



Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”
0111000 – Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Agrônômica



**Eficiência no uso de silício aplicado nas folhas superiores de plantas de
cevada (*Hordeum vulgare*) e as possíveis consequências da adubação
foliar**

Régis Ricchini Leite Vieira

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola
Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da
Universidade de São Paulo para obtenção do título
Engenheira Agrônomo.

Piracicaba

2023

Régis Ricchini Leite Vieira

**Eficiência no uso de silício aplicado nas folhas superiores de plantas de cevada
(*Hordeum vulgare*) e as possíveis consequências da adubação foliar**

Orientador: Prof. Dr. **José Lavres Junior**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo para obtenção do título Engenheira Agrônomo.

Piracicaba

2023

AGRADECIMENTOS

A minha mãe, Ana Carolina Leite Vieira por seu apoio constante e amor incondicional durante toda minha vida.

Ao meu pai, Thiago Ige Marquesim por estar ao meu lado em todos os momentos, por me inspirar todos os dias e por me encorajar a enfrentar novos desafios.

À minha família, por todo o carinho e cuidado durante minha vida, pelo incentivo e motivação incansáveis e pelo exemplo de amor e união.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Lavres Júnior, pessoa de carisma único, por ser um exemplo profissional, por todo apoio, instrução e ensinamentos durante o intercâmbio e nesse período de reta final de meu ensino superior.

Ao Dr. Saulo Augusto Quassi de Castro, meu co-orientador e grande amigo, que sempre foi um exemplo de pesquisador e um professor para mim e que acreditou e confiou na minha capacidade durante a graduação.

Ao professor Paulo Cesar Ocheuze Trivelin, pela oportunidade de ser seu orientado durante a graduação no desenvolvimento de iniciações científicas, por todos os ensinamentos e carinho.

Aos professores Jan Kofod Schjorring e Daniel Pergament Person, meus orientadores durante o período de intercâmbio na Universidade de Copenhague, pela oportunidade de realizar um sonho, pelo carinho, por todos os conhecimentos e lições importantíssimos para a minha formação profissional e pessoal.

A Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP) e ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA/USP) pela excelência de ensino, oportunidades e amizades criadas.

À república 10 Alqueires, minha segunda família, por todo suporte, companheirismo, ensinamentos, pela amizade e por me tornarem a pessoa que sou hoje pelo excelente convívio e amor propiciado.

Ao grande amigo, Guilherme Ferreira da Silveira Filho, por me apresentar a agronomia e me incentivar nos momentos iniciais da graduação.

Aos colegas Daniel Gonçalves e Yush Daniel, pessoas formidáveis que a república me proporcionou e que marcaram minha vida de forma incrível.

Aos amigos Pedro Aguiar, Eduardo Ebúrneo João Pedro Vicentini e João Vitor Pereira que me acolheram e me ensinaram que as amizades têm altos e baixos, mas que sempre estaremos ali, uns para os outros, e por toda contribuição na graduação.

A Clara Guerreiro, minha companheira que me fortaleceu, esteve do meu lado nos momentos difíceis e por caminhar comigo durante o final de todo esse ciclo.

Ao Grupo de Estudos em Cana-de-Açúcar (GECA/ESALQ), grupo que participei durante minha graduação, e que me proporcionou um grande crescimento pessoal, acadêmico e boas amizades.

A todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a minha formação, para o meu avanço pessoal e profissional, os meus sinceros muito obrigado!

SUMÁRIO

RESUMO.....	8
ABSTRACT	9
1. INTRODUÇÃO.....	10
2. OBJETIVO	11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	11
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	15
4.1 Experimento em casa de vegetação	15
4.1.1 Germinação das sementes de cevada	15
4.1.2 Transferência das plântulas de cevada para o sistema hidropônico.....	17
4.1.3 Condução das plantas no sistema hidropônico	19
4.1.4 Fornecimento de Si através do sistema radicular das plantas	21
4.1.5 Adubação foliar da cevada com Si-fertilizantes	22
4.2 Avaliação das plantas de cevada após adubação foliar.....	24
4.2.1 Mensuração da fotossíntese, transpiração e condutância estomática... 24	
4.2.2 Compartimentalização das plantas e quantificação da biomassa fresca.....	25
4.2.3 Protocolo de preparação e congelamento de fragmentos do limbo foliar.....	26
4.3 Análise laboratorial e processamento de amostras	27
4.3.1 Análise da tensão superficial e ângulo de contato das gotas das soluções elaboradas a partir dos fertilizantes	27
4.3.2 Quantificação de biomassa seca, moagem e digestão de amostras vegetais.....	30
4.3.3 Quantificação do teor de Si nas amostras de tecidos vegetais F+1, F+2 e perfilho.....	30

4.3.4 Ablação a laser dos fragmentos de limbo foliar retirados do terço médio das folhas de cevada	31
4.4 Análise estatística	32
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
6. CONCLUSÃO.....	37
7. REFERÊNCIAS	38

RESUMO

A adubação com silício (Si) tem se apresentado como manejo nutricional promissor para a agricultura mediante aos efeitos que esse elemento benéfico pode contribuir às plantas. Diversos trabalhos demonstraram a ação do silício no aprimoramento do metabolismo de plantas como arroz, tomate e cana-de-açúcar em condições de seca, salinidade e outras adversidades. Contudo, ainda poucos trabalhos evidenciaram os efeitos positivos desse elemento benéfico fornecido por meio das folhas. Dessa forma, objetivou-se com este trabalho avaliar a deposição de Si nas folhas das plantas de cevada e as possíveis consequências da adubação foliar com Si nos componentes fisiológicos, morfológicos e de produtividade. O experimento foi conduzido em condições de casa de vegetação, no Departamento de Plantas e Ciências do Solo da Universidade de Copenhague. Foi utilizado delineamento experimental inteiramente casualizado, com três repetições, envolvendo cinco tratamentos: três fontes de silício foliar (Si150, Si400 e NaSi), uma fonte de silício aplicado nas raízes (SiRaiz) e um controle (sem aplicação de Si). As variáveis analisadas foram biomassa fresca e seca, taxa de assimilação de CO₂, transpiração, condutância estomática e acúmulo de silício nos tecidos vegetais. O silício aplicado diretamente nas raízes promoveu maior acúmulo de biomassa fresca nas raízes e na planta, assim como incrementou o teor desse elemento em todos os tecidos vegetais avaliados. Em adição, as imagens obtidas por meio do LA-ICP-MS permitiram observar que o Si aplicado diretamente nas folhas ficou retido na superfície da epiderme e muito pouco penetrou no mesofilo. Conclui-se que a estratégia de manejo nutricional deve procurar melhorar a nutrição em Si para otimizar os atributos de trocas gasosas das folhas, a fotossíntese e, por fim, a produção de biomassa.

Palavras-chave: *Adubação foliar, teor de silício, fonte de silício, cevada.*

ABSTRACT

Silicon (Si) fertilization has been presenting as a promising nutritional management for agriculture due to the effects that this beneficial element can offer to plants. Several studies have shown the action of silicon on the improvement in plants metabolism such as rice, tomatoes and sugarcane in conditions of water (drought and flooding) and saline stress and other adversities. However, few works have shown the positive effects of Si-supply to the leaves on gas exchange parameters at leaf- and plant-scale. Thus, this work aimed to evaluate the silicon deposition in the leaves of the barley, and the possible consequences of foliar fertilization on the physiological, morphological and productivity components. The experiment was carried-out in a greenhouse condition, at the Department of Plant and Soil Science, in the University of Copenhagen. A completely randomized experimental design was used, with three replications, involving five treatments: three sources of foliar silicon (Si150, Si400 and NaSi), a source of silicon applied to the roots (SiRaiz) and a control (without silicon). The analyzed variables were fresh and dry biomass, photosynthesis, transpiration, stomatal conductance and silicon accumulation in plant tissues. The silicon applied direct to the roots influenced the greater accumulation of fresh biomass in the roots and in the plant, as well as an increase in the content of this element in all evaluated plant tissues. In addition, the images obtained through the LA-ICP-MS allowed observing that the leaf applied Si was retained on the epidermis surface and very low Si penetrated into the mesophyll. In conclusion, the nutritional management strategy should seek to improve Si nutrition to optimize leaf gas exchange parameters, photosynthesis, and then biomass yield.

Keywords: *Foliar fertilization, silicon content, silicon sources, barley.*

1. INTRODUÇÃO

Apenas 25% de toda a área cultivada na Terra não sofre perdas na produtividade em função dos efeitos causados pelo estresse hídrico (Kim et al., 2019). Simultaneamente cerca de 20% de toda terra arável do planeta sofre em decorrência de salinidade (FAO e ITPS 2015). Quando somados, estima-se que sua capacidade de supressão da produção agrícola atinja 50%, sendo que seus efeitos podem ser potencializados com as mudanças climáticas (IPCC, 2014).

Plantas em condições de desidratação e com o equilíbrio iônico perturbado expressam crescimento reduzido, pois enfrentam desequilíbrios nutricionais e estresses oxidativos (Skirycz e Inzé, 2010), além de queda no metabolismo fotossintético (Chaves et al., 2009). À medida que a demanda por comida cresce dia após dia, estratégias para mitigar os impactos ocasionados pela seca e salinidade sobre a produção agrícola global são prontamente necessárias a fim de se garantir a manutenção da segurança alimentar e da qualidade nutricional.

A implantação de sistemas de irrigação representa uma alternativa onerosa e que pode afetar a disponibilidade de água em outras áreas (Martinez-Alvarez et al., 2016), ao passo que o desenvolvimento de cultivares de alto potencial produtivo e alta tolerância a estresses, por meio do melhoramento e modificação genética de culturas, caminha vagarosamente (Sallam et al., 2019). A adubação com silício (Si) tem se apresentado como uma alternativa sustentável e economicamente viável para amenizar os efeitos da seca e salinidade nos sistemas agrícolas.

Embora ainda exista uma compreensão limitada sobre as formas como o Si promove tolerância a condições de seca e salinidade (Coskun et al., 2016, Chen et al., 2018), a ação desse elemento benéfico está associada à redução da condutância hidráulica das raízes e redução da perda de água por transpiração (Yoshida et al., 1962, Savant et al., 1997, Agarie et al., 1998).

As plantas acumulam Si em diferentes concentrações. A família das gramíneas, por exemplo, apresenta espécies acumuladores de grandes quantidades de Si, que podem corresponder acima de 10% de sua matéria seca (Epstein 1999). A cevada é uma gramínea que apresenta diversas utilizações e boas indicações para a alimentação humana (Limberg et al., 2011; Gadelha et al., 2010). Todavia, a produção no Brasil é baixa e foi de apenas 482,1 mil toneladas na safra 2022 (Conab, 2023).

Diversos estudos envolvendo a adubação com fontes de Si vem sendo realizados em diferentes culturas como: silicato de cálcio em arroz de terras altas (Barbosa et al., 2001), silicato de sódio em cafeeiro (Botelho et al., 2005) e metassilicato de potássio em crisântemo (Rodrigues, 2006). Contudo, observam-se que poucos trabalhos existentes abordam o fornecimento de Si por meio das folhas e os impactos na nutrição, fisiologia e sanidade vegetal.

O desenvolvimento de estudos atualizados, abordando manejos e tecnologias adequados, assim como respostas no âmbito de produtividade como nutricional, poderiam proporcionar a cultura maior atratividade e competitividade, considerando que a cevada atende a mercados específicos.

2. OBJETIVO

Objetivou-se avaliar com o presente estudo a deposição de Si nas folhas das plantas de cevada, e as possíveis consequências da adubação foliar nos componentes fisiológicos, morfológicos e de produtividade.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A elevação da produtividade de culturas agrícolas através do uso de recursos limitados representa um desafio para os pesquisadores envolta do mundo. O aumento crescente da demanda por alimentos vinculado ao crescimento da população mundial, cuja estimativa projeta atingir 9,1 bilhões de pessoas em 2050, ocorre em contrapartida a diminuição dos recursos naturais do planeta Terra (Hubert et al., 2010). As mudanças climáticas são um fator de destaque para o desbalanço dos recursos naturais, e influenciam fortemente na diminuição da água, um dos recursos mais limitantes que o planeta apresenta.

Dentre alguns dos fatores responsáveis pela redução da produtividade da produção agrícola, como deficiências nutricionais, competição da cultura com plantas infestantes,

semeadura tardia e fertilização desbalanceada, a escassez de água apresenta-se como o fator mais crítico sobre as plantas (Araus et al., 2002; Khan et al., 2010). O declínio dos recursos hídricos, evidenciado pelo decaimento da distribuição média anual de chuvas, somado a gestão de má qualidade do uso e reaproveitamento da água, apresenta impactos negativos na produção de alimentos, principalmente em locais de clima árido e semiárido onde a taxa de evapotranspiração é elevada (Ellsworth, 1999; Samarakoon and Gifford, 1995).

A indução de mudanças fisiológicas e morfológicas é uma das alternativas adotadas pelas plantas para evitar estresse ocasionado pela escassez de água (Sakamoto and Murata, 2002). A prevenção das células a injúrias causadas durante a desidratação é realizada através do acúmulo de metabólitos orgânicos de baixo peso molecular. Esses são compostos primordiais pois mantêm a pressão de turgescência da célula (Bohnert and Jensen, 1996; Bohnert et al., 1995), fenômeno importantíssimo para garantir estabilidade estrutural e funcionamento de certas macromoléculas (Santoro et al., 1992).

Garantir a eficiência no uso da água (EUA) em plantas sob condições de estresse hídrico (seca) e salino é um dos pontos chave para aprimorar e preservar a produção agrícola. Denomina-se estresse por seca, a falta de água que ocasiona nas plantas, o surgimento de sintomas de estresse responsáveis pela redução da produtividade abaixo do nível ótimo. Os efeitos da salinidade afetam a maquinaria bioquímica celular, causados primordialmente pela presença desproporcional de sódio (Na^+) e, em menor grau, cloro (Cl^-), tanto no ambiente celular como no extracelular. Além da geração de estresse nutricional, a toxicidade iônica pode estar associada também à geração de estresse osmótico, uma vez que a alteração osmótica criada pelo excesso de sais no solo, gera déficits hídricos e uma ruptura geral no equilíbrio da água no sistema solo-planta.

Práticas de seleção e reprodução de indivíduos tolerantes têm sido realizadas pelos agricultores durante anos. Entretanto, observa-se que essas formas de seleção de indivíduos adaptados às condições de estresse são complexas, uma vez que a base de estresse por seca e salino é multigênica, e há grande interação dos genótipos com o ambiente. Através da engenharia genética, vários meios artificiais foram inseridos nas plantas para intensificar a tolerância ao estresse hídrico (Waseem et al., 2011). Em diversos casos tentativas para a manipulação dos genes relevantes ao aprimoramento da tolerância a esse tipo de estresse foi bem-sucedida, até mesmo em condições a campo (revisto em Yang et al., 2010; Roy et

al., 2014). Todavia em outras abordagens foram mostrados somente resultados promissores, em condições de laboratório (Flowers and Colmer, 2008).

As plantas apresentam a capacidade de superar problemas em condições de estresses bióticos e abióticos, como por exemplo injúrias mecânicas e estresses hídrico e salino, por meio da absorção de certos nutrientes e elementos benéficos (Santa-María et al., 2023). O Si, seja absorvido via solo ou via folhas, tem ganhado destaque graças aos benefícios que esse elemento químico confere as culturas, como dentre muitos, o auxílio na redução dos estresses hídrico e salino.

O Si ainda não é considerado um elemento essencial para as plantas, embora componha aproximadamente 10% da biomassa seca (Sacala, 2009). Esse elemento benéfico é o segundo elemento mais abundante da crosta terrestre, ficando apenas atrás do oxigênio. Apesar de sua abundância em volume e diferentes formas no solo, o Si é absorvido pelas plantas apenas na forma de ácido monossílico (H_4SiO_4) e atua no balanço hídrico dentro da planta possibilitando a funcionalidade das folhas do xilema e da raiz, em condições de estresse pela escassez água ou excesso de sais (Hattori et al., 2005).

Alguns dos processos pelos quais o Si confere benefícios as plantas já foram elucidados. Em plantas de arroz observou-se que esse elemento químico apresenta a capacidade de elevar a condutância estomática e aprimorar o potencial hídrico dentro das folhas devido à redução da transpiração graças a formação de uma dupla camada de sílica cuticular que limita a abertura estomática (Hattori et al., 2005; Matoh et al., 1991). O acúmulo de Si no sistema radicular reduz a condutância hidráulica da raiz, e aprimora o volume de água dentro das células, corroborando assim para que as plantas apresentem maior EUA (Gao et al., 2004).

A deposição de sílica amorfa ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) na parede celular confere as plantas maior resistência a injúrias mecânicas, e ao acamamento (Deren, 2001). Além disso, o acúmulo de Si nas células é capaz de formar uma barreira de resistência mecânica ao ataque de fungos e bactérias, e simultaneamente dificulta o ataque de insetos praga (Epstein, 2001; Melo et al., 2003; Costa et al., 2009).

Outros benefícios relacionados a fertilização com Si como o aprimoramento fotossintético (Deren, 2001), aumento no teor de clorofila (Epstein 2001), elevação do crescimento devido a alteração de hormônios de crescimento endógenos (Hamayun et al., 2010), ação antioxidante devido a produção de enzimas antioxidativas e produção de fito

alexinas (Korndörfer et al., 1999a) foram evidenciados por alguns autores. Contudo a descrição detalhada da relação do Si e tais eventos ainda não é tão aprofundada, o que demonstra a necessidade do desenvolvimento de mais estudos para geração de informações acerca desse elemento benéfico e sua relação com as plantas, o que pode ser uma ferramenta interessante para os agricultores.

A cevada é considerada uma das primeiras culturas domesticadas pelo homem, sendo primordialmente empregada na alimentação humana (Carpentieri-Pipolo et al., 2021). O cultivo da cevada apresenta-se como uma alternativa em áreas de altitudes mais elevadas, precipitações reduzidas ou até mesmo estações de cultivo mais curtas quando comparada a outras poáceas, encaixando-se em janelas agrícolas onde culturas como milho, arroz ou trigo não são atrativas, mediante ao seu caráter precoce e pelo fato dela necessitar de quantidades de água menores para completar seu ciclo (Minella, 1999).

Dentre os cereais cultivados mundialmente, a cevada apresenta uma posição de destaque, permanecendo atrás do trigo, milho e arroz. Isso está vinculado as importantes características da cultura como a adaptação a diferentes condições climáticas, elevada qualidade de seu malte principalmente destinado a produção de cervejas, mas também sua utilização na nutrição humana e animal. Em 2020 a produção mundial desse cereal foi de 160 milhões de toneladas, em que 2% foram destinados para o consumo humano, 85% para a nutrição animal, através da produção de rações e formulados e 13% para a produção de cerveja (Carpentieri-Pipolo et al., 202; FAO, 2020).

Para que a cevada obtenha melhorias em sua qualidade nutricional, apresentando grandes produtividades e tornando-se assim, mais interessante e competitiva para os produtores, há necessidade de que novas pesquisas sejam destinadas para geração de atuais manejos e tecnologias específicas para essa cultura, proporcionando-a, desta forma, maior importância no cenário agrícola e a expansão de seu cultivo (Barzotto et al., 2018).

Observa-se que, quando o fornecimento de nutrientes é adequado, a cultura da cevada é altamente responsiva ao manejo da adubação, o que pode resultar em ganhos de produtividade e maior eficiência no uso dos nutrientes (Lantmann; Castro; Wieltholter, 2005). Através da adubação foliar é possível reduzir perdas e melhorar o aproveitamento dos fertilizantes, uma vez que ela permite uma distribuição uniforme da solução sobre a superfície das folhas e o emprego de menores quantidades de adubos (Nascimento; Souza; Arcoverde; Altomar, 2021).

Todavia, a hidrorrepelência gerada pela cerosidade presente na cutícula somada a elevada tensão superficial das gotas de água contribui para a diminuição da área de contato entre as gotas da solução com as folhas. O uso de tecnologias associadas aos fertilizantes foliares como adjuvantes, surfactantes ou umectantes é uma alternativa viável para garantir maior eficácia na adubação foliar (Nascimento; Souza; Arcoverde; Altomar, 2021).

Embora o Si apresente crescente destaque no cenário agrícola como elemento benéfico às plantas ao proporcionar acréscimos na produtividade e benefícios em condições de estresse, aspectos relacionados à dinâmica de absorção e redistribuição pelas folhas das plantas foram pouco elucidados, ao passo que o desenvolvimento de novos produtos à base Si cresce anualmente.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Experimento em casa de vegetação

4.1.1 Germinação das sementes de cevada

Cerca de 120 sementes de cevada (*Hordeum vulgare*) de primavera foram postas para germinar em pequenas bandejas plásticas contendo 300 g de vermiculita como substrato (Figliolia et al., 1993; Martins et al., 2009). As sementes de cevada foram cobertas por uma camada de vermiculita de aproximadamente 2 cm e substrato foi umedecido com água. Posteriormente, as bandejas contendo as sementes foram colocadas em uma bandeja maior, contendo uma lâmina de água na base, a fim de garantir a umidade necessária para a germinação (Figura 1). No dia 12 de abril de 2022 a bandeja foi transferida para a casa de vegetação do Departamento de Plantas e Ciências do Ambiente da Universidade de Copenhague, onde a temperatura e umidade foram adequadamente mantidas para que as sementes germinassem.



Figura 1. (A) Sementes de cevada de primavera. (B) Sementes de cevada dispostas sobre a vermiculita. (C) Bandejas umedecidas dentro da casa de vegetação. **Fonte.** Vieira (2022).

As sementes e cevada começaram a germinar 3 dias após a transferência das bandejas para a casa de vegetação, e em 19 de abril de 2022, aproximadamente todas as plântulas já haviam emergido (Figura 2).

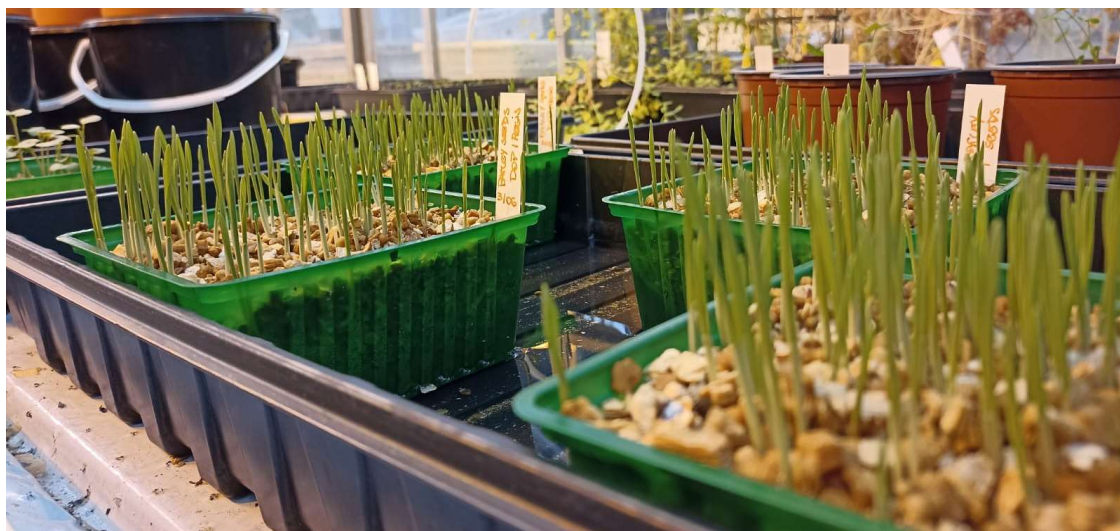


Figura 2. Plântulas de cevada de primavera 2 dias após a germinação. **Fonte.** Vieira (2022).

4.1.2 Transferência das plântulas de cevada para o sistema hidropônico.

Após atingirem um tamanho considerável, as plântulas de cevada foram transferidas, no dia 21 de abril de 2022, para o sistema hidropônico instalado na casa de vegetação da Universidade de Copenhague, local onde o experimento foi conduzido.

As plântulas de cevada foram fixadas, com o auxílio de espumas plásticas, nas tampas de baldes contendo aproximadamente 4 L de água deionizada (Figura 3). Através de uma mangueira plástica ligada a um compressor, foi possível fornecer oxigênio para o sistema radicular das plantas. Com o auxílio de conectores plásticos, intersecções foram criadas a partir da mangueira principal, possibilitando a conexão de mangueiras secundárias com uma seringa na ponta. Estas foram ligadas diretamente no centro dos baldes para fornecer oxigênio as raízes.

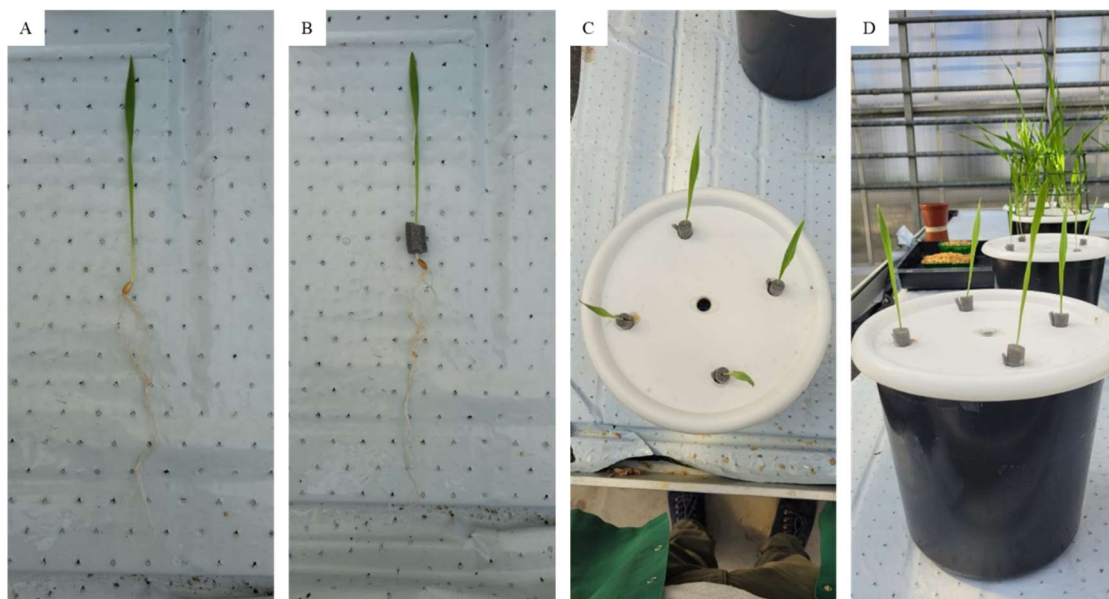


Figura 3. (A) Plântula de cevada. (B) Plântula de cevada com espuma plástica acima da semente. (C) Plântulas de cevada fixadas na tampa do balde. (D) Balde com tampa plástica e plântulas de cevada fixadas. **Fonte.** Vieira (2022).

Em cada balde foram fixadas quatro plântulas de cevada, formando assim uma Unidade Experimental (UnE). No total, 20 UnE foram instaladas no sistema hidropônico (Figura 4), sendo que apenas 15 foram utilizadas no experimento com 5 tratamentos (Si150, Si400, SiNa, SiRaiz e Controle), com 3 repetições. As UnE extras foram instaladas para a realização de testes e por segurança, em caso de morte de plantas.



Figura 4. UnE instaladas ao sistema de oxigenação na casa de vegetação. **Fonte.** Vieira (2022).

4.1.3 Condução das plantas no sistema hidropônico

Após a instalação das UnE no sistema hidropônico, as plantas foram deixadas crescer por um período de 48 dias, momento em que adubação foliar foi realizada. As plantas de cevada foram nutridas utilizando-se quatro tipos de soluções nutritivas (A, B, N e Micro). As soluções foram elaboradas com base no padrão utilizado pelo Laboratório de Plantas e Ciências do Solo (Tabela 1). Com o auxílio de uma pipeta, 4 mL das soluções nutritivas A, B e N foram aplicados na solução de cada balde. Em um primeiro momento, a solução de micronutrientes foi aplicada em volume de 2 mL, com o intuito de não provocar toxicidade ao sistema radicular das plântulas.



Figura 5. (A) Aplicação de solução nutritiva com pipeta em UnE. (B) Aferição de pH com pHmetro em UnE. **Fonte.** Vieira (2022).

A troca da solução das UnE ocorreu de forma semanal, e consistiu no descarte da solução velha, limpeza dos baldes, acréscimo de 4L de água deionizada e aplicação das 4 soluções nutritivas no volume de 4 mL cada. A fim de proporcionar um ambiente apropriado para o crescimento das plantas, o pH foi aferido regularmente a cada dois dias, e ajustado utilizando-se HCl e NaOH, para permanecer entre 5,5 e 6,0 (Figura 5).

Tabela 1. Composição das soluções nutritivas utilizadas no cultivo de plantas. **Fonte.** Laboratório de Plantas e Ciências do Solo

Solução Nutritiva	Químicos	Concentração (mol L⁻¹)	Massa Molar (g mol⁻¹)	Massa utilizada (g L⁻¹)
A	KH ₂ PO ₄	0,20	136,09	27,22
	K ₂ SO ₄	0,20	174,27	34,85
B	MgSO ₄ .7H ₂ O	0,30	246,48	73,94
	NaCl	0,10	58,44	5,84
N	Mg(NO ₃) ₂ .4H ₂ O	0,30	256,41	76,92
	Ca(NO ₃) ₂ .4H ₂ O	0,90	236,15	212,53
	KNO ₃	0,60	101,11	60,67
Micro	Fe-EDTA	0,0540	367,00	18,35
	MnCl ₂ .4H ₂ O	0,0010	197,91	0,20
	NaMoO ₄ .2H ₂ O	0,0008	241,95	0,19
	ZnCl	0,0007	136,28	0,10
	CuSO ₄ .5H ₂ O	0,0008	249,68	0,20
	H ₃ BO ₃	0,0020	61,83	0,12
	Fe(NO ₃) ₃ .9H ₂ O	0,0500	404,00	20,20

Após 25 dias de condução de experimento foram instaladas proteções plásticas nos baldes para evitar o sombreamento entre as UnE, assim como danos e injúrias nas folhas e perfilhos. Após essa data, a troca de solução das UnE foi realizada duas vezes na semana. O sistema radicular das plantas foi separado cuidadosamente uma vez por semana, a fim de prevenir a criação de nós e junções entre as raízes, que foram avaliadas individualmente.



Figura 6. (1) UnE em 21/04/2022. (2) UnE 14 dias após a instalação. (3) UnE 25 dias após a instalação. **Fonte.** Vieira (2022).

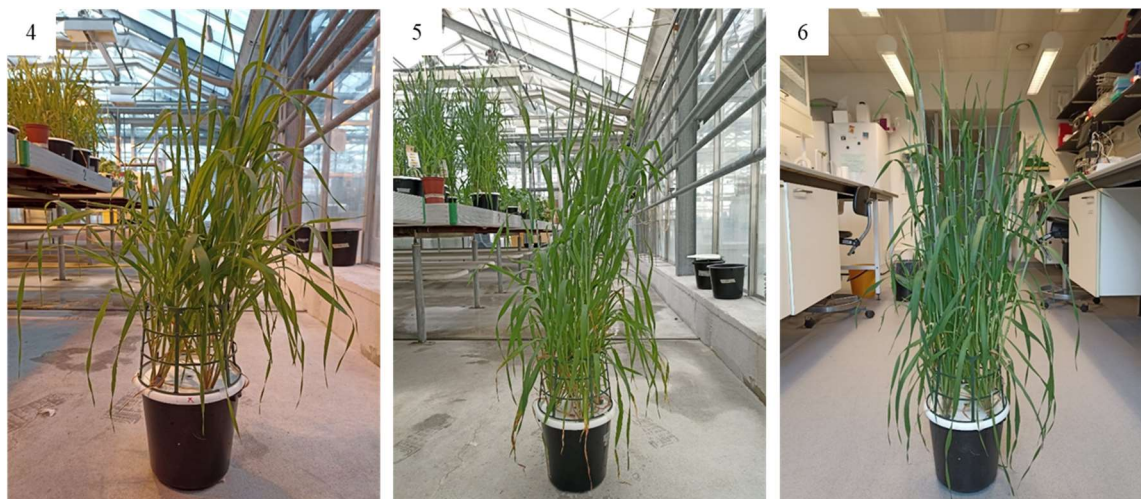


Figura 7. (4) UnE 35 dias após a instalação. (5) UnE 45 dias após a instalação. (6) UnE 60 dias após a instalação. **Fonte.** Vieira (2022).

4.1.4 Fornecimento de Si através do sistema radicular das plantas

Mediante a sua elevada solubilidade em água, o metassilicato de sódio nona hidratado ($\text{Na}_2\text{O}_3\text{Si} \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) foi a forma utilizada no tratamento SiRaiz. Após 15 dias de condução do

experimento, o volume de 40 ml de ($\text{Na}_2\text{O}_3\text{Si } 9\text{H}_2\text{O}$) na concentração 40 mmol L^{-1} , passou a ser aplicado, em três UnE, juntamente com as demais soluções nutritivas.

Durante a aplicação, a solução de ($\text{Na}_2\text{O}_3\text{Si } 9\text{H}_2\text{O}$) foi fornecida antes das demais soluções nutritivas com o intuito de evitar a precipitação de íons, como o ferro (Fe) por exemplo, presentes nas outras soluções, devido a sua capacidade em elevar o pH de 5,5 a 6,0 para 10,0 a 11,0. Desse modo, após a solução de ($\text{Na}_2\text{O}_3\text{Si } 9\text{H}_2\text{O}$) ser aplicada, o pH foi aferido e ajustado para permanecer entre 5,5 e 6,0 e as demais soluções nutritivas foram aplicadas.

4.1.5 Adubação foliar da cevada com Si-fertilizantes

Soluções foram criadas a partir de três fontes de Si para a adubação foliar das plantas de cevada. As fontes utilizadas foram os fertilizantes Nano Silicon 150 e o Nano Silicon 400, produtos oferecidos por uma companhia parceira ao experimento, e o ($\text{Na}_2\text{O}_3\text{Si } 9\text{H}_2\text{O}$), utilizado como uma fonte padrão para o fornecimento de Si, formando respectivamente os tratamentos Si150, Si400 e SiNa.

Estudos prévios a adubação foliar foram realizados a fim de se obter maiores informações sobre as soluções elaboradas, assim como o volume aplicado nas folhas e o método de aplicação a ser utilizado. Com o objetivo de determinar a tensão superficial das gotas das soluções elaboradas e o ângulo de contato delas com as folhas de cevada, testes, utilizando-se surfatantes, foram conduzidos no equipamento ThetaFlow. Por não apresentar Si em sua composição, o surfactante *Contact* foi adicionado as soluções na concentração de 0,03% para oferecer maior aderência, molhamento e disposição das gotas das soluções nas folhas.

Optou-se pela utilização do pincel como método de aplicação ao invés da pipeta. Isso ocorreu, devido a possibilidade de disposição da solução sobre toda a área desejada do limbo foliar através do “pincelamento”. Além disso, testes foram realizados nas UnE sobressalentes a fim de se determinar um volume preciso de solução aplicada capaz de cobrir a área desejada da superfície da folha, sem deixar excessos.

Para a aplicação foliar dos tratamentos, o perfilho mais vigoroso de cada planta de cevada presente nas UnE foi selecionado, totalizando 60 perfilhos. As soluções elaboradas foram aplicadas no terço médio das folhas superiores das plantas (Figura 8): folha mais jovem completamente desenvolvida (F+1) e segunda folha mais jovem completamente

desenvolvida (F+2). O volume de solução aplicado foi de 0,75 mL por folha, totalizando 1,5 mL por planta (Figura 9). As soluções foram aplicadas na concentração de 18 mmol L⁻¹ conforme as especificações dos fertilizantes, fornecidas pela companhia parceira ao experimento.



Figura 8. Adubação foliar das plantas de cevada. (A) Pincelamento da F+1. (B) Pincelamento da F+2. **Fonte.** Vieira (2022).



Figura 9. Folhas de cevada (F+2) instantes após aplicação. (1) Tratamento Si150. (2) Tratamento Si400. (3) Tratamento SiNa. **Fonte.** Vieira (2022).

A adubação foliar das plantas de cevada ocorreu no dia 7 de junho de 2022, 48 dias após a instalação do experimento. A aplicação teve início às 13h00 e foi finalizada às 15h30. A fim de realizar a aplicação das soluções nas folhas de forma otimizada e evitar contato entre as plantas de UnE distintas, as UnE foram manejadas sob as bancadas, obtendo-se assim mais espaço entre os baldes (Figura 10).



Figura 10. UnE dispostas sobre a bancada da casa de vegetação antes da adubação foliar.
Fonte. Vieira (2022).

4.2 Avaliação das plantas de cevada após adubação foliar

4.2.1 Mensuração da fotossíntese, transpiração e condutância estomática

A mensuração da capacidade fotossintética, índice de transpiração e condutância estomática ocorreu no dia 14 de junho de 2022, sete dias após a adubação foliar. Durante a avaliação, apenas uma das quatro plantas presentes em cada UnE teve sua F+1 avaliada. Para os tratamentos Si150, Si400 e SiNa a folha avaliada foi a mesma que recebeu adubação foliar. A avaliação foi realizada com o auxílio do equipamento CÍRAS (Figura 11).

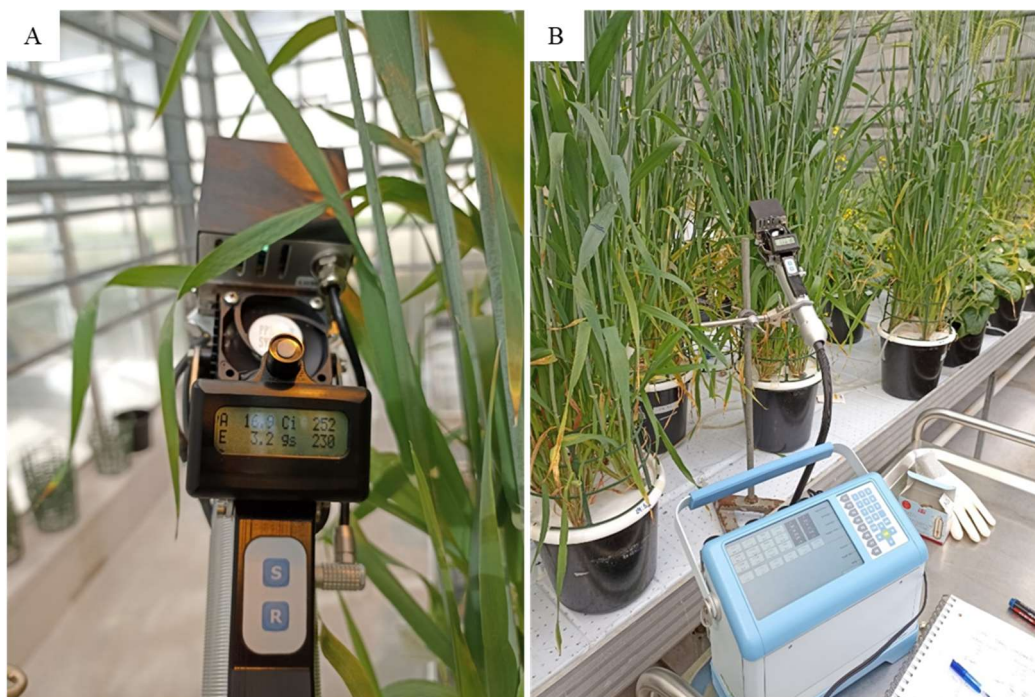


Figura 11. (A) Gatilho acoplado a F+1 de uma planta de cevada para avaliação. (B) Medidor CÍRAS em funcionamento durante a avaliação. **Fonte.** Vieira (2022).

4.2.2 Compartimentalização das plantas e quantificação da biomassa fresca

No dia 21 de junho de 2022, 14 dias após a adubação foliar, três das quatro plantas de cevada presentes em cada UnE foram compartimentalizadas em 5 tecidos vegetais: folha mais jovem completamente expandida (F+1); segunda folha mais jovem completamente expandida (F+2); perfilho mais vigoroso, aquele que conecta as F+1 e F+2 ao sistema radicular (perfilho) (Figura 12); outros perfilhos, folhas e estruturas reprodutivas que compunham a touceira da cevada (planta) e o sistema radicular (raiz) (Figura 13). A compartimentalização das plantas em tecidos vegetais foi realizada com o objetivo de se quantificar a biomassa fresca (MF), biomassa seca (MS) e o teor de Si presente nos tecidos vegetais F+1, F+2 e perfilho, após estarem secos, processados e digeridos. Os tecidos vegetais F+1, F+2, perfilho, planta e raiz foram pesados em balança de precisão de 0,01 g para a quantificação da MF.



Figura 12. Tecidos vegetais da cevada. (i) F+1. (ii) F+2. (iii) perfilho. **Fonte.** Vieira (2022).



Figura 13. Tecidos vegetais (1) planta. (2) raiz. **Fonte.** Vieira (2022).

4.2.3 Protocolo de preparação e congelamento de fragmentos do limbo foliar

No dia 22 de junho de 2022, pequenos fragmentos de limbo foliar foram retirados do terço médio das folhas F+1 e F+2 das plantas de cevada que não sofreram avaliação de biomassa, de todos os tratamentos. Tais fragmentos foram imersos em uma resina especial e congelados em nitrogênio líquido, formando pequenos blocos. Os blocos foram rapidamente armazenados em um freezer a temperatura de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figura 14), e posteriormente analisados através da “Ablação a Laser Indutivamente Acoplada a Espectrometria de Massa” (LA-ICP-MS).

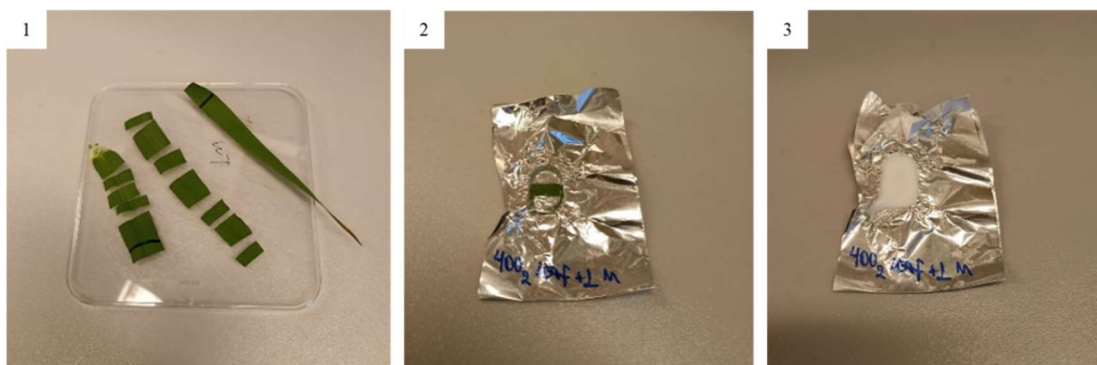


Figura 14. (1) Terço médio do limbo foliar de cevada cortado em fragmentos. (2) Fragmento imerso em resina especial antes do congelamento em nitrogênio líquido. (3) Bloco contendo amostra de limbo foliar congelada, pronto para armazenamento. **Fonte.** Vieira (2022).

4.3 Análise laboratorial e processamento de amostras

4.3.1 Análise da tensão superficial e ângulo de contato das gotas das soluções elaboradas a partir dos fertilizantes

Estudos sobre a tensão superficial (TS) de gotas e o ângulo de contato (AC) entre elas e as folhas de cevada foram realizados previamente a adubação foliar. As soluções elaboradas referentes aos tratamentos Si150 e Si400 foram avaliadas quanto aos valores de TS e AC no equipamento *ThetaFlow*, com e sem acréscimo do surfactante *Contact*.

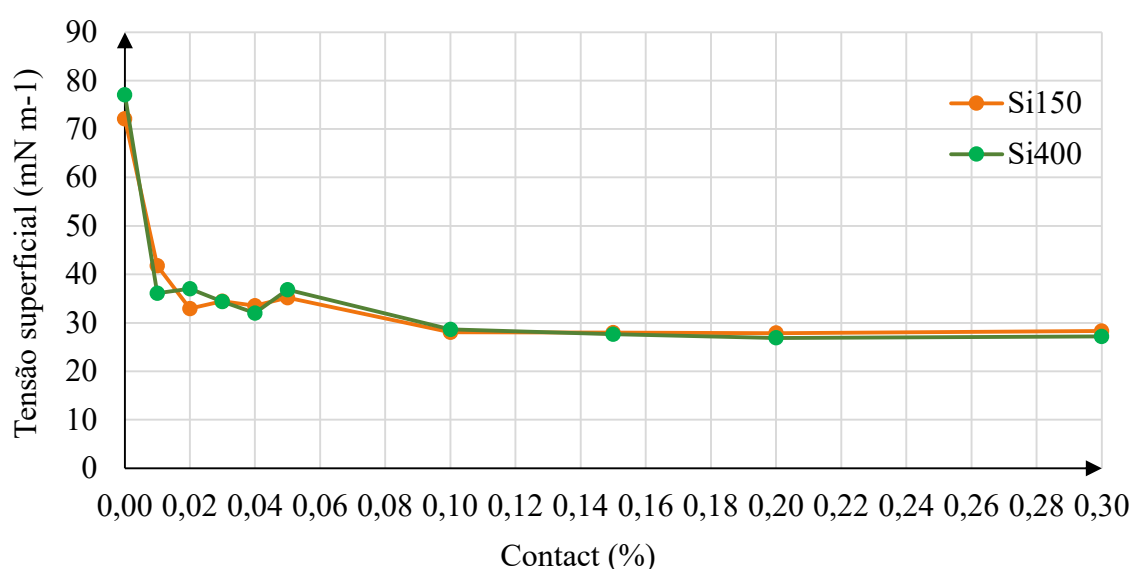


Figura 14. Tensão superficial (mN m^{-1}) das gotas das soluções dos tratamentos Si 150 e Si 400 em função do acréscimo de surfactante *Contact* (%). **Fonte.** Vieira (2022).

A TS das gotas de ambos os tratamentos se aproximou de $37,4 \text{ mN m}^{-1}$ quando o *Contact* foi adicionado a solução na concentração de 0,03%. O acréscimo de *Contact* na solução contribuiu para uma redução de 52,1% e 55,4% na TS dos tratamentos Si150 e Si400 respectivamente (Figura 14).

O acréscimo de 0,03% de *Contact* também influenciou em uma redução do AC entre gotas das soluções dos tratamentos Si 150 e Si 400 e as superfícies das folhas de cevada (Tabela 2).

Apesar de o acréscimo de surfactante nas soluções dos tratamentos contribuir para uma redução no AC entre as gotas e as folhas de cevada, os valores não são uniformes. Isso pode ser observado no decréscimo de 1,1% no AC direito da medição nº 2 do tratamento Si 400, quando comparado ao mesmo ângulo nas medições nº 3 e 4. Embora seja possível aproximar a superfície das folhas de cevada a uma superfície plana durante a realização das medições, o local onde as gotas são depositadas não é o mesmo devido à rugosidade do limbo foliar, o que proporcionou a variabilidade nos valores observados.

Tabela 2. Ângulo de contato (°) das soluções dos tratamentos Si150 e Si400, com e sem acrescimento de *Contact* (0,03%). **Fonte.** Vieira (2022).

Medição	Nano Silicon 150 nm					
	AC esquerdo (°)	EPM	AC direito (°)	EPM	AC média (°)	EPM
	-----0,00%-----					
1	150,16	0,19	164,53	0,24	157,35	0,21
	-----0,03%-----					
2	137,80	0,19	140,63	0,25	139,21	0,22
	-----0,03%-----					
3	131,02	0,18	131,76	0,14	131,39	0,14
	-----0,03%-----					
4	140,68	0,43	134,00	0,30	137,34	0,33
Medição	Nano Silicon 400 nm					
	AC esquerdo (°)	EPM	AC direito (°)	EPM	AC média (°)	EPM
	-----0,00%-----					
1	150,47	0,38	141,24	0,38	145,86	0,36
	-----0,03%-----					
2	130,12	0,45	139,64	0,20	134,88	0,30
	-----0,03%-----					
3	121,29	0,26	119,24	0,16	120,26	0,18
	-----0,03%-----					
4	128,42	0,15	126,41	0,23	127,42	0,14

4.3.2 Quantificação de biomassa seca, moagem e digestão de amostras vegetais

As amostras de todos os tecidos vegetais foram dispostas em estufa com circulação de ar 65° C e deixadas secar até atingirem massa constante. Posteriormente, a MS das amostras foi aferida em balança de precisão de 0,01 g. As amostras do tecido vegetal perfilho foram moídas em moinho de bolas até atingirem granulometria adequada para a digestão (Figura 15). As amostras dos tecidos vegetais F+1 e F+2 não foram moídas devido ao baixo volume de material vegetal. As amostras dos tecidos vegetais F+1, F+2 e perfilho foram destinadas para digestão ácida, e posteriormente analisadas no Espectrômetro de Massa Indutivamente Acoplado (ICP-MS).

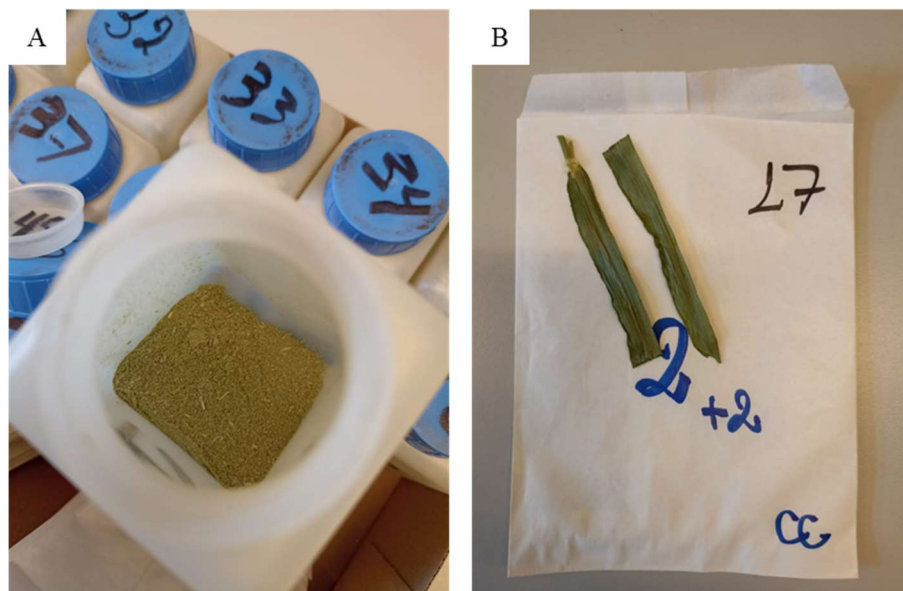


Figura 15. (A) Amostra de tecido vegetal perfilho após moagem. (B) Amostra seca de tecido vegetal F+2. **Fonte.** Vieira (2022).

4.3.3 Quantificação do teor de Si nas amostras de tecidos vegetais F+1, F+2 e perfilho

As amostras dos tecidos vegetais F+1, F+2 e perfilho foram devidamente pesadas, digeridas e analisadas no ICP-MS quanto seu teor de Si. A análise de apenas três tecidos vegetais, está relacionada ao fato de que, dentre os tratamentos foliares, os tecidos vegetais F+1, F+2 e perfilho possivelmente apresentariam o maior teor de Si, quando comparados

aos demais tecidos (planta e raiz), uma vez que a deposição do fertilizante ocorreu nas folhas.

Desse modo, caso absorvido, a redistribuição do Si seria realizada através do perfilho que liga as folhas fertilizadas a raiz. Entretanto, como as plantas haviam perfilhado muito e a dose de Si aplicada não foi elevada, a redistribuição de Si para as demais partes da planta possivelmente seria baixa. A avaliação desses três tecidos vegetais maximizou, portanto, as chances de se obter uma abordagem mais detalhada sobre a dinâmica de absorção desse elemento.

4.3.4 Ablação a laser dos fragmentos de limbo foliar retirados do terço médio das folhas de cevada

Seções de limbo foliar foram produzidas a partir dos blocos contendo os fragmentos extraídos do terço médio das folhas de cevada. Com o auxílio de um micrótomo, os blocos foram cuidadosamente cortados, e as seções obtidas foram fixadas em lâminas com fita dupla-face (Figura 16).

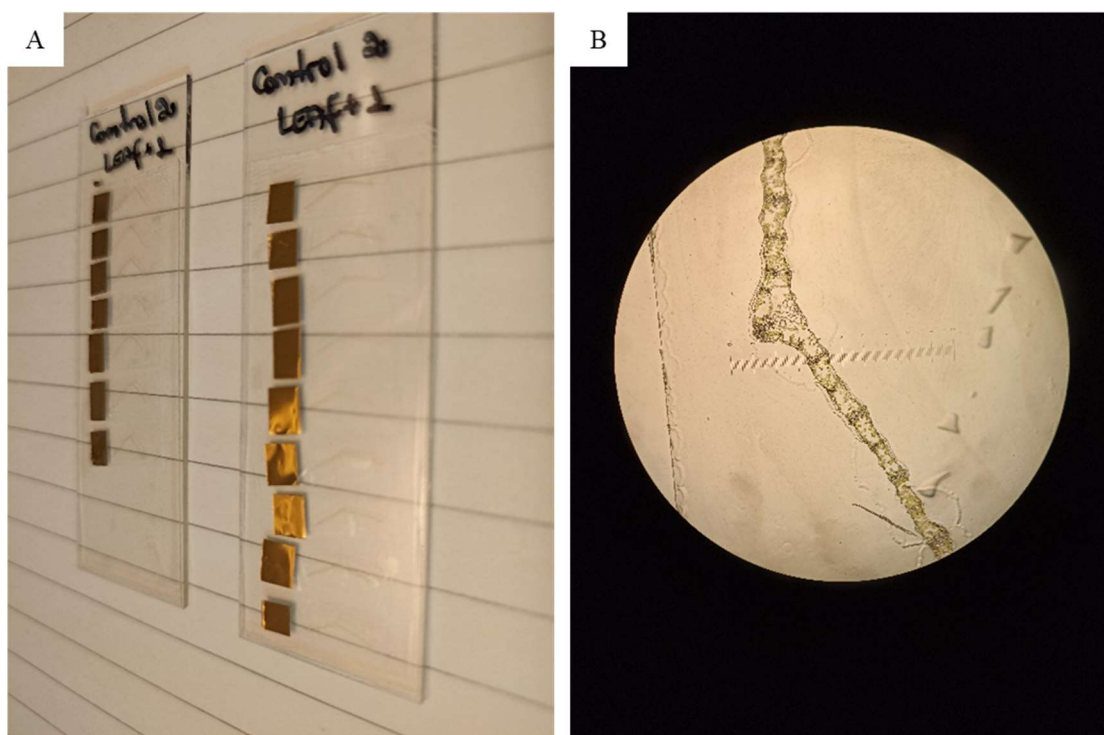


Figura 16. (A) Seções do limbo foliar da cevada fixadas em uma lâmina com auxílio de fita dupla-face. (B) Seção de limbo foliar ampliada no microscópio óptico (40x). **Fonte.** Vieira (2022).

As seções dos tratamentos Si150, Si400, SiNa e Controle foram posteriormente submetidas a ablação a laser no LA-ICP-MS (Imagem 17).

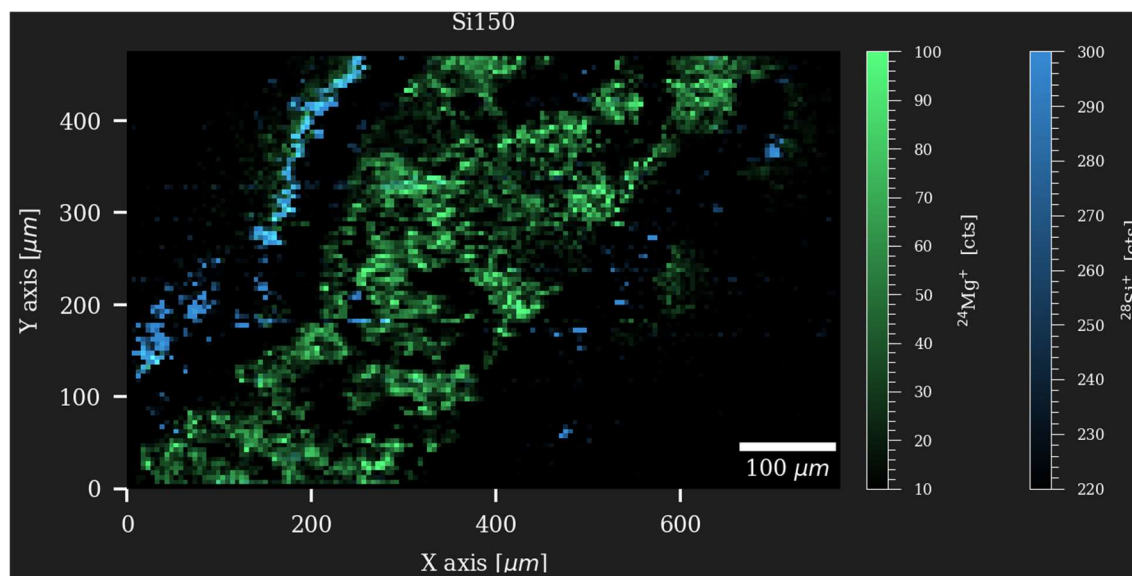


Figura 17. Imagem da seção de limbo foliar do tratamento Si 150 obtida através da ablação a laser no LA-ICP-MS. **Fonte.** Operson (2023).

4.4 Análise estatística

Os dados obtidos de MF, MS, teor de Si, taxa de assimilação de CO₂, transpiração e condutância estomática foram submetidos à análise de variância ($P < 0,05$) e comparados pelo teste de Tukey ($P < 0,05$), quando as médias foram significativas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O fornecimento de Si através das raízes influenciou de forma significativa no maior acúmulo de biomassa fresca nos tecidos vegetais planta e raiz, que apresentaram valores médios 19,65 e 26,90% respectivamente maiores, quando comparados às plantas do tratamento controle (Figura 18). Filho (2017), também constatou maior acúmulo de biomassa fresca da parte aérea e sistema radicular em mudas de *Coffea arabica*, após o fornecimento de silicato de potássio através das raízes.

O fornecimento de Si através do sistema radicular assim como sua deposição nas folhas não influenciou de forma significativa no acúmulo de biomassa seca na parte aérea e no sistema radicular. Roldi et al, (2015) observaram um efeito similar na parte aérea de plantas de café que receberam silicato de potássio, pois não obtiveram incremento no acúmulo de biomassa seca. O aumento de plantas em função do fornecimento de Si era um

fator esperado no caso da cevada, uma vez que esta é uma espécie acumuladora desse elemento, com absorção ativa do mesmo (Epstein 1999).

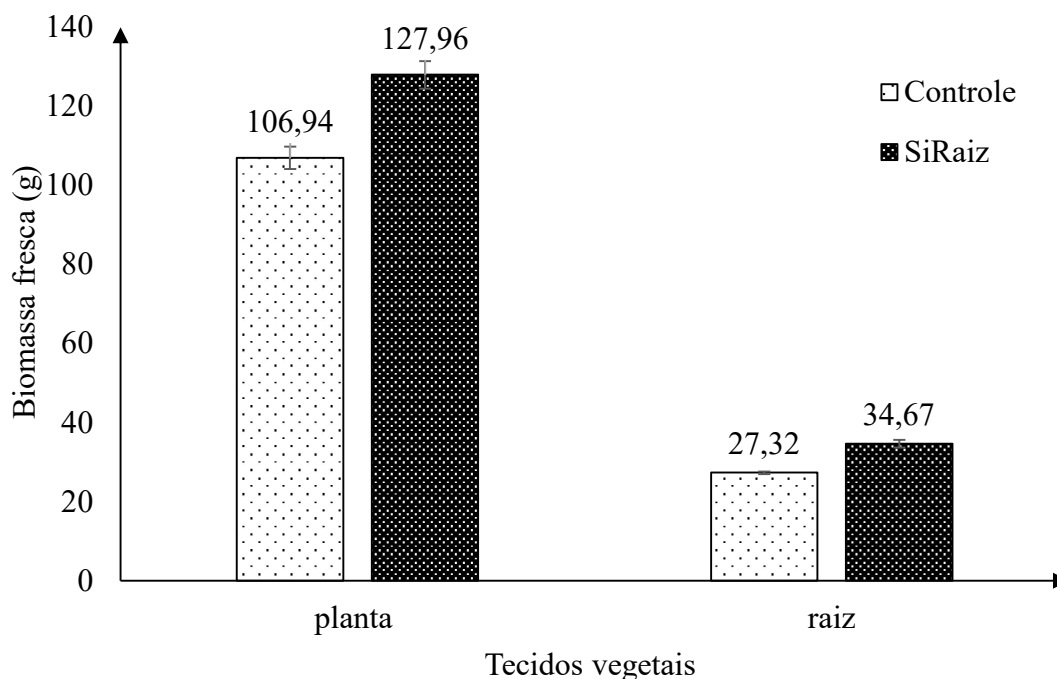


Figura 18. Acúmulo de biomassa fresca (g) observado nos tratamentos Controle e SiRaiz nos tecidos vegetais planta e raiz.

O acúmulo de Si foi influenciado significativamente pelo fornecimento desse elemento através do sistema radicular e não significativamente quando ele foi aplicado nas folhas (Tabela 3). Dentre os tecidos vegetais avaliados, observa-se que 97,5% do Si estavam acumulados nas folhas e houve acúmulo de apenas 2,5% no perfilho. O maior acúmulo desse elemento no tratamento SiRaiz evidência elevada capacidade de absorção e uso de Si pelo sistema radicular (Mitani; Ma; Iwashita 2005; Casey et al.2003).

A distribuição de Si foi similar entre os tratamentos foliares avaliados. Do total de Si absorvido pelos tratamentos Si150 e SiNa, 80,1 e 78,9% estavam acumulados nas folhas, respectivamente. Apenas uma pequena parcela foi redistribuída através do perfilho, que apresentou acúmulo de 19,9 e 21,1%, respectivamente, para os tratamentos Si150 e SiNa.

As concentrações de Si nas plantas controle, por mais que pequenas, foram quantificadas no método analítico empregado (ICP-MS). Tais valores podem ser considerados pequenos uma vez que a ausência de Si é um evento improvável, visto que esse é o segundo elemento mais abundante da crosta terrestre (Epstein, 1994). A origem

nesse contexto, pode estar vinculada a presença de Si na composição da água utilizada nos umidificadores da casa de vegetação e até na própria composição dos reagentes (sais) utilizados no preparo das soluções.

Tabela 3. Concentração de Si nos tecidos vegetais F+1, F+2 e perfilho. *Médias seguidas de letras minúsculas distintas entre si, diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Tratamentos	F+1		F+2		Perfilho	
	Si (µg g ⁻¹)					
Controle	226,88	b	251,88	b	276,88	b
SiRaiz	87580,54	a	86118,69	a	4372,59	a
SiNa	682,36	b	534,03	b	323,90	b
Si150	644,17	b	630,32	b	315,70	b
Si400	665,63	b	558,60	b	6,01	c

Nota-se uma baixa concentração de Si em todos os tecidos vegetais dos tratamentos foliares. A baixa eficiência de absorção desse elemento pelas folhas pode estar vinculada ao menor tempo de fornecimento de Si através das folhas (3,5 vezes menor), como também a menor dose utilizada (18 mmol L^{-1}). Mauad et al. (2006), testando diferentes doses de Si na cultura do arroz, verificaram que o aumento das doses proporcionou maiores teores foliares de Si. A baixa assimilação desse elemento através das folhas pode também estar relacionado a própria composição molecular das fontes Nano Silicon 150 e Nano Silicon 400, assim como do $\text{Na}_2\text{O}_3\text{Si } 9\text{H}_2\text{O}$.

Os dados demonstram que o metabolismo fotossintético foi influenciado pela aplicação de Si de forma significativa (Figura 19). O acúmulo de Si em plantas apresenta relação positiva com o aumento da eficiência de uso da água (Walker; Lance, 1991) e, com a taxa de fotossíntese (Epstein, 1999). Entretanto, o acúmulo significativo de Si foi evidenciado apenas no tratamento em que esse elemento foi fornecido às raízes.

Evidências de que a assimilação de Si pode contribuir para uma elevação no teor de clorofila e de outros pigmentos em plantas acumuladoras de Si como arroz (Chen W. et al., 2011) e não acumuladoras como tomate (Muneer et al., 2014; Cao et al., 2015) já foram descritas por alguns autores. Contudo, a elevação no teor de clorofila pode variar de acordo

com espécies diferentes, como também cultivares e nem sempre é significativa (Mahdiah et al., 2015; Ali et al., 2018).

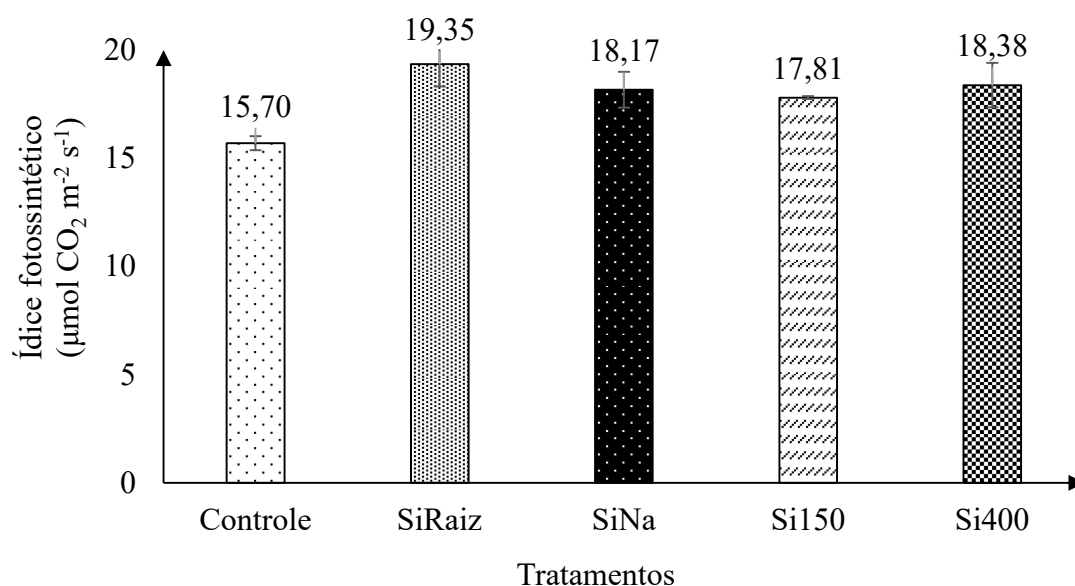


Figura 19. Atividade fotossintética ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) das plantas de cevada uma semana após adubação foliar.

Diversos fatores foram propostos para explicar como o Si modifica parâmetros do metabolismo fotossintético. Além de alteração nos pigmentos, o fornecimento de Si geralmente aumenta a condutância estomática (Sonobe et al., 2009; Kang et al., 2016; Sattar et al., 2019) e, portanto, a taxa fotossintética (Gong and Chen, 2012; Liu et al., 2014; Amin et al., 2018), alterando as relações de trocas gasosas. O fornecimento de Si às folhas e às raízes influenciou na transpiração de forma significativa nesse estudo (Figura 20), porém de forma não significativa na condutância estomática (Figura 21).

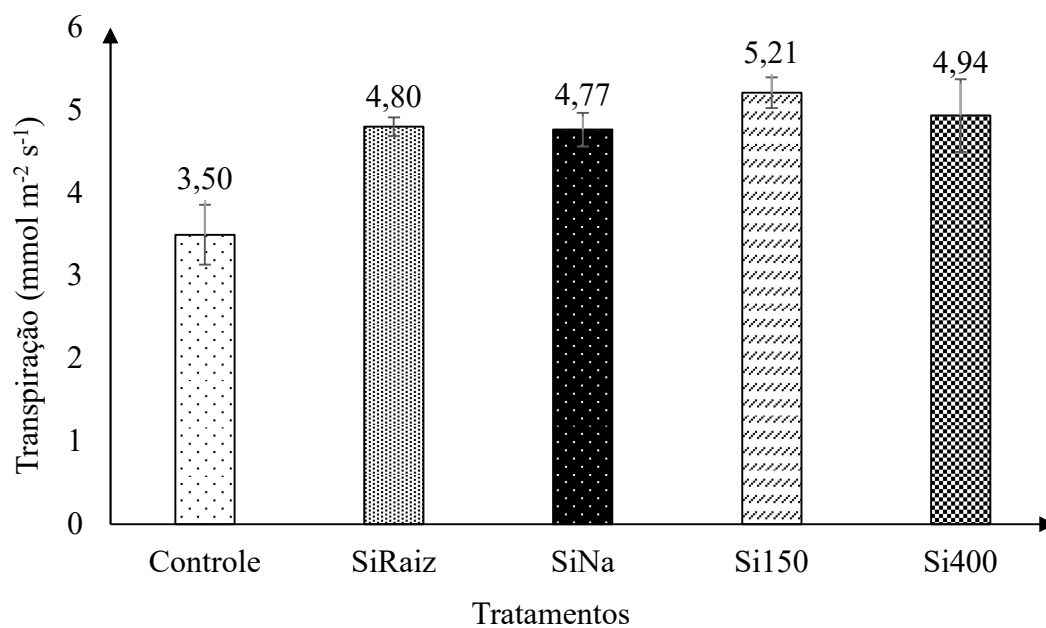


Figura 20. Transpiração ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) das plantas de cevada uma semana após adubação foliar.

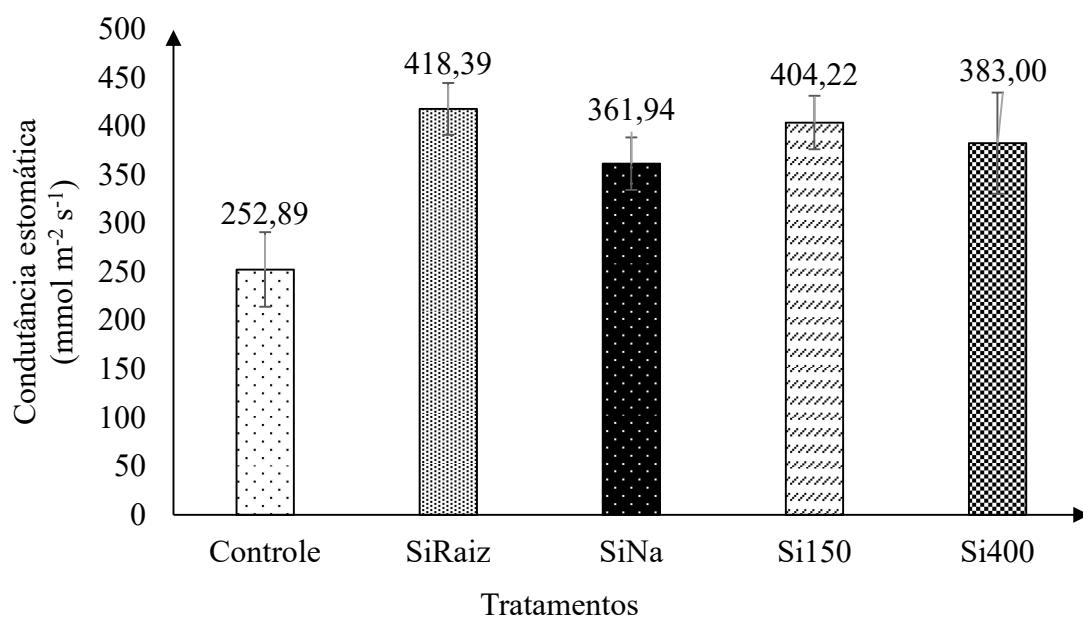


Figura 21. Condutância estomática ($\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) das plantas de cevada uma semana após adubação foliar.

Imagens obtidas através do LA-ICP-MS demonstram que o Si acumulado nos tecidos vegetais F+1 e F+2, dos tratamentos foliares, está retido na superfície da epiderme das folhas, e muito pouco penetrou no mesofilo (Figura 22). É incerto afirmar que mínimas concentrações, como o observado nesse experimento, são suficientes para influenciar em modificações nos parâmetros fotossintéticos. Estudos contendo mais detalhes a respeito da interação do Si a níveis teciduais são urgentemente necessários, principalmente pois são poucos os trabalhos que contém dados sobre o teor desse elemento na planta (Thorne SJ, Hartley SE and Maathuis FJM 2020).

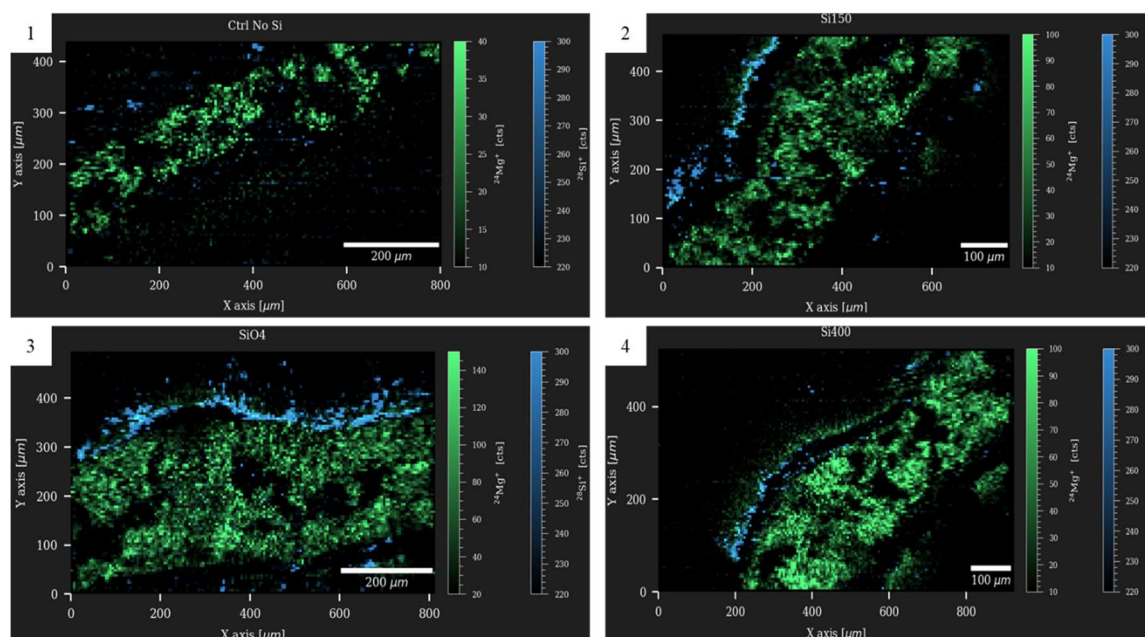


Figura 20. Imagens do LA-ICP-MS de fragmentos do limbo foliar utilizando Mg presente na clorofila como contraste para determinar células vegetais. Pontuações azuis representam o Si. (1). Controle (2) Si150. (3) SiNa. (4) Si400. **Fonte.** Operson (2023).

6. CONCLUSÃO

O fornecimento de silício através do sistema radicular influenciou no maior acúmulo de biomassa fresca nos tecidos vegetais raiz e planta, assim como em maior incremento no teor desse elemento benéfico em todos os tecidos vegetais avaliados, cujo valor máximo de 87580,54 $\mu\text{g g}^{-1}$ foi observado no tecido vegetal F+1. A estratégia de manejo nutricional deve procurar melhorar a nutrição em Si para otimizar os atributos de trocas gasosas das folhas, a fotossíntese e, por fim, a produção de biomassa.

7. REFERÊNCIAS

- Agarie, S.; Agata, W.; Kaufman, P. B. **Involvement of silicon in the senescence of rice leaves.** Plant Production Science, Tokyo, v. 1, n. 2, p. 104-105, 1998. <http://dx.doi.org/10.1626/pps.1.104>
- Ali, N., Schwarzenberg, A., Yvin, J., and Hosseini, S. A. 2018. **Regulatory Role of Silicon in Mediating Differential Stress Tolerance Responses in Two Contrasting Tomato Genotypes Under Osmotic Stress.** *Front. Plant Sci.* 96, 1475. doi: 10.3389/fpls.2018.01475
- Amin, M., Ahmad, R., Ali, A., Hussain, I., Mahmood, R., Aslam, M., et al. 2018. **Influence of Silicon Fertilization on Maize Performance Under Limited Water Supply.** *Silicon* 10, 177–183. doi: 10.1007/s12633-015-9372-x
- Araus, J. L., G. A. Slafer, M. P. Reynolds, and C. Royo. 2002. **Plant breeding and drought in C3 cereals: what should we breed for?** *Annals of Botany* 89: 925–940.
- Barbosa Filho, M. P.; Snyder, G. H.; Fageria, N. K.; Datnoff, L. E.; Silva, O. F. **Silicato de cálcio como fonte de silício para o arroz de sequeiro.** *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Piracicaba, v. 25, n. 2, p. 325-330, 2001.
- Barzotto, G. R.; Lima, S. F.; Santos, O. F.; Piat, G. L.; Wassoloswski, C. R. **Adubação nitrogenada e inoculação com Azospirillum brasilense em cevada.** *Nativa*, Sinop, v. 6, n. 1, p. 01-08, 2018. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/4611>. Acesso em: 03 ago. 2021.
- Bohnert, H. J., R. G. Nelson, and R. E. Jensen. 1995. **Adaptation to environmental stresses.** *The Plant Cell* 7: 1099–1111.
- Botelho, D. M. S.; Pozza, E. A.; Pozza, A. A. A.; Carvalho, J. G.; Botelho, C. E.; Souza, P. E. **Intensidade da cercosporiose em mudas de cafeeiro em função de fontes e doses de silício.** *Fitopatologia Brasileira*, Brasília, v. 30, n. 6, p. 582-588, 2005.
- CAMARGO, P.N. de; SILVA, O. **Manual de nutrição foliar.** São Paulo: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1990. 251p.
- Cao, B. L., Ma, Q., Zhao, Q., Wang, L., and Xu, K. (2015). **Effects of silicon on absorbed light allocation, antioxidant enzymes and ultrastructure of chloroplasts in tomato leaves under simulated drought stress.** *Sci. Hortic. (Amsterdam)*. 194, 53–62. doi: 10.1016/j.scienta.2015.07.037
- Carpentieri-Pipolo, V.; Minella, E.; Vareschi, L. J. L.; Crossmann, M. V. E. **Melhoramento de Cevada nua com elevados níveis de β - glucana e seus benefícios na redução do colesterol.** Passo Fundo: Embrapa Trigo (Documentos Online 191), 2021. 21 p. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1132286/1/Doc-191-online.pdf>. Acesso em: 03 ago. 2021.
- Casey, W.H.; Kinrade, S.D.; Knight, C.T.G.; Rains, D.W.; Epstein, E. **Aqueous silicate complexes in wheat, *Triticum aestivum* L.** *Plant Cell and Environment*, Oxford, v. 27, n. 1, p. 51–54, 2003.

- Chaves, M. M., Flexas, J., and Pinheiro, C. (2009). **Photosynthesis under drought and salt stress: Regulation mechanisms from whole plant to cell.** *Ann. Bot.* 103, 551–560. doi: 10.1093/aob/mcn125
- Chen, W., Yao, X., Cai, K., and Chen, J. (2011). **Silicon alleviates drought stress of rice plants by improving plant water status, photosynthesis and mineral nutrient absorption.** *Biol. Trace Elem. Res.* 142, 67–76. doi: 10.1007/s12011-010-8742-x
- Coskun, D., Britto, D. T., Huynh, W. Q., and Kronzucker, H. J. (2016). **The Role of Silicon in Higher Plants under Salinity and Drought Stress.** *Front. Plant Sci.* 7:1072. doi: 10.3389/fpls.2016.01072
- Costa RR, Moraes JC & Costa RR (2009) **Interação silícioimidacloprid no comportamento biológico e alimentar de Schizaphis graminum (Rond.) (Hemiptera: Aphididae) em plantas de trigo.** *Ciência e Agrotecnologia*, 33:455-460.
- Deren C (2001) **Plant genotypes, silicon concentration and silicon related responses.** In: Datnoff L. E, Snyder G. H, & Korndörfer Gh (Eds.) *Silicon in Agriculture*. Amsterdam, Elsevier Science. p.149-158.
- Ellsworth, D. S. 1999. **CO₂ enrichment in maturing pine forest: A CO₂ exchange and water stress in the canopy affected.** *Plant, Cell and Environment* 22: 461–472.
- Epstein, E (2001) **Silicon in plants: Facts vs. concepts.** In: Datnoff L. E, Snyder G. H, Korndörfer G. H, (Eds.) *Silicon in Agriculture*. Amsterdam, Elsevier Science. p.1-15.
- Epstein, E. Silicon. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo alto, v. 50, p. 641-664, 1999.
- Epstein, E. **The anomaly of silicon plant biology.** *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, Washington, v. 91, p. 11-17, 1994.
- FAO and ITPS (2015). **Status of the Worlds Soil Resources (Main Report).** <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01241064/>.
- FAO. **Statistical Programme of Work 2020 – 2021.** Rome: FAO, 2020. DOI 10.4060/ca9734en. Disponível em: <http://www.fao.org/3/ca9734en/CA9734EN.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2021.
- Figliolia, M. B., et al. Análise de sementes. In: Aguiar, I. B., et al. **Sementes Florestais Tropicais.** Brasília: ABRATES, 1993. p. 137-174. **ISOLANTES, Condicionadores de Solo e Substratos. Minério de Vermiculita Crua Concentrada.** Disponível em: (<http://www.eucatex.com.br/eucatex/descricao.asp?B2=&A1=15&A2=104>). Acesso em: 23 de março de 2009.
- Filho, P. F. M. C. **Silicato de potássio na aclimação de mudas de Coffea arabica L.** Orientador: Silvio de Jesus Freitas. 2017. 65 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, 2017.
- Flowers, T. J., and Colmer, T. D. (2008). **Salinity tolerance in halophytes.** *New Phytol.* 179, 945–963. doi: 10.1111/j.1469-8137.2008.02531.
- Gadelha, R. G. F.; Prado, J. P. S.; Cavaleiro, J. M. O. **Farinha do bagaço de cevada em dietas para a engorda de camarões marinhos.** *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 40, n. 1, p. 170-174, 2010.

- Gao, X., C. Zou, L. Wang, and F. Zhang. 2004. **Silicon improves water use efficiency in maize plants.** *Journal of Plant Nutrition* 27: 1457–1470.
- Gong, H., and Chen, K. (2012). **The regulatory role of silicon on water relations, photosynthetic gas exchange, and carboxylation activities of wheat leaves in field drought conditions.** *Acta Physiol. Plant*, 1–6. doi: 10.1007/s11738-012- 0954-6
- Hamayun, M., E. Sohn, S. A. Khan, Z. K. Shinwari, A. L. Khan, and I. Lee. 2010. **Silicon alleviates the adverse effects of salinity and drought stress on growth and endogenous plant growth hormones of soybean (*Glycine max* L).** *Pakistan Journal of Botany* 42: 1713–1722.
- Hattori, A., S. Inanaga, H. Araki, P. An, S. Mortia, M. Luxova, and A. Lux. 2005. **Application of silicon enhanced drought tolerance in sorghum bicolor.** *Journal of Plant Physiology* 123: 459–466.
- Hubert, B., M. Rosegrant, A. J. S. Martinus, V. Boekel, and R. Ortiz. 2010. **The future of food: Scenarios for 2050.** *Journal of Crop Sciences* 50: 33–50.
- IPCC (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report.* doi: 10.1017/CBO9781107415324.004
- Kang, J., Zhao, W., and Zhu, X. (2016). **Silicon improves photosynthesis and strengthens enzyme activities in the C3 succulent xerophyte *Zygophyllum xanthoxylum* under drought stress.** *J. Plant Physiol.* 199, 76–86. doi: 10.1016/j.jplph.2016.05.009
- Khan, M. B., M. Farooq, M. Hussain, Shanawaz, and G. Shabir. 2010. **Foliar application of micronutrients improves the wheat yield and net economic return.** *International Journal of Agriculture and Biology* 12: 953–956.
- Kim, W., Iizumi, T., and Nishimori, M. (2019). **Global patterns of crop production losses associated with droughts from 1983 to 2009.** *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 58, 1233–1244. doi: 10.1175/JAMC-D-18-0174.1
- Korndörfer G. H, Arantes VA, Corrêa GF & Snyder GH (1999a) **Efeito do silicato de cálcio no teor de silício no solo e na produção de grãos de arroz de sequeiro.** *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 23:623- 629.
- Lantmann, A.F.; Castro, C.; Wietholter, S. **O potássio na cultura do trigo.** In: Yamada, T.; Roberts, T.L. (Ed). *Potássio na agricultura brasileira.* Piracicaba: Instituto da Potassa e do Fosfato; Instituto Internacional da Potassa, 2005. p. 723 - 742.
- Limberger, V. M.; Francisco, A, Borges, M.R.; Oro, T.; Ogliari, P. J.; Scheuer, P. M.; Noronha, C. M. **Extração de β -glucanas de cevada e caracterização parcial do amido residual.** *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 41, n 12, p. 2217-2223, 2011.
- Liu, P., Yin, L., Deng, X., Wang, S., Tanaka, K., and Zhang, S. (2014). **Aquaporin-mediated increase in root hydraulic conductance is involved in silicon-induced improved root water uptake under osmotic stress in *Sorghum bicolor* L.** *J. Exp. Bot.* 65, 4747–4756. doi: 10.1093/jxb/eru220
- Mahdieh, M., Habibollahi, N., Amirjani, M. R., Abnosi, M. H., and Ghorbanpour, M. (2015). **Exogenous silicon nutrition ameliorates salt- induced stress by improving growth and efficiency of PSII in *Oryza sativa* L. cultivars.** *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 15, 1050–1060. doi: 10.4067/S0718- 951620150050000073

- Martins, C. C. et al. **Umedecimento do substrato na emergência e vigor de plântulas de pupunheira**. Revista Brasileira de Fruticultura, Jaboticabal, v. 31, n. 1, p. 224 - 230, 2009.
- Matoh, T., S. Murata, and E. Takahashi. 1991. **Effect of silicate application on photosynthesis of rice plants**. Japan. Journal of Soil Science and Plant Nurtition 62: 248–251.
- Mauad, M. **Desenvolvimento e marcha de absorção de silício em plantas de arroz sob condição de déficit hídrico e adubação silicatada**. 2006. 107 p. Tese (Doutor em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho, Botucatu, 2006.
- Melo SP, Korndörfer GH & Korndörfer CM (2003) **Silicon accumulation and water deficit tolerance in Brachiaria grasses**. Scientia Agricola, 60:755-759.
- Minella, E. **Melhoramento da cevada**. In: Borem, A. (Ed.). Melhoramento de espécies cultivadas. 6 ed. Viçosa: Editor a UFV, 1999. p. 253 - 272. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/825403>. Acesso em: 12 jul. 2021.
- Mitani, N.; Ma, J.F.; Iwashita, T. **Identification of the silicon form in xylem sap of rice (*Oryza sativa* L.)**. Plant and Cell Physiology, Tokyo, v. 46, n. 2, p. 279–283, 2005.
- Muneer, S., Park, Y. G., Manivannan, A., Soundararajan, P., and Jeong, B. R. 2014. **Physiological and proteomic analysis in chloroplasts of *Solanum lycopersicum* L. under silicon efficiency and salinity stress**. *Int. J. Mol. Sci.* 15, 21803–21824. doi: 10.3390/ijms151221803
- Nascimento, Jackeline Matos do; Souza, Cristiano Márcio Alves de; Arcoverde, Álvaro Napoleão Soares; Altomar, Pedro Henrique. **Aplicação de maturador e fertilizante foliar em cana-de-açúcar**. Ilha Solteira: Revista Cultura Agronômica, 2021
- Prado, A.M; Kauer, C.; Soto, O.; Solar, C.E.D.; Soza, J.E.; Depallens, D. 2008. **Adyuvantes, sus propiedades eefectos en las aplicaciones de fitorreguladores**. Disponívelem: Acesso em:4 nov. 2008.
- Rodrigues, T. M. **Produção de crisântemo cultivado em diferentes substratos fertirrigados com fósforo, potássio e silício**. 2006. 84 p. Tese (Doutorado em Fitotecnia) Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.
- Roldi, M.; Dias-arieira, C. R.; Dorigo, O. F.; da Silva, S. A.; Machado, A. C. 2015. **Controle de *Meloidogyne paranaensis* em cafeeiro mediado pela aplicação de silício**. IX Simpósio de Pesquisa dos Cafés do Brasil, Curitiba- Paraná.
- Roy, S. J., Negrão, S., and Tester, M. 2014. **Salt resistant crop plants**. Curr. Opin. Biotechnol. 26, 115–124. doi: 10.1080/00103624.2017.1323090.
- Sacala, E. 2009. **Role of silicon in plant resistance to water stress**. Journal Elopements 14: 619–630.
- Sakamoto, A., and N. Murata. 2002. **The role of glycine betain in the protection of plants from stress: Clues from transgenic plants**. Plant Cell and Environment 25: 163–171.
- Sallam, A., Alqudah, A. M., Dawood, M. F. A., Baenziger, P. S., and Börner, A. 2019. **Drought stress tolerance in wheat and barley: Advances in physiology, breeding and genetics research**. *Int. J. Mol. Sci.* 20, 3137. doi: 10.3390/ijms20133137

Samarakoon, A. B., and R. M. Gifford. 1995. **Soil water content under plants at high CO₂ concentration and interaction with the treatment and CO₂ effect.** A species comparison. *Journal of Biogeography* 22: 193–202.

Santa-María, G.E., Lavres, J. and G. Rubio. 2023. **The concept of mineral plant nutrient in the light of evolution.** *Plant Science* 334: 111747. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2023.111747>

Santoro, M. M., Y. Liu, S. M. A. Khan, L. X. Hou, and D. W. Bolen. 1992. **Increased thermo-stability of proteins in the presence of naturally occurring osmolytes.** *Biochemistry* 31: 5278–5283.

Sattar, A., Cheema, M. A., Sher, A., Ijaz, M., Ul-Allah, S., Nawaz, A., et al. 2019. **Physiological and biochemical attributes of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings are influenced by foliar application of silicon and selenium under water deficit.** *Acta Physiol. Plant* 41, 1–11. doi: 10.1007/s11738-019-2938-2

Savant N. K, Korndörfer G. H, Snyder G. H & Datnoff L. E, (1999) **Silicon Nutrition and Sugarcane Production: A review.** *Journal of Plant Nutrition*, 12:1853-1903.

Skirycz, A., and Inzé, D. (2010). **More from less: Plant growth under limited water.** *Curr. Opin. Biotechnol.* 21, 197–203. doi: 10.1016/j.copbio.2010.03.002

Sonobe, K., Hattori, T., An, P., Tsuji, W., Eneji, E., Tanaka, K., et al. (2009). **Diurnal variations in photosynthesis, stomatal conductance and leaf water relation in sorghum grown with or without silicon under water stress.** *J. Plant Nutr.* 32, 433–442. doi: 10.1080/01904160802660743

Thorne, Sarah J.; Hartley, Susan E.; Maathuis, Frans J. M.. **Is Silicon a Panacea for Alleviating Drought and Salt Stress in Crops?** Tasmania: Frontiers In Plant Science, 2020

Walker, C.D.; Lance, R,C,M,. **Silicon accumulation and ¹³C composition as indices of water-use efficiency in barley cultivars.** *Australian Journal of Plant Physiology*, Melbourne, v. 18, p. 427–434, 1991.

Waseem, M., A. Ali, M. Tahir, M. A. Nadeem, M. Ayub, A. Tanveer, R. Ahmad, and M. Hussain. 2011. **Mechanism of drought tolerance in plant and its management through different method.** *Continental Journal Agricultural Science* 5: 10–25.

Yang, S., Vanderbeld, B., Wan, J., and Huang, Y. (2010). **Narrowing down the targets: Towards successful genetic engineering of drought-tolerant crops.** *Mol. Plant* 3, 469–490. doi: 10.1093/mp/ssq016.

Yoshida, S., Ohnishi, Y., and Kitagishi, K. (1962b). **Histochemistry of Silicon in Rice Plant.** *Soil Sci. Plant Nutr.* 8, 1–5. doi: 10.1080/00380768.1962.10430982