ de K. Nos tratamentos com o Na, foi utilizada a concentração de 2 mmol L⁻¹. Essa concentração foi definida por atenuar a deficiência de K em plantas de couve (Barreto et al. 2022). Nos tratamentos com Si, a concentração foi de 2,0 mmol L⁻¹. Essa concentração foi escolhida por ter atenuado a deficiência de K em plantas de manjeriço e de milho (BARRETO et al. 2022; SARAH et al. 2021).

A fonte de Si foi a nanossílica (Si: 168,3 g L⁻¹; área superficial específica: 300 m² g⁻¹; pH: 10,5; densidade: 1,2 g cm⁻³; Na₂O: 0,5%; viscosidade: 7 centi Poise - cP).

Avaliações de crescimento

As amostras da parte aérea foram coletadas e obtidas a massa fresca em balança analítica de precisão. A parte aérea e as raízes das plantas foram coletadas e lavadas em água contendo detergente neutro (0,1%), solução de ácido clorídrico (0,3%) e água deionizada, secas em estufa de circulação forçada (65±5°C) até atingirem a massa constante para a obtenção da matéria seca da parte aérea e das raízes.

Avaliações de elementos químicos

As amostras da parte aérea foram moídas em moinho tipo Wiley (Modelo MA 340) (MARCONI, Brasil) e utilizadas para determinar os teores de K, Na e Si. Os teores de Si foram obtidos conforme Kraska e Breitenbech (2010) e a leitura realizada no espectrofotômetro no comprimento de onda 420nm. A análise dos teores de K e do Na foi de acordo com Bataglia et al. (1983). Após análise química dos elementos, o acúmulo foi calculado, considerando o teor de K, Na e Si e a massa seca da parte aérea das plantas.

Eficiência quântica do fotossistema II (Fv/Fm)

Uma folha completamente desenvolvida de cada planta foi adaptada ao escuro e intensidade de saturação de 3.500 µmol com auxílio de grampos acessórios por um período de trinta minutos. Com o auxílio do fluorômetro portátil (Os30P+, Opti-Sciences Inc., USA) foram realizadas as medições da fluorescência mínima para excitação da clorofila (F0) e da

fluorescência máxima da excitação da clorofila (Fm) que originam a fluorescência variável (Fv), com esses resultados foi possível obter a eficiência máxima do fotossistema II, resultante da razão da Fv por Fm (Lichtenthaler et al., 2005).

Determinação de ácido ascórbico

Amostras de folhas foram coletadas e colocadas imediatamente em banho de gelo. Após a coleta, obteve-se a massa das amostras em balança analítica de precisão. Em seguida, foram maceradas em almofariz e adicionados 5,0 mL de ácido oxálico (0,5%) em $\pm 15^{\circ}\text{C}$ até homogeneizar, após homogêneo, adicionado mais 5 mL de ácido oxálico (0,5%) e filtrado com papel filtro em um Becker.

O extrato filtrado foi quantificado em triplicata, retiraram-se 1,0 mL do extrato e adicionamos 4,0 mL de ácido oxálico (0,5%) filtrado. Assim que homogeneizados, foram tituladas com DFI – 2,6 dicloro – fenol indofenol a 0,02% (Solução de Tilman) até o ponto de viragem uma coloração róseo-claro. O cálculo do conteúdo de ácido ascórbico e a metodologia descrita está conforme Strohecker e Henning (1967).

Fenóis totais

Coletaram-se 0,1 g da matéria fresca, considerando-se as folhas totalmente desenvolvidas. As amostras foram inseridas em tubos de ensaio de 15 mL, com 5 mL total de metanol. Os tubos estavam cobertos com papel alumínio e permaneceram em repouso no escuro em temperatura ambiente ($\pm 25^{\circ}\text{C}$) durante 3 horas.

Após esse período foi realizada uma reação colorimétrica, utilizando 1 mL do extrato filtrado da amostra, acrescido de 10 mL de água deionizada e 0,5 mL de Folin–Ciocalteu (2N), posteriormente, manteve-se em repouso por 3 minutos. Sequencialmente, foi adicionado 1,5 mL de carbonato de sódio a 20% e mantido por 2 horas em temperatura ambiente. Depois de 2 horas com auxílio de espectrofotômetro (B442) as leituras foram realizadas no comprimento de onda de 765 nanômetros (nm). Os resultados foram calculados como Equivalente Ácido Gálico (EAG), dado em g EAG 100 g⁻¹. Os procedimentos estão de acordo com Singleton e Rossi, 1965.

Quantificação de clorofila e carotenoides

Discos foliares de folhas verdes maduras foram coletadas das plantas e adicionados a um tubo com 1,5 mL de solução de acetona a 80%, armazenado em local sem iluminação e refrigerado. Após a despigmentação completa dos discos, com auxílio de espectrofotômetro (DU 640, Beckman, EUA) e metodologia proposta por Lichtenthaler (1987), realizaram-se as releituras em 663 nanômetros (nm) para a clorofila a, 647 nm para clorofila b e 470 nm para carotenoides.

Índice de firmeza das folhas

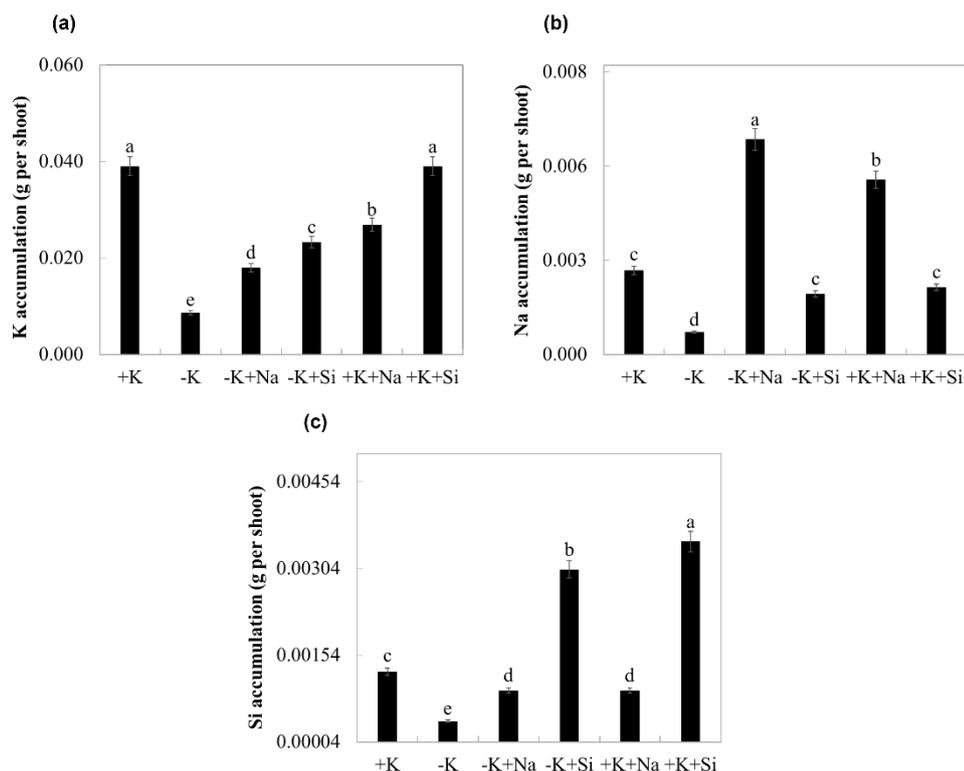
Foi coletada a terceira folha totalmente expandida da rúcula e as medições foram realizadas em três pontos próximos ao centro no limbo foliar e evitada a nervura principal (CALBO et al. 2010). Para isso, o equipamento utilizado foi o penetrômetro digital de 5 a 200 Newton (N) com precisão de ± 1 N (Impac, Modelo IP-90DI, São Paulo, SP, Brasil) com ponteira de 8mm.

Forma de análise dos resultados

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade e homogeneidade das variâncias, atenderam aos pressupostos de distribuição normal, foram submetidos a análise de variância e realizado teste t (LSD) de comparação de médias a 5% de probabilidade ($p < 0,05$) no software estatístico R, versão 4.1.0 (TEAM, 2022) com uso do pacote Exp.Des.pt 1.2.0 (FERREIRA et al. 2018).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

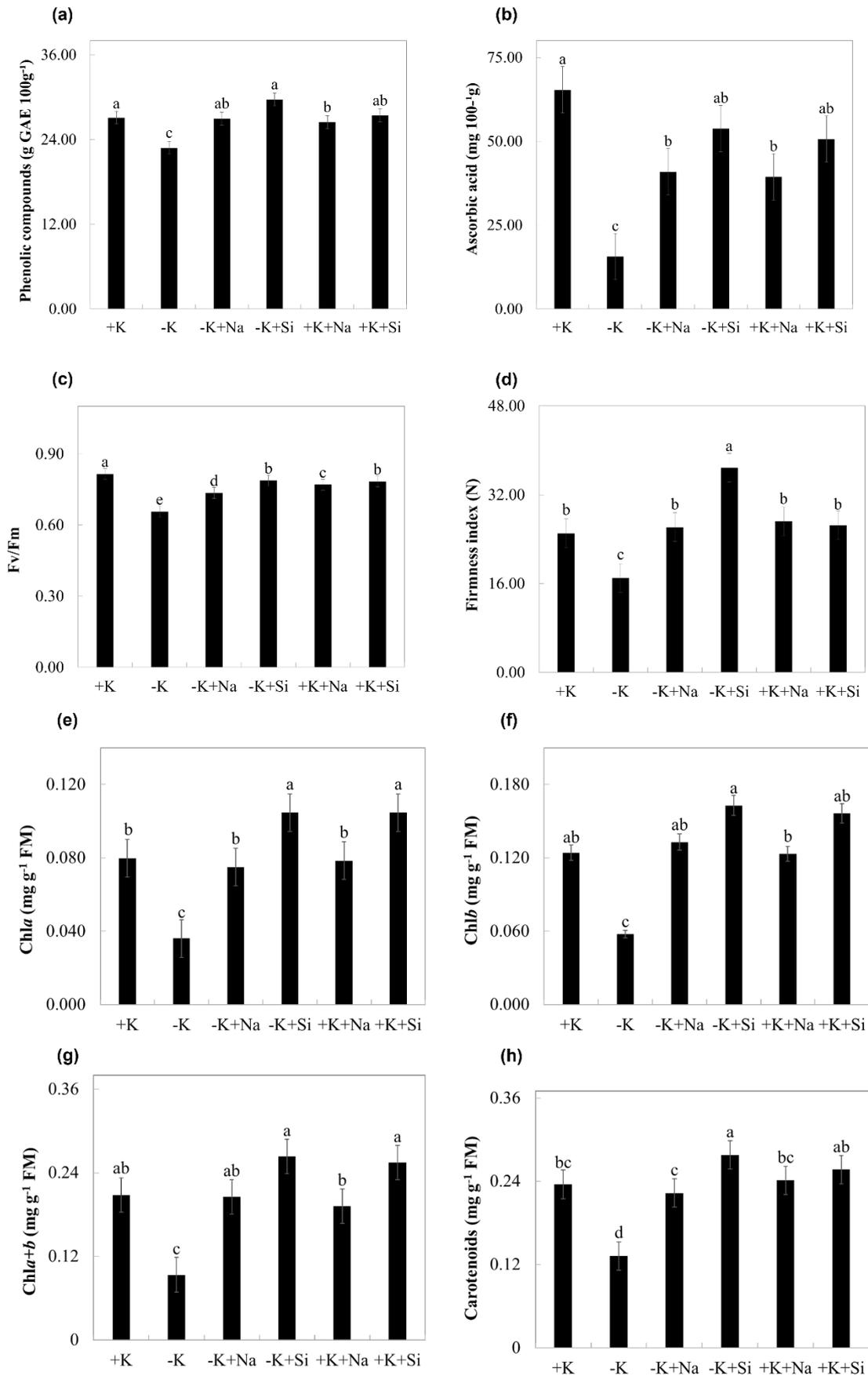
A quantidade de um nutriente na planta se refere ao acúmulo (PRADO, 2021). Assim, conforme esperado, evidenciou-se que a deficiência de K na solução nutritiva resultou em diminuição do acúmulo de K na parte aérea. No entanto, as plantas com deficiência de K quando ofertado o Na e o Si apresentaram o aumento do acúmulo desse nutriente (Fig. 1). Uma possível explicação para esse resultado com o fornecimento do Si, pode estar associado com o papel que o Si desempenha na sinalização de mecanismos de estresse levando a maior concentração do macronutriente no xilema (ALI et al. 2020). O aumento do acúmulo de K pela oferta do Na com menos K pode ter ocorrido por esse elemento ter favorecido a maior absorção do macronutriente (BRITTO et al. 2021) pelo canal de maior afinidade, ao ativar o carregador HKT1 nas raízes (RUBIO et al. 1995).



Fonte: Própria (2023)

Figura 01: Acúmulo de K (a), acúmulo de Na (b) e acúmulo de Si na parte aérea (c) da rúcula cultivada na suficiência de K (+K), deficiência de K (-K), deficiência de K mais Na (-K +Na), deficiência de K mais Si (-K +Si), suficiência de K mais Na (+K +Na) e suficiência de K mais Si (+K +Si). Letras diferentes indicam diferenças entre os tratamentos pelo teste t (LSD) a 5% de probabilidade ($p < 0,05$). As barras representam o erro padrão da média.

Os compostos antioxidantes como fenóis totais e ácido ascórbico atuam nas células contra a ação de espécies reativas de oxigênio (ERO) e peroxidação lipídica, consequentemente auxiliam na manutenção da integridade celular (SHARMA et al. 2019). O incremento de compostos fenólicos e ácido ascórbico nas plantas deficientes de K na presença do Si (Fig.2 a, b) pode ser compreendido devido esse elemento ter sua maior evidência em condição estressante, como as plantas deficientes em K, atuando na biossíntese do antioxidante fenol (LUYCKX et al. 2017) e aumento do ácido ascórbico quando há estresse oxidativo (SANTOS et al. 2022; SOUZA et al. 2019).



Fonte: Própria (2023)

Figura 02: Fenóis totais (a), ácido ascórbico (b), eficiência quântica do fotossistema II (c, Fv/Fm) e índice de

firmeza das folhas (d), clorofila a (Chla, e), clorofila b (Chlb, f) clorofila total a+b (Chla+b, g), carotenoides (h) de rúcula cultivada na suficiência de K (+K), deficiência de K (-K), deficiência de K mais Na (-K +Na), deficiência de K mais Si (-K +Si), suficiência de K mais Na (+K +Na) e suficiência de K mais Si (+K +Si). Letras diferentes indicam diferenças entre os tratamentos pelo teste t (LSD) a 5% de probabilidade ($p < 0,05$). As barras representam o erro padrão da média.

O acréscimo dos pigmentos fotossintetizantes (Fig. 2e,f,g,h) e também da Fv/Fm pela presença do Na na solução nutritiva com menos K (Fig. 2c), pode ter possibilitado a maior biossíntese de ácido ascórbico (Fig. 2b) por este composto estar associado a fotossíntese (ISHIKAWA et al. 2006), processo que promove o metabolismo de carboidratos disponibilizando no citosol precursores como a frutose-6-fosfato uma hexose necessária para início da biossíntese de ácido ascórbico na planta (ASENSI-FABADO; MUNNE-BOSCH, 2010).

Cabe destacar que a eficiência fotoquímica das plantas vem sendo mensurada por meio da fluorescência da clorofila resultante do rendimento quântico máximo para o fotossistema II (PSII) por meio das razões Fv/Fm (LICHTENTHALER et al., 2005), que são descritas com uma faixa adequada compreendidas entre 0,7 a 0,9 (ROHÁČEK, 2002). As rúculas cultivadas com deficiência de K apresentaram redução da Fv/Fm (0,65) quando comparadas às suficientes em K (0,82), apesar disso, o fornecimento do Na e do Si para as plantas com menos K proporcionaram o aumento de 14% e 22%, respectivamente (Fig. 2c), reforçando que houve melhoria relevante da eficiência quântica do fotossistema II (ROHÁČEK, 2002).

A firmeza das folhas de rúcula selvagem foi relatada como um dos atributos relacionado a alta qualidade da espécie cultivada em sistema hidropônico (BONASIA et al. 2017). Curiosamente, nossos achados apresentaram o maior índice de firmeza nas folhas de rúcula cultivada na condição de deficiência de K e oferta do Si (Fig. 2d). No entanto, a rúcula pertence à família Brassicaceae relatadas como baixa acumuladora de Si ($> 0,2\%$), mas a maior quantidade do Si é encontrada nas folhas de diferentes espécies, sem considerar as classificações quanto absorção do elemento (DESHMUKH et al. 2020) e isso se deve possivelmente a fonte Nanosilica utilizada que favoreceu a absorção do Si conforme comentado anteriormente. Entretanto, a firmeza ou dureza de folhas é descrita em espécies que acumulam o Si e estão associadas à deposição da sílica na parede celular ou entre a parede celular e a cutícula (EPSTEIN, 2009), mas essa deposição ainda é uma lacuna em plantas com baixo acúmulo do Si. Apesar disso, repolho, uma espécie também da família Brassicaceae, com deficiência em cálcio e suplementadas com o Si, teve aumento da firmeza das folhas (SILVA et al. 2021), fato também visto em folhas de alface que receberam o Si na solução nutritiva e

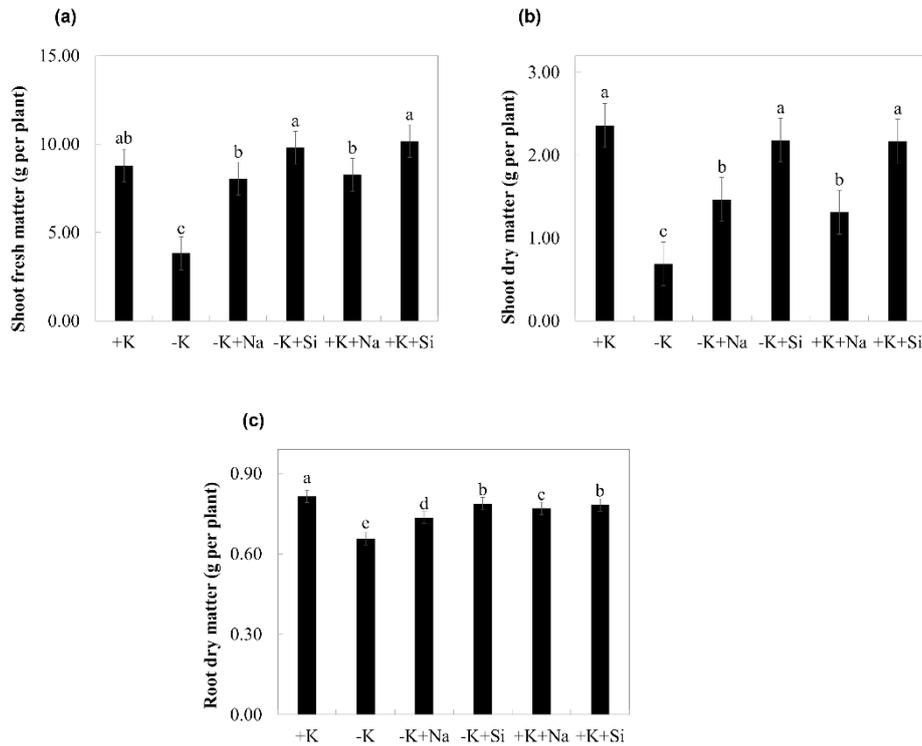
ainda esteve associada a redução da transpiração e o aumento da turgidez das células (GALATI et al. 2015). Portanto, é notório que existe uma lacuna que precisa ser compreendida de como o Si atua no metabolismo da planta para garantir a firmeza ou dureza das folhas, como já tem sido apontado por Tombeur et al. (2022), especialmente em espécies não acumuladoras do elemento.

A deficiência de K promove danos nas membranas internas das clorofilas (JOHNSON et al. 2022), ocasionando a desestruturação das lamelas de granum e dos estromas, consequentemente danificando a integridade e a funcionalidade dos cloroplastos (TRÄNKNER et al. 2018). Além disso, alto conteúdo de ERO nas plantas são descritos em condição de baixo suprimento de K (JOHNSON et al. 2022) e estão associadas a oxidação e danos em membranas (MITTLER et al. 2022). Embora a rúcula com menos K tenha apresentado redução dos pigmentos fotossintetizantes, ao fornecer o Na e o Si na solução nutritiva para essas plantas houve o aumento da clorofila a, b e dos carotenoides (Fig. 2e,f,g,h). Portanto, na presença de Si podemos compreender esses aumentos com o auxílio desse elemento em mecanismos contra ERO, que podem diminuir danos nas membranas dos tilacoides e proporcionar melhorias na transferência de elétrons entre os fotossistemas (RASTOGI et al. 2021). E na deficiência de K com oferta do Na, esse aumento pode ser explicado devido o auxílio desse elemento na síntese das clorofilas, apesar dessa função estar descrita para espécies C4 (WAKEEL et al. 2011), mas ainda requer investigações para outros metabolismos de plantas e em condição de deficiência de K.

Em plantas com deficiência de K a diminuição do crescimento e do desenvolvimento ocorre por diversos fatores como a diminuição da produção de fotoassimilados por consequência de danos no metabolismo (PETTIGREW, 2008), como efeitos deletérios na fotossíntese (RAWAT et al. 2022). No entanto, ficou evidente que na presença do Na e do Si na solução nutritiva com menos K houve aumento no crescimento das plantas (Fig. 3), associado com o aumento das variáveis: fenóis, ácido ascórbico, Fv/Fm, pigmentos fotossintetizantes, no presente estudo (Fig. 2 e 3) e conforme indicado por Dhakate et al. (2022).

A rúcula é uma hortaliça consumida principalmente como salada fresca devido seu alto teor nutricional (TASSI et al. 2018; GATO et al. 2023). Portanto, os danos causados no metabolismo das plantas deficientes em K ocasionaram a redução do produto comercial da hortaliça, a massa fresca das plantas (Fig. 3a), assim como diminuiu a massa seca da parte aérea e raízes (Fig. 3b, c) e isso refletiu em sintomas característicos na planta. Os sintomas visuais de deficiência de K como clorose na ponta das folhas que evoluem para necroses na margem, por conta da redução da quantidade do macronutriente no ápice do limbo foliar em comparação

com a base (UENO et al. 2018).



Fonte: Própria (2023)

Figura 03: Massa fresca da parte aérea (a), massa seca da parte aérea (b) e massa seca da raiz (c) de rúcula cultivada na suficiência de K (+K), deficiência de K (-K), deficiência de K mais Na (-K +Na), deficiência de K mais Si (-K +Si), suficiência de K mais Na (+K +Na) e suficiência de K mais Si (+K +Si). Letras diferentes indicam diferenças entre os tratamentos pelo teste t (LSD) a 5% de probabilidade ($p < 0,05$). As barras representam o erro padrão da média.

Apesar dos prejuízos da deficiência de K na rúcula, mas quando ofertado o Na e o Si para as plantas com essa condição, foi observado melhorias fisiológicas e nutricionais discutidas anteriormente e conseqüentemente incrementou a biomassa das plantas constituindo primeiro relato para o cultivo sustentável desta hortaliça.

Cabe destacar ainda que em plantas de rúcula cultivada com a suficiência de K com oferta de Na em relação a planta com a suficiência de K causou danos na planta ao diminuir processo de absorção e eficiência de uso do K pela planta e conseqüentemente compostos antioxidantes, Fv/Fm e a produção de massa seca da planta. Pode ter havido efeito salino dado os prejuízos fisiológicos indicados (HURTADO et al., 2020) e essa espécie pode ser pouco tolerante a esse efeito. No entanto, o acréscimo de Si em plantas com solução nutritiva suficiente de K não prejudicou, mas não favoreceu a absorção e a eficiência de uso do K e a produção de massa seca da planta. Portanto, descobrimos que o fornecimento do Na é bem mais danoso que o Si e não justifica o uso destes elementos para o cultivo desta espécie na situação ótima para o K.

De forma geral as perspectivas futuras desta pesquisa contemplam muitos benefícios práticos para sistema de produção desta hortaliça. É possível cultivo da rúcula com aumento da receita líquida do produtor por diminuir uso do K a partir da adoção do uso de elementos benéficos Na e Si e ainda com ganhos ambientais preservando mais as jazidas de K e sem perdas na produção comercial de massa fresca da cultura comparado as plantas com suficiência de K. É possível ainda ampliar o benefício especialmente na opção do uso do Si pois aumentou a rigidez do tecido foliar e isso pode implicar na melhoria na qualidade pós-colheita da rúcula pois pode diminuir a perda de água do tecido vegetal aumentando tempo para comercialização visto em acelga e couve por Souza et al., (2019), fatos que precisam serem investigados em outras espécies. A melhoria nutricional da rúcula com menos K sob aplicação de Si deve refletir na saúde humana de diferentes formas como aumento de compostos antioxidantes, a biofortificação de Si por ser um nutriente para nutrição humana e especificamente para a saúde de pacientes com doença renal crônica que segundo Kelly et al. (2017) exigem dietas com restrição ao K.

CONCLUSÕES

Ao fornecer o Na e principalmente o Si na solução nutritiva para plantas com deficiência de K é possível aumentar o acúmulo e a eficiência de uso do K. O uso dos elementos benéficos, especialmente Si, possibilita a atenuação dos danos no metabolismo das plantas causados pela deficiência de K, a exemplo do aumento dos compostos antioxidantes que atuam na proteção das plantas como fenóis e ácido ascórbico, aumento da Fv/Fm e dos pigmentos fotossintetizantes. Além disso, mantêm a qualidade do alimento, mesmo com baixa concentração de K, como o uso do Si que aumentou a firmeza das folhas, a massa fresca, os compostos fenólicos e compostos que fazem parte de vitaminas importantes para saúde humana como ácido ascórbico, da vitamina C e carotenoides provitamina A.

A pesquisa propõe que é viável o cultivo de rúcula com menor oferta de K quando suplementado com o Si, mas não recomenda a inclusão destes elementos em sistema de produção com adequada oferta de K.

REFERÊNCIAS

- ALI, N., RÉTHORÉ, E., YVIN, J. C., & HOSSEINI, S. A. The regulatory role of silicon in mitigating plant nutritional stresses. **Plants**, 9(12), 1779. 2020.
- ASENSI-FABADO, M. A., & MUNNE-BOSCH, S. Vitamins in plants: occurrence, biosynthesis and antioxidant function. **Trends in plant science**, 15(10), 582-592. 2010.

- BANZATO D.A, KRONKA S.N. **Experimentação Agrícola**. 4ª ed. Jaboticabal: Funep. P. 237. 2013.
- BARRETO, R. F., MAIER, B. R., PRADO R. DE M., MORAIS, T. C. B. DE, FELISBERTO, G. Silicon attenuates potassium and sulfur deficiency by increasing nutrient use efficiency in basil plants. **Scientia Horticulturae**, v.291, p.110616. 2022.
- BARRETO, R. F., PRADO, R. de M., BODELÃO, N. C., TEIXEIRA, G. C. M. Na improves the growth of K-deficient but not K-sufficient kale. **Food Chemistry**, v.370, p.131017. 2022.
- BARROS, N. L. F., MARQUES, D. N., TADAIESKY, L. B. A., SOUZA, C. R. B. DE. Halophytes and other molecular strategies for the generation of salt-tolerant crops. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.162, p.581-591. 2021.
- BATAGLIA, O. C., TEIXEIRA, J. P. F., FURLANI, P. R., FURLANI, A. M. C., GALLO, J. R. **Métodos de análise química de plantas**. Campinas: IAC, 1978.
- BONASIA, A., LAZZIZERA, C., ELIA, A., & CONVERSA, G. Nutritional, biophysical and physiological characteristics of wild rocket genotypes as affected by soilless cultivation system, salinity level of nutrient solution and growing period. **Frontiers in Plant Science**, 8, 300. 2017.
- BRITTO, D. T., COSKUN, D., KRONZUCKER, H. J. Potassium physiology from Archean to Holocene: A higher-plant perspective. **Journal of Plant Physiology**, v.262, p.153432. 2021.
- BUHELDT, A. C., TEIXEIRA, G. C. M., OLIVEIRA, K. S., ROCHA, A. M. S., DE MELLO PRADO, R., CAIONE, G. Silicon contribution via nutrient solution in forage plants to mitigate nitrogen, potassium, calcium, magnesium, and sulfur deficiency. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v.20, n.3, p.1532-1548. 2020.
- CALBO, A. G., FERREIRA, M. D., & PESSOA, J. D. C. A leaf lamina compression method for estimating turgor pressure. **HortScience**, 45(3), 418-423. 2010.
- DESHMUKH, R., SONAH, H., & BELANGER, R. R. New evidence defining the evolutionary path of aquaporins regulating silicon uptake in land plants. **Journal of experimental botany**, 71(21), 6775-6788. 2020.
- EPSTEIN, E. Silicon: its manifold roles in plants. **Annals of applied Biology**, 155(2), 155-160. 2009.
- FERREIRA, E.B, CAVALVANTI P.P, NOGUEIRA D.A ExpDes.pt: pacote experimental designs (Portuguese). **R package version 1.2.0**. Available in: <https://CRAN.R-project.org/package=ExpDes.pt> 2018.
- FLOWERS, T. J., COLMER, T. D. Plant salt tolerance: adaptations in halophytes. **Annals of botany**, v.115, n.3, p.327-331. 2015.
- GATO, I. M. B., DA SILVA OLIVEIRA, C. E., OLIVEIRA, T. J. S. S., JALAL, A., DE ALMEIDA MOREIRA, V., GIOLO, V. M., ... & FILHO, M. C. M. T. Nutrition and yield of hydroponic arugula under inoculation of beneficial microorganisms. **Horticulture, Environment, and Biotechnology**, 1-16. 2023.
- HURTADO, A. C., CHICONATO, D. A., DE MELLO PRADO, R., JUNIOR, G. D. S. S., GRATAO, P. L., FELISBERTO, G., ... & DOS SANTOS, D. M. M. Different methods of silicon application attenuate salt stress in sorghum and sunflower by modifying the antioxidative defense mechanism. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, 203, 110964. 2020.

- JOHNSON, R., VISHWAKARMA, K., HOSSEN, M. S., KUMAR, V., SHACKIRA, A. M., PUTHUR, J. T., MOHAMMAD, S. HASANUZZAMAN, M. Potassium in plants: Growth regulation, signaling, and environmental stress tolerance. **Plant Physiology and Biochemistry**. 2022.
- KARIMI, J., MOHSENZADEH, S. Effects of silicon oxide nanoparticles on growth and physiology of wheat seedlings. **Russian Journal of plant physiology**, v.63, n.1, p.119-123. 2016.
- LICHTENTHALER, U. External commercialization of knowledge: Review and research agenda. **International Journal of Management Reviews**, 7(4), 231-255. 2005.
- KELLY, J. T., ROSSI, M., JOHNSON, D. W., & CAMPBELL, K. L. Beyond sodium, phosphate and potassium: potential dietary interventions in kidney disease. **In Seminars in Dialysis**, v. 30, n. 3, pp. 197-202. 2017.
- KEYATA, E. O., TOLA, Y. B., BULTOSA, G., & FORSIDO, S. F. Proximate, mineral, and anti-nutrient compositions of underutilized plants of Ethiopia: Figl (*Raphanus sativus* L.), Girgir (*Eruca sativa* L) and Karkade (*Hibiscus sabdariffa*): Implications for in-vitro
- KORNDÖRFER, G. H. **Análise de silício: solo, planta e fertilizante**. Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Uberlândia. 2004.
- KRASKA, J. E., & BREITENBECK, G. A. Simple, robust method for quantifying silicon in plant tissue. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v.41, n.17, p. 2075-2085. 2010.
- KRONZUCKER, H. J., COSKUN, D., SCHULZE, L. M., WONG, J. R., BRITTO, D. T. Sodium as nutrient and toxicant. **Plant and soil**, v.369, n.1, p. 1-23. 2013.
- KRONZUCKER, H. J., COSKUN, D., SCHULZE, L. M., WONG, J. R., BRITTO, D. T. Sodium as nutrient and toxicant. **Plant and soil**, v.369, n.1, p. 1-23. 2013.
- KU, K. M., KIM, M. J., JEFFERY, E. H., KANG, Y. H., & JUVIK, J. A. Profiles of glucosinolates, their hydrolysis products, and quinone reductase inducing activity from 39 arugula (*Eruca sativa* Mill.) accessions. **Journal of agricultural and food chemistry**, v.64, n.34, p.6524-6532. 2016.
- LICHTENTHALER, H. K. Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. In: Methods in enzymology. **Academic Press**, v. 148. p. 350-382. 1987.
- LUYCKX, M., HAUSMAN, J. F., LUTTS, S., & GUERRIERO, G. Impact of silicon in plant biomass production: focus on bast fibres, hypotheses, and perspectives. **Plants**, 6(3), 37. 2017.
- mineral bioavailability. **Food Research International**, v.137, p.109724. 2020.
- MITTLER, R., ZANDALINAS, S. I., FICHMAN, Y., & VAN BREUSEGEM, F. Reactive oxygen species signalling in plant stress responses. **Nature Reviews Molecular Cell Biology**, 23(10), 663-679. 2022.
- OSÓRIO, C. R. W. DE S., TEIXEIRA, G. C. M., BARRETO, R. F., CAMPOS, C. N. S., LEAL, A. J. F., TEODORO, P. E., PRADO, R. DE M. Macronutrient deficiency in snap bean considering physiological, nutritional, and growth aspects. **Plos one**, v.15, n.6, p.0234512. 2020.
- PETRETTO, G. L., URGEGHE, P. P., MASSA, D., MELITO, S. Effect of salinity (NaCl) on plant growth, nutrient content, and glucosinolate hydrolysis products trends in rocket genotypes. **Plant Physiology and Biochemistry**, v.141, p.30-39. 2019.

- PRADO, R. M. **Mineral nutrition of tropical plants**. Berna: Springer Nature, 2021.
- RASTOGI, A., TRIPATHI, D. K., YADAV, S., CHAUHAN, D. K., ŽIVČÁK, M., GHORBANPOUR, M., EL-SHEERY, N. I., BRESTIC, M. Application of silicon nanoparticles in agriculture. **3 Biotech**, v.9, n.3, p. 1-11. 2019.
- RAWAT, J., PANDEY, N., & SAXENA, J. Role of potassium in plant photosynthesis, transport, growth and yield. **Role of potassium in abiotic stress**, 1-14. 2022.
- ROHÁČEK, K. (2002). Chlorophyll fluorescence parameters: the definitions, photosynthetic meaning, and mutual relationships. **Photosynthetica**, 40, 13-29. 2002.
- ROUPHAEL, Y., PETROPOULOS, S. A., CARDARELLI, M., COLLA, G. Salinity as eustressor for enhancing quality of vegetables. **Scientia Horticulturae**, v.234, p.361-369. 2018.
- RUBIO, F., GASSMANN, W., & SCHROEDER, J. I. Sodium-driven potassium uptake by the plant potassium transporter HKT1 and mutations conferring salt tolerance. **Science**, 270(5242), 1660-1663. 1995.
- SALES, A. C., CAMPOS, C. N. S., DE SOUZA JUNIOR, J. P., DA SILVA, D. L., OLIVEIRA, K. S., DE MELLO PRADO, R., TEODORO, L. P. R. TEODORO, P. E. Silicon mitigates nutritional stress in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). **Scientific Reports**, v.11, n.1, p.1-16. 2021.
- SANTOS, M. M. M. DOS, DA SILVA, G. P., PRADO, R. D. M., PINSETTA JUNIOR, J. S., MATTIUZ, B. H., & BRAUN, H. Biofortification of tomato with stabilized alkaline silicate and silicic acid, nanosilica, and potassium silicate via leaf increased ascorbic acid content and fruit firmness. **Journal of Plant Nutrition**, 45(6), 896-903. 2022.
- SARAH, M. M. DOS S., PRADO, R. DE M., SOUZA JÚNIOR, J. P. DE, TEIXEIRA, G. C. M., DUARTE, J. C. DOS SANTOS, MEDEIROS, R. L. S. DE. Silicon supplied via foliar application and root to attenuate potassium deficiency in common bean plants. **Scientific Reports**, v.11, n.1, p.1-13. 2021.
- SARAH, M. M. dos S.; PRADO, R. de M.; TEIXEIRA, G. C. M. SOUZA-JÚNIOR, J. P. de.; MEDEIROS, R. L. S. de BARRETO, R. F. Silicon supplied via roots or leaves relieves potassium deficiency in maize plants. **Silicon**, v.14, n.3, p.773-782. 2022.
- SHARMA, A., SHAHZAD, B., REHMAN, A., BHARDWAJ, R., LANDI, M., & ZHENG, B. Response of phenylpropanoid pathway and the role of polyphenols in plants under abiotic stress. **Molecules**, 24(13), 2452. 2019.
- SIDDIQUI, H., AHMED, K. B. M., SAMI, F., & HAYAT, S. Silicon nanoparticles and plants: Current knowledge and future perspectives. *Sustainable Agriculture Reviews 41: Nanotechnology for Plant Growth and Development*, 129-142. 2020.
- SILVA, D. L. DA, DE MELLO PRADO, R., TENESACA, L. F. L., DA SILVA, J. L. F., & MATTIUZ, B. H. Silicon attenuates calcium deficiency by increasing ascorbic acid content, growth and quality of cabbage leaves. **Scientific Reports**, 11(1), 1770. 2021.
- SINGLETON, V. L., ROSSI, J. A. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. **American journal of Enology and Viticulture**, v.16, n3, p.144-158. 1965.

- SOUMARE, A., Djibril, S. A. R. R., & DIÉDHIOU, A. G. Potassium sources, microorganisms, and plant nutrition—challenges and future research directions: A review. **Pedosphere**. 2022.
- SOUZA, J. Z. DE, PRADO, R. DE MELLO, SILVA, S. L. D. O., FARIAS, T. P., NETO, J. G., & SOUZA JUNIOR, J. P. D. Silicon leaf fertilization promotes biofortification and increases dry matter, ascorbate content, and decreases post-harvest leaf water loss of chard and kale. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 50(2), 164-172. 2019.
- STROHECKER, R., HENNING, H.M. **Analisis de vitaminas: métodos comprobados**. Madrid: Paz Montalvo, 428p. 1967.
- SUN, D., HUSSAIN, H. I., YI, Z., ROOKES, J. E., KONG, L., CAHILL, D. M. Mesoporous silica nanoparticles enhance seedling growth and photosynthesis in wheat and lupin. **Chemosphere**, v.152, p.81-91. 2016.
- TEAM, R. Core. R: **A language and environment for statistical computing**. 2022.
- TOMBEUR DE, F., RAVEN, J. A., TOUSSAINT, A., LAMBERS, H., COOKE, J., HARTLEY, S. E., ... & VIOLLE, C. Why do plants silicify?. **Trends in Ecology & Evolution**. 2022.
- TRÄNKNER, M., TAVAKOL, E., & JÁKLI, B. Functioning of potassium and magnesium in photosynthesis, photosynthate translocation and photoprotection. **Physiologia plantarum**, 163(3), 414-431. 2018.
- UENO, H., MAEDA, T., KATSUYAMA, N., KATOU, Y., MATSUO, S., YANO, K., ... & IMANISHI, S. Cation measurements and gene expression analysis suggest tomato leaf marginal necrosis is caused by a jasmonate signal induced by K⁺ starvation in the tip region of leaflets. **The Horticulture Journal**, 87(2), 206-213. 2018.
- WAKEEL, A., FAROOQ, M., QADIR, M., & SCHUBERT, S. Potassium substitution by sodium in plants. **Critical reviews in plant sciences**, 30(4), 401-413. 2011.