

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**APLICAÇÃO FOLIAR DE ÁCIDO GLUTÂMICO E DE SILÍCIO
EM MILHO CULTIVADO EM CAMPO SOB DEFICIÊNCIA DE
NITROGÊNIO**

**Thiago Feliph Silva Fernandes
Engenheiro Agrônomo**

2024

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**APLICAÇÃO FOLIAR DE ÁCIDO GLUTÂMICO E DE SILÍCIO
EM MILHO CULTIVADO EM CAMPO SOB DEFICIÊNCIA DE
NITROGÊNIO**

Thiago Feliph Silva Fernandes

Orientador: Prof. Dr. Renato de Mello Prado

Coorientador: Prof. Dr. Cid Naudi Silva Campos

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Doutor em Agronomia (Produção Vegetal).

2024

F363a

Fernandes, Thiago Feliph Silva

Aplicação foliar de ácido glutâmico e de silício em milho cultivado em campo sob deficiência de nitrogênio / Thiago Feliph Silva Fernandes. -- Jaboticabal, 2024

45 p. : il., fotos

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Renato de Mello Prado

Coorientador: Cid Naudi Silva Campos

1. Bioestimulantes. 2. Ácido glutâmico (Glu). 3. Silício (Si). 4. Deficiência de nitrogênio (N). 5. Mitigadores. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

Impacto potencial desta pesquisa

A pesquisa enfoca aplicação foliar do ácido glutâmico e do silício no cultivo do milho tendo um impacto social, econômico e ambiental, alinhada aos ODS 2, 12 e 13. Este estudo visa melhorar a produtividade das plantas sob deficiência de nitrogênio contribuindo para o avanço da ciência agrônômica e beneficiando a sociedade e o meio ambiente.

Potential Impact of This Research

The research focuses on the foliar application of glutamic acid and silicon in corn cultivation, having social, economic, and environmental impacts aligned with SDGs 2, 12, and 13. This study aims to improve plant productivity under nitrogen deficiency, contributing to the advancement of agronomic science and benefiting society and the environment.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: APLICAÇÃO FOLIAR DE ÁCIDO GLUTÂMICO E DE SILÍCIO EM MILHO CULTIVADO EM CAMPO SOB DEFICIÊNCIA DE NITROGÊNIO

AUTOR: THIAGO FELIPH SILVA FERNANDES

ORIENTADOR: RENATO DE MELLO PRADO

COORIENTADOR: CID NAUDI SILVA CAMPOS

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Agronomia (Produção Vegetal), pela Comissão Examinadora:

Documento assinado digitalmente
gov.br **RENATO DE MELLO PRADO**
Data: 18/07/2024 11:38:58 -0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. RENATO DE MELLO PRADO (Participação Virtual)
Departamento de Ciências da Produção Agrícola / FCAV UNESP Jaboticabal

Pós-Doutoranda GILMARA PEREIRA DA SILVA (Participação Virtual)
Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL) / Lisboa/Portugal

Documento assinado digitalmente
gov.br **GILMARA PEREIRA DA SILVA**
Data: 19/07/2024 13:15:31 -0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. GABRIEL BARBOSA DA SILVA JÚNIOR (Participação Virtual)
Departamento de Fitotecnia / Universidade Federal do Piauí (UFPI) - Teresina/PI

Documento assinado digitalmente
gov.br **GABRIEL BARBOSA DA SILVA JÚNIOR**
Data: 18/07/2024 18:52:56 -0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Pós-Doutoranda EDILAINE ISTÉFANI FRANKLIN TRASPADINI (Participação Virtual)
Departamento de Ciência do Solo / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
gov.br **EDILAINE ISTÉFANI FRANKLIN TRASPADINI**
Data: 18/07/2024 17:45:54 -0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. ANTONIO MÁRCIO SOUZA ROCHA (Participação Virtual)
Fazenda de Ensino Pesquisa e Extensão (FEPE) / FCAV UNESP Jaboticabal

Documento assinado digitalmente
gov.br **ANTONIO MÁRCIO SOUZA ROCHA**
Data: 18/07/2024 14:08:39 -0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Jaboticabal, 18 de julho de 2024

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

THIAGO FELIPH SILVA FERNANDES, nasceu em Castanhal, Pará (PA). Possui graduação em Agronomia, habilitação em Engenheiro Agrônomo, pela Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), Campus Capitão Poço - PA. Durante a graduação foi estagiário voluntário na disciplina de fruticultura no período de 2014 a 2015, realizando pesquisas nas áreas de tecnologia e produção de sementes e mudas de frutíferas nativas e exóticas. Além disso, participou como estagiário voluntário na Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) Amazônia Oriental, no período de 2015 a 2018, auxiliando nas pesquisas de seleção de genótipos de *Citrus* sp. para a região citrícola do Nordeste Paraense. Foi ainda membro no grupo de pesquisa Interação Solo-Planta-Atmosfera na Amazônia (ISPAAm) no ano de 2017. Foi bolsista de Iniciação Científica do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) em parceria com EMBRAPA Amazônia Oriental (cota 2018-2019), auxiliando nas avaliações morfológicas e agronômicas de 12 progênies de *Citrus* sp. para fins de melhoramento genético, bem como na qualidade físico-química dos frutos das mesmas progênies. Em 2019 ingressou no curso de Mestrado Acadêmico do Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal), da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Câmpus de Jaboticabal, sob orientação do Prof. Dr. Gustavo Henrique de Almeida Teixeira. Entre 2019 e 2021 desenvolveu pesquisas com o uso da espectroscopia no infravermelho próximo (NIR) visando a classificação de mamoeiros quanto ao tipo sexual e diferentes cultivares. Em 2021 ingressou no curso de Doutorado Acadêmico do Programa de Pós-Graduação em Agronomia (Produção Vegetal), da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Câmpus de Jaboticabal, sob orientação do Prof. Dr. Renato de Mello Prado, onde entre 2021 e 2024 desenvolveu pesquisas com o uso de bioestimulantes aminoácidos e silício como estratégias sustentáveis para mitigação de estresse nutricional em grandes culturas. Recentemente foi aprovado no curso de Pós-Doutorado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

“Eu sou parte de uma equipe.
Então, quando venço, **não sou eu apenas quem vence.**
De certa forma, termino o trabalho de um **grupo enorme de pessoas.**”
Ayrton Senna

A Deus, pelo dom da vida.

À minha família, pelo auxílio e esforço.

Aos meus amigos e professores (do ensino básico ao superior) que tanto
contribuíram para minha trajetória acadêmica
em especial, ao meu orientador e amigo, Professor Dr. Renato de Mello Prado,
peça fundamental na minha formação acadêmica e intelectual.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus, Senhor de todas as coisas e destinos, que guia minha trajetória de vida, inspira meu trabalho e não me deixa fraquejar, a Ele toda a honra e glória.

À minha mãe Ana Maria N. Silva, por ser minha base e não medir esforços para que eu pudesse realizar meus sonhos, em tantas dificuldades que surgiram no caminho. Aos demais familiares, pois sem o esforço deles, não estaria concluindo mais uma etapa na minha vida.

A todos os professores que cooperaram para minha trajetória acadêmica, contribuindo com a minha formação intelectual e pessoal que, apesar de ser uma profissão importantíssima para a construção de uma sociedade melhor, é tão desvalorizada.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Renato de Mello Prado e ao meu Coorientador Cid Naudi Silva Campos pelos ensinamentos, oportunidades, paciência e preocupação com minha formação.

À instituição de ensino Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus Jaboticabal, pela oportunidade de contribuir para minha formação profissional, concedida por meio da realização deste curso.

A todo o corpo docente da instituição UNESP, que repassou um pouco dos seus conhecimentos para agregação da minha formação acadêmica, em especial aos professores que tive durante o doutorado, como Prof. Renato de Mello Prado, Prof^a. Mara Cristina Pessoa da Cruz e Prof. Rouverson Silva que compartilharam seus conhecimentos para realização deste curso.

À Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

À todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta etapa na minha vida acadêmica e pessoal.

**Meus sinceros agradecimentos,
Thiago Feliph S. Fernandes**

SUMÁRIO

RESUMO.....	1
ABSTRACT.....	1
LISTA DE FIGURAS.....	1
CAPÍTULO 1 - Considerações gerais.....	1
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1 Importância do nitrogênio na cultura do milho.....	3
2.2 Importância do ácido glutâmico (Glu) para as plantas.....	6
2.3 Importância do Si para as plantas.....	13
3. REFERÊNCIAS.....	17
CAPÍTULO 2 - Elucidando papel do ácido glutâmico e do silício fornecidos via foliar para aumentar a tolerância do milho a deficiência de nitrogênio¹.....	23
1. INTRODUÇÃO.....	24
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	26
2.1 Caracterização das áreas experimentais e do material vegetal	26
2.2 Delineamento, tratamentos e condução do experimento.....	28
2.3 Ensaio de homogeneidade da solução de Glu+Si.....	29
2.4 Variáveis analisadas.....	30
2.1 Análise estatística.....	31
3. RESULTADOS.....	31
3.1 Teste de turbidez das caldas.....	31
3.2 Análise univariada.....	34
3.2.1 Teor de nitrogênio (N) e silício (Si) foliar.....	34
3.2.2 Pigmentos fotossintéticos, FV/FM e GCI.....	35
3.2.3 CF e EE e Produtividade.....	37
3.3 Análise multivariada.....	39
3.3.1 Análise de Componentes Principais (PCA).....	39
4. DISCUSSÃO.....	40
4.1 Estabilidade das caldas Si, Glu e Glu+Si.....	40
4.2 Impacto da deficiência de N em plantas de milho.....	41

4.3	Papel do Si, Glu e Glu+Si na tolerância das plantas de milho a	
	deficiência nutricional de N.....	42
5.	CONCLUSÃO	45
6.	REFERÊNCIAS	46
CAPÍTULO 3 –	Considerações Finais	56

APLICAÇÃO FOLIAR DE ÁCIDO GLUTÂMICO E SILÍCIO EM MILHO CULTIVADO SOB DEFICIÊNCIA NITROGÊNIO

RESUMO

O uso de bioestimulantes na agricultura está crescendo, mas sua aplicação ainda é baseada em experimentação empírica, sem respaldo científico suficiente, o que é preocupante. Aminoácidos e silício (Si) são considerados os bioestimulantes mais promissores, com potencial para beneficiar as plantas. No entanto, seus efeitos positivos são incertos e variam conforme a presença ou ausência de estresse, especialmente a deficiência de nitrogênio (N), que é a condição mais comum no mundo. Assim, o objetivo deste trabalho foi verificar se a pulverização foliar de ácido glutâmico (Glu), isolado ou combinado com Si, pode otimizar a produção de milho sob deficiência de N e identificar os mecanismos bioquímicos e fisiológicos envolvidos. Para isso, realizaram-se dois experimentos em campo em duas áreas distintas da Unesp, Jaboticabal, Brasil. Nos dois experimentos aplicaram-se os mesmos tratamentos de aplicação foliar: controle (apenas água), Si isolado, Glu isolado e a combinação Glu+Si dispostos em delineamento em blocos casualizados com seis repetições. Realizaram-se avaliações nutricionais e fisiológicas na cultura. Nossas descobertas indicam que a aplicação foliar de Glu e Si tem efeitos benéficos semelhantes nas plantas de milho deficientes em N, modulando mecanismos fisiológicos ao reduzir o estresse oxidativo, no da concentração de pigmentos fotossintéticos e na melhoria da eficiência da fotossíntese e da produtividade.

Palavras-chave: Aminoácidos, efeito benéfico, glutamato, mitigação, Si

FOLIAR APPLICATION OF GLUTAMIC ACID AND SILICON IN CORN CULTIVATED UNDER NITROGEN DEFICIENCY

ABSTRACT

The use of biostimulants in agriculture is growing, but their application is still based on empirical experimentation without sufficient scientific backing, which is concerning. Amino acids and silicon (Si) are considered the most promising biostimulants, with the potential to benefit plants. However, their positive effects are uncertain and vary depending on the presence or absence of stress, especially nitrogen (N) deficiency, which is the most common condition worldwide. Thus, the objective of this work was to verify if foliar spraying of glutamic acid (Glu), either alone or combined with Si, can optimize maize production under N deficiency and identify the biochemical and physiological mechanisms involved. To achieve this, two field experiments were conducted in two different areas of Unesp, Jaboticabal, Brazil. The same foliar application treatments were applied in both experiments: control (water only), Si alone, Glu alone, and the combination of Glu+Si arranged in a randomized block design with six replications. Nutritional and physiological evaluations were carried out on the crop. Our findings indicate that foliar application of Glu and Si has similar beneficial effects on N-deficient maize plants by modulating physiological mechanisms, reducing oxidative stress, increasing the concentration of photosynthetic pigments, and improving the efficiency of photosynthesis and productivity.

Keywords: Amino acid, beneficial effect, glutamate, mitigation, Si

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1** - Valores máximos, médios e mínimos da temperatura do ar (a), e umidade relativa do ar (b) e radiação solar (c) durante o período experimental. 20
- Figura 2** - Índice de turbidez das caldas Control, Si, Glu e Si+Glu em função do tempo após a preparação das soluções 23
- Figura 3** - Avaliação das mudanças colorimétricas das caldas Control, Si, Glu e Si+Glu em função do tempo de 360 minutos após o preparo das soluções. 24
- Figura 4** - Efeitos das pulverizações foliares sob os teores de N (a, b) e Si (b, c) na cultura do milho em duas áreas experimentais (1, 2) com deficiência de N. As Letras diferem os efeitos entre os tratamentos, e ** os efeitos significativos, ambos a 1% de probabilidade pelo teste Tukey. As barras representam o erro padrão da média, n = 6. 25
- Figura 5** - Efeitos das pulverizações foliares sob chlorophyll a+b (a, b), carotenoids (c, d), Índice de Cor Verde – GCI (e, f) e rendimento quântico do PSII – FV/FM (g, h) na cultura do milho em duas áreas experimentais (1, 2) com potenciais deficiência de N. As Letras diferem os efeitos entre os tratamentos, e ** os efeitos significativos, ambos a 1% de probabilidade pelo teste Tukey. As barras representam o erro padrão da média, n = 6. 27
- Figura 6** - Efeitos das pulverizações foliares sob composto fenólicos – CF (a, b), Extravasamento de Eletrólitos – EE (c, d) e Produtividade (e, f) na cultura do milho em duas áreas experimentais com potenciais deficiência de N. As Letras diferem os efeitos entre os tratamentos, e ** os efeitos significativos, ambos a 1% de probabilidade pelo teste Tukey. As barras representam o erro padrão da média, n = 6. 29
- Figura 7** - Biplot das pulverizações foliares sob os teor de N, Si, Chlorophyll (a+b), Carotenoids, Índice de Cor Verde – GCI, rendimento quântico do PSII (FV/FM), Composto fenólicos (CF), Extravasamento de Eletrólitos (EE) e Produtividade na

cultura do milho em função de duas áreas experimentais com potenciais deficiência de N. Descreve os tratamentos, quais as áreas experimentais, o que tinha de diferentes nelas.

CAPÍTULO 1 - Considerações gerais

1. INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) é uma das culturas mais consumidas e demandadas em todo o mundo devido às suas propriedades nutricionais e sua versatilidade no uso alimentar e industrial (Serna-Saldivar, 2023). Essa alta demanda faz dele uma das culturas mais importantes nos níveis social e econômico (Erenstein et al., 2022). De acordo com as estatísticas da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura - FAOSTAT (2024), mais de 1,2 bilhão de toneladas de milho foram cultivadas no último ano em todo o mundo.

No cenário global, o Brasil destaca-se como um dos principais produtores e exportadores de milho (Bigolin e Talamini, 2024). Com uma produção que supera 100 milhões de toneladas anuais, o Brasil ocupa a terceira posição no ranking mundial, ficando atrás apenas dos Estados Unidos e da China (CONAB, 2024).

Apesar de o Brasil ser um líder na produção de milho, enfrenta desafios significativos relacionados à fertilidade de seus solos tropicais (Camargo et al., 2017). Nessas regiões, a deficiência de macronutrientes é frequente devido às características dos solos, o que pode levar a problemas de insegurança alimentar (De Mello Prado, 2021). A baixa fertilidade, especialmente a deficiência de nitrogênio (N), compromete o equilíbrio bioquímico e fisiológico das plantas, resultando em baixos rendimentos das culturas (Yadav et al., 2017).

O N é essencial para o crescimento vegetativo e reprodutivo das culturas, pois é um componente fundamental de aminoácidos, proteínas, enzimas e clorofila (Fathi, 2022). E a deficiência de N resulta em crescimento reduzido, folhas amareladas (clorose) e menor área foliar, diminuindo a capacidade fotossintética da planta (Wani et al., 2022). Além disso, afeta o desenvolvimento reprodutivo, resultando em menos flores, grãos e sementes de menor qualidade (Ahmad et al., 2023).

Mesmo quando a aplicação de N segue as recomendações técnicas, ainda podem ocorrer desequilíbrios em solos tropicais. Isso ocorre devido à alta lixiviação de nutrientes, à rápida mineralização da matéria orgânica e à acidez elevada desses solos, que reduzem a disponibilidade de N para as plantas (Raij, 2011). Além disso, a variabilidade espacial e temporal na disponibilidade de nutrientes pode dificultar a

aplicação uniforme e eficiente do N, resultando em áreas com deficiência desse nutriente dentro do mesmo campo (Robertson e Groffman, 2024).

Na prática, a adubação foliar complementa a adubação no solo ao fornecer N diretamente às folhas, ajudando a corrigir a deficiência de N. No entanto, essa abordagem pode não restaurar totalmente o equilíbrio bioquímico e fisiológico da planta, pois a deficiência prolongada de N pode causar danos, como degradação da clorofila e interrupção da síntese de proteínas, afetando a capacidade da planta de metabolizar e utilizar outros nutrientes, e, conseqüentemente, tornando a planta vulnerável a estresses abióticos e bióticos (Yadav et al., 2017; Taiz et al., 2021; Li et al., 2024).

Deste modo, a adubação foliar com bioestimulantes, como o ácido glutâmico (Glu) e o silício (Si), pode servir como uma alternativa para mitigar os efeitos da deficiência de N em plantas, mesmo sem a suplementação direta de N via solo ou foliar. No entanto, a maioria dos estudos sobre bioestimulantes utiliza produtos formulados por empresas com misturas de diferentes bioestimulantes, o que dificulta a identificação de quais substâncias são mais eficazes (Hosseini et al., 2023). Essa falta de clareza limita as discussões científicas significativas e impede o avanço do conhecimento na área.

Para compreender melhor, os bioestimulantes são substâncias aplicadas às plantas que melhoram seu crescimento e desenvolvimento (Rouphael et al., 2018). Embora eles não forneçam nutrientes diretamente, auxiliam as plantas a absorver nutrientes de maneira mais eficaz e a manter o seu equilíbrio homeostase (Mutalejoan et al., 2020). Esses produtos podem conter hormônios naturais ou sintéticos e são usados em pequenas quantidades nas folhas, solo ou sementes (Alfosea-Simón et al., 2020). Assim, a aplicação de bioestimulantes promove um crescimento mais vigoroso, aumenta a eficiência na absorção de nutrientes e ajuda a planta a lidar melhor com estresses ambientais (Khan et al., 2019).

O Glu é um aminoácido não essencial que atua como um regulador metabólico crucial que influencia vários processos fisiológicos e bioquímicos nas plantas (Lee et al., 2017). Sua aplicação foliar pode auxiliar a mitigar os efeitos da deficiência de nutrientes ao promover a síntese de proteínas e melhorar a utilização de outros nutrientes, mesmo na ausência de fornecimento direto de N (Song et al., 2022).

Estudos sobre a aplicação exógena de Glu via foliar demonstram que este aminoácido pode aumentar a capacidade fotossintética (De Souza Junior et al., 2021) e a concentração de N nas folhas (Röder et al., 2018). Além disso, pesquisas indicam que o Glu pode elevar os níveis de clorofila e carboidratos (Nahed e Balbaa, 2007), promover um aumento na massa seca das plantas (Malik e Azam, 1985) e melhorar o rendimento das culturas (Zeboon, 2018; Muhammad et al., 2014).

Outro bioestimulante relevante é o Si, um elemento benéfico que, embora não seja essencial, desempenha um papel importante no desenvolvimento das plantas. O Si melhora o metabolismo primário, aumentando a fotossíntese (Barreto et al., 2022) e a absorção de nutrientes (Araújo et al., 2022), e também afeta o metabolismo secundário, promovendo a produção de compostos fenólicos (Gou et al., 2020) e fortalecendo os sistemas de defesa antioxidante (Oliveira et al., 2019). Esses efeitos são evidentes em outros estudos que indicaram que a aplicação de Si melhora parâmetros como trocas gasosas, pigmentos fotossintéticos e produtividade em culturas como arroz (Deus et al., 2020), cana-de-açúcar (Paula, 2019), milho (Galindo et al., 2019), trigo (Puppe e Sommer, 2018), sorgo (Oliveira et al., 2019) e milheto (Ahmad et al., 2023).

Neste sentido, considerando as características distintas e os benefícios individuais do Glu e do Si, nossa hipótese é que a combinação desses bioestimulantes pode gerar efeitos sinérgicos significativos no crescimento e no desenvolvimento das plantas. O Glu também pode aumentar a eficácia do Si ao melhorar sua permanência e absorção pelas folhas, resultando em melhorias bioquímicas e fisiológicas nas plantas de milho sob deficiência de N. Portanto, o objetivo deste trabalho foi verificar se a pulverização foliar de Glu e Si, isolado ou combinado, pode otimizar a produção de milho sob deficiência de N e identificar os mecanismos bioquímicos e fisiológicos envolvidos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Importância do nitrogênio na cultura do milho

O milho (*Zea mays* L.) é uma das culturas agrícolas mais importantes e amplamente cultivadas no mundo. Originário da América Central, o milho desempenha um papel crucial na alimentação humana e animal, além de ser uma

matéria-prima essencial para inúmeras matérias primas para as indústrias. Seu cultivo se adapta a uma variedade de climas e solos, o que contribui para sua disseminação global.

Do ponto de vista econômico, o milho é um pilar para muitas economias agrícolas, especialmente em países em desenvolvimento. Ele é uma fonte significativa de rendimento para agricultores devido à sua alta produtividade e demanda constante. Nutricionalmente, o milho é uma fonte vital de carboidratos, fibras, vitaminas e minerais, sendo um alimento básico em muitas dietas ao redor do mundo. Além disso, é utilizado na produção de óleo de milho, xarope de milho e alimentos processados.

A cultura do milho é altamente exigente por N e uma das mais antigas culturas que apresenta as safras mais difundidas no mundo (Galindo et al. 2016). As altas doses de N devido a busca pelo aumento da produtividade, têm apresentado consequências, como por exemplo maiores custos do processo de produção de culturas não leguminosas (Nunes et al. 2015).

A cultura do milho responde eficientemente quanto a sua produtividade, a depender de fatores relacionados à cultura, ao solo e ao clima (Puntel et al., 2018). As interações são complexas entre a cultura, o solo e o clima, juntamente com a dificuldade de previsão da eficiência de uso do N, o que torna o manejo de N uma área onde estratégias eficientes são necessárias para melhorar a sustentabilidade dos sistemas de cultivo (Alemão et al., 2021).

Nas últimas quatro décadas houve aumento de 140% na produtividade do milho a nível mundial e isso esteve acompanhado do aumento de 40% das aplicações de N associado aos avanços em genética, práticas de gestão cultural, e medidas de controle de pragas (Smith et al., 2020).

Essa resposta da cultura do milho a N, se deve ao fato que esse nutriente desempenha funções como componente estrutural de macromoléculas e constituinte de enzimas sendo parte de moléculas primordiais para os vegetais (Faquin, 2005). Como exemplo, constituinte da clorofila, aminoácidos, proteínas, RNA, DNA, isso explica que quando há deficiência, o principal sintoma observado nas plantas é o amarelecimento e a clorose das folhas, devido à inibição da síntese de clorofila, e consequentemente menor taxa de fotossíntese, interferindo diretamente na produção

de massa seca (Epstein; Bloom, 2005; Meira; Buzetti, 2006) e produtividade de grãos (Kering et al., 2012).

Com isso, é necessário buscar o uso do manejo correto da adubação nitrogenada para suprir a demanda deste nutriente nas plantas durante o seu desenvolvimento (Zhang et al., 2015). O entendimento do balanço de N do solo pode ajudar a identificar a taxa ideal do fertilizante de N e evitar o empobrecimento excessivo do nutriente no solo assim como perdas (Scordia et al., 2021). Esse desperdício pode causar poluição das águas subterrâneas e superficiais devido à lixiviação de N, expondo humanos e animais a riscos com a saúde (Steffan et al., 2018).

As atividades agrícolas, com manejo inadequado do N principalmente na forma de amônia, são parcialmente responsáveis pela poluição atmosférica e chuva ácida (Bouwman et al., 2002a). Além disso, pode haver emissões de óxido nitroso (N_2O) originadas de processos de desnitrificação contribuindo com a destruição da camada de ozônio e o aquecimento global (Bouwman et al., 2002b).

O entendimento da razão entre a quantidade de N do fertilizante acumulado pelos grãos e a quantidade de N aplicada via fertilizante é a definição da eficiência do uso do nitrogênio, sendo importante para o manejo do N (Raun e Johnson, 1999; Santos et al., 2020; Nafziger e Rapp, 2020). A eficiência do uso do N é uma estratégia para reduzir as perdas de fertilizantes nitrogenados que estão associadas à redução da qualidade do ar e da água, bem como pode reduzir a taxa de fertilizante necessária para obter altas produtividade das lavouras (Santos et al., 2020).

Uma outra questão importante é a necessidade de melhoria na performance das plantas em ambientes com limitação do N no solo que é comum no mundo pois a deficiência deste nutriente induz as maiores perdas de produtividade dos cultivos especialmente na cultura do milho (Prado, 2021). Para isso, tem havido indicações que o uso de mitigadores de estresses fornecidos via foliar sem risco ambiental a exemplo dos bioestimulantes poderiam melhorar a tolerância e a sustentabilidade do cultivo do milho com deficiência de N e ainda se há resposta em cultivos sem estresse mas as respostas a essas questões precisam ser investigado.

2.2 Importância do ácido glutâmico (Glu) para as plantas

Um dos bioestimulantes que podem ser fornecidos via foliar nos cultivos seriam os aminoácidos, mas é necessário aprofundar o conhecimento em relação suas potencialidades e se é capaz de promover os benefícios na cultura do milho sob deficiência de N.

Os aminoácidos são importantes moléculas dos sistemas antioxidantes nas plantas, se tem exemplos de trabalhos com essa temática, como o que foi realizado com aplicação foliar de aminoácidos na cultura da soja, que identificou que a glicina reduziu a concentração de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) nas plantas (Teixeira et al., 2017), pois ela induz a produção de glioxilato (Alhasawi et al., 2015).

Neste contexto, por mais que todas as plantas produzam seus próprios aminoácidos (Lehninger, 2006), vários trabalhos têm demonstrado que o fornecimento exógeno de aminoácidos, apresentam efeitos benéficos, como ganhos significativos em vários processos bioquímicos e fisiológicos e dos vegetais.

Os vegetais sintetizam os aminoácidos protéicos e os não protéicos, utilizando como fonte o N (função estrutural) na forma de amônio. O nome dos aminoácidos muitas vezes deriva das fontes da qual foram isolados primeiramente, nesse caso, o glutamato foi inicialmente encontrado no glúten do trigo (Lehninger, 2006).

O aminoácido L-glutâmico, por sua vez desempenha papel fundamental na eficiência do metabolismo do N, pois é o primeiro composto formado na assimilação desse elemento, formando as amidas glutamina e asparagina, e a partir desses, o transporte para os diferentes órgãos da planta e a síntese de clorofila e outros aminoácidos (Taiz e Zeiger, 2009).

O glutamato e a glutamina são os doadores de N em uma larga variedade de reações biossintéticas, e após a assimilação de ambos, o N é incorporado a outros aminoácidos por meio de reações de transaminação. As enzimas que catalisam tais reações são conhecidas como aminotransferases, as mesmas estão localizadas nos cloroplastos e desempenham um importante papel na biossíntese dos aminoácidos (Taiz e Zeiger, 2009). Os aminoácidos são formados de esqueletos de carbono derivado de 3-fosfoglicerato, do fosfoenolpiruvato ou do piruvato gerados durante a glicólise, ou ainda do α -cetoglutarato ou do oxaloacetato formados no ciclo do ácido cítrico (Taiz e Zeiger, 2009). Portanto, o glutamato é formado por aminação redutiva

do α -cetoglutarato e serve como precursor da glutamina, prolina e arginina (Lehninger, 2006).

Foram relatados efeitos de três aplicações foliares do ácido L-glutâmico (60 g L⁻¹) nos estádios fenológicos V3, V4 e R5 nas plantas de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) promoveu incremento para as variáveis área foliar, número de folhas, número de flores, quantidade de grão por vagem e produtividade em relação aos demais tratamentos (Mógor et al., 2008).

Em pesquisa avaliando o efeito de uma pulverização foliar de 2200 mg L⁻¹ de Glu, nas mudas de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) no momento em que apresentou as folhas verdadeiras, verificou-se incremento na taxa de assimilação de CO₂ e na concentração de frutose não havendo efeitos significativos para os parâmetros matéria seca e produtividade (Alfosea-Simón et al., 2021).

No experimento, com duas pulverizações foliar de Glu (0, 250 e 500 mg L⁻¹) em trigo no estágio fenológico V3 (perfilhamento) e V10 (floração), observou melhorias nas variáveis de crescimento (altura da planta, número de perfilho, área foliar, peso seco da planta, taxa de crescimento relativo e rendimento biológico) (Baqir e Zeboon, 2019).

Um estudo foi realizado em mudas de chicória roxa 'Palla Rossa' (*Cichorium intybus* - Asteraceae) e foi estudado os efeitos da aplicação foliar do produto AG-30® (Glu 30%) nas doses (292 mg L⁻¹, 584 mg L⁻¹ e 1168 mg L⁻¹) em duas vezes, aos 17 e 24 DAS (dias após a semeadura). O resultados indicaram que a concentração 292 mg L⁻¹, promoveu os maiores valores médios de volume radicular, área foliar matéria seca da parte aérea e o teor relativo de clorofila mas não foi suficiente para aumentar a produtividade (Fabbrin et al., 2013).

Em plantas Anis Hyssop (*Agastache foeniculum*), foi aplicado uma pulverização foliar de Glu nas doses (0, 100, 200 e 300 mg L⁻¹), quando os vegetais apresentaram todas as folhas verdadeiras. Observou-se que na dose de 300 mg L⁻¹ de Glu favoreceu os parâmetros da proteína total, açúcares solúveis totais, prolina, clorofila e teor de N mas não afetou a produtividade (Jahani et al., 2018).

Quando as plantas de colmada (*Brassica napus* L.) apresentavam as folhas totalmente maduras, foi realizado uma pulverização foliar com 2190 mg L⁻¹ de solução de Glu, e os resultados obtidos indicaram que houve incremento para as variáveis

peso de 1000 sementes, teor de gordura bruta, bem como, os maiores rendimentos de sementes, com um rendimento extra médio de 380 kg ha⁻¹ (Natalija et al., 2021).

Uma outra pesquisa com aplicação foliar de 123 mg ha⁻¹ de solução de Glu em plantas de soja (*Glycine max* L.) no estágio fenológico V4, verificou-se possivelmente um efeito sinalizador ao favorecer o crescimento radicular e a fixação biológica do N e a produção de ureídeos, bem como a produtividade superior ao controle (Teixeira et al., 2018).

A aplicação foliar de Glu em plantas de espinheiro (*Crataegus* L.) na ausência de N, torna este aminoácido o mais abundante nas plantas. Isso ocorre porque o Glu atua como uma molécula sinalizadora, regulando a expressão gênica relacionada ao metabolismo, defesa, respostas ao estresse, transporte, crescimento e transdução de sinais (Yu et al., 2010).

Para o crescimento do arroz (*Oryza sativa*), foi necessária uma concentração ideal de Glu foliar cerca de 0,5-1 mm, porém, quando excede essa quantidade, o excesso de Glu inibiu o crescimento das mudas de arroz. Apoiando a noção de que o Glu pode servir como uma fonte de N (Kan et al., 2017).

O nitrato e o amônio têm sido considerados as fontes dominantes de N para as plantas e, portanto, a pesquisa da nutrição do N das plantas tem se concentrado fortemente nessas formas de N inorgânico, nitrato e amônio, fontes de N orgânico e inorgânico coexistem no ecossistema, e as plantas podem usar uma variedade de formas de N, incluindo aminoácidos (Kan et al., 2017).

O Glu aplicado na superfície foliar pode afetar a parede celular e desencadear uma resposta semelhante a um eliciador na célula vegetal (Kan et al., 2017). No trabalho desenvolvido com o tomate aos 60 dias de idade foi fornecido por pulverização, 368 mg L⁻¹ de Glu e observou-se o aumento da eficiência fotossintética, produção de proteínas CAT e na atividade de enzimas antioxidantes (Lee et al., 2021). O Glu é um precursor de aminoácidos e os mesmos são convertidos em antioxidantes como prolina (Pro), ácido gama-aminobutírico (GABA), glutatona (Qiu et al., 2020).

Alguns estudos têm demonstrado maior crescimento da raiz quando aplicado mistura de aminoácidos (Aa) em comparação com a aplicação somente de N visto em plantas de milho que passou 72 h após a emergência da raiz primária em uma solução nutritiva livre de N suplementada com o hidrolisado de proteína (Bio), N inorgânico

($\text{NH}_4 \text{H}_2 \text{PO}_4$; N) e uma mistura de Aa que imitou a composição em aminoácidos do hidrolisado de proteína (Santi et al., 2017). Estes autores indicaram que a mistura de Aa modificou a expressão de um grande número de genes envolvidos na resposta ao estresse oxidativo.

2.1.1 Regulação da sinalização do Glu em plantas

A aplicação foliar de Glu em plantas tem demonstrado um papel significativo na regulação da sinalização celular, contribuindo para a adaptação das plantas em condições adversas, especialmente em situações de deficiência de N (Matsuda et al., 2018).

O Glu é um aminoácido fundamental, que atua como sinalizador e mediador em diversas vias metabólicas, desempenhando um papel crucial no crescimento e desenvolvimento das plantas (Matsuda et al., 2018). Ele é essencial para a síntese de proteínas, a biossíntese de hormônios e a assimilação do N.

Além disso, o Glu está diretamente envolvido no ciclo do ácido cítrico, na redução de nitratos e na formação de outros aminoácidos. Essas funções são vitais para o metabolismo e o desenvolvimento das plantas, especialmente em condições de deficiência de N (Matsuda et al., 2018; Zhang et al., 2019; Wang et al., 2020).

Estudos têm demonstrado que a aplicação foliar de Glu pode aumentar a eficiência na absorção de nutrientes, favorecendo o crescimento das plantas sob deficiência nutricional. Além desses, outros trabalhos explicam que a aplicação exógena de Glu ajuda a mitigar os efeitos adversos da deficiência de N, promovendo a formação e modificação de rotas metabólicas e a remobilização de nutrientes no interior da planta (Wang et al., 2020).

Essa melhoria no crescimento da planta é muitas vezes associada à modulação da sinalização hormonal, especialmente envolvendo o ácido abscísico (ABA) e as auxinas, que regulam a resposta ao estresse nutricional e a adaptação das plantas a ambientes desafiadores (Zhou et al., 2021). Além do papel regulador do crescimento, o Glu também está intimamente relacionado à defesa contra o estresse oxidativo (Hossain e Lee, 2015).

A deficiência de N pode resultar em um aumento na produção de espécies reativas de oxigênio (ERO) (Xu e Liu, 2020). Portanto, aplicação foliar de Glu pode

ajudar a ativar sistemas antioxidantes, como a síntese da glutathione S-transferase que é considerada uma enzima de desintoxicação, por metabolizar grande variedade de compostos xenobióticos, por meio da conjugação destes com glutathione reduzida, formando substâncias de baixa toxicidade, protegendo assim as células vegetais (Khan et al., 2019). Essa proteção é fundamental para a manutenção da integridade celular e para a homeostase da planta em condições adversas.

Adicionalmente, o Glu pode interagir com receptores específicos na membrana celular, ativando cascatas de sinalização que promovem respostas fisiológicas adaptativas das plantas. Essa interação ajuda a regular processos metabólicos e de defesa, facilitando a adaptação a condições de deficiência de N (Hossain et al., 2015).

2.1.2 Mecanismos de percepção e transdução de sinais do ácido glutâmico em plantas

Os mecanismos de percepção e transdução de sinais Glu, desempenham um papel crucial na regulação do crescimento e na resposta das plantas a estresses ambientais. O Glu é reconhecido como um importante mensageiro celular, ativando cascatas de sinalização que promovem adaptações metabólicas e fisiológicas (Liu et al., 2020). A percepção do Glu nas plantas ocorre principalmente por meio de receptores específicos, como os receptores de glutamato, localizados na membrana plasmática ou no citoplasma (Borges et al., 2022).

Os transportadores de Glu incluem os do sistema L e do sistema X⁻. Os transportadores do sistema L são responsáveis pela absorção de aminoácidos neutros, como o Glu, utilizando um mecanismo de transporte facilitado que não requer energia, especialmente em condições de alta concentração de aminoácidos no meio (Hirner et al., 2006). Em contrapartida, os transportadores do sistema X⁻, como os transportadores de glutamato (GLT), são especializados na captação de Glu e outros aminoácidos ácidos, regulando a concentração intracelular de Glu e sua função na sinalização celular (Gomez et al., 2009). Dessa forma, essas proteínas de transporte são essenciais para a absorção de Glu, permitindo que ele atue como um sinalizador e modulador nas diversas vias metabólicas das plantas.

Além disso, a presença de receptores associados ao Glu, como os receptores de GLT, tem sido identificada em diversas espécies vegetais (Huang et al., 2018).

Esses receptores são ativados pela ligação do Glu, resultando em mudanças na permeabilidade da membrana e na ativação de canais iônicos, como os canais de cálcio, que são essenciais para a transdução do sinal (Kang et al., 2020).

Após a percepção do Glu, inicia-se uma cascata de transdução de sinais que envolve a ativação de diversas proteínas quinases, como as MAPK (Mitogen-Activated Protein Kinases). Essas quinases atuam como mediadores de sinais, levando à fosforilação de proteínas-alvo que regulam processos fisiológicos essenciais, como a síntese de hormônios e a resposta ao estresse (Yuan et al., 2021). Um dos principais caminhos de sinalização ativados pelo Glu é o envolvimento de ERO. A presença de ERO, como o H_2O_2 , pode atuar como um segundo mensageiro, amplificando o sinal inicial e promovendo respostas adaptativas, como a ativação de genes relacionados à defesa e ao crescimento (Shah et al., 2018).

As respostas fisiológicas à sinalização do Glu incluem a modulação do crescimento radicular, a promoção da absorção de nutrientes e a ativação de mecanismos de defesa. A aplicação foliar de Glu tem demonstrado aumentar a eficiência da absorção de N, melhorando o desenvolvimento das raízes e a assimilação de nutrientes em condições de estresse (Wang et al., 2020). Além disso, a ativação de caminhos de sinalização relacionados ao Glu tem sido associada à produção de antioxidantes, como o glutationa, que ajudam a mitigar os danos causados pelo estresse oxidativo, particularmente em ambientes com baixa disponibilidade de N (Khan et al., 2019).

2.1.3 Interação entre o ácido glutâmico e vias de sinalização relacionadas ao metabolismo do N

O Glu desempenha um papel central na regulação do metabolismo do N nas plantas, atuando como um intermediário crucial na assimilação de N e como um sinalizador que influencia várias vias metabólicas (Hirschi et al., 2011). A interação entre o Glu e as vias de sinalização do metabolismo do N são fundamentais para a homeostase do N e para a adaptação das plantas às mudanças nas condições ambientais.

O N é um nutriente essencial para as plantas, sendo um componente vital de aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos e outras moléculas vitais. A assimilação do

N nas plantas ocorre principalmente por meio da redução de nitrato (NO_3^-) a amônio (NH_4^+), os quais são incorporados em aminoácidos, como o Glu (Marschner, 2012), que, por sua vez, é o precursor de vários outros aminoácidos e desempenha um papel central na reciclagem de N por meio do ciclo do glutamato-glutamina (Cao et al., 2020).

As plantas possuem vias de sinalização sofisticadas para monitorar e regular a assimilação e a utilização de N. A sinalização do N envolve uma complexa rede de sensores e transdutores de sinais que detectam a disponibilidade de N no solo e na planta e ajustam a expressão gênica e a atividade enzimática em resposta a essas variações (O'Brien et al., 2016). Entre os principais componentes dessa rede estão os sensores de NO_3^- , como a proteína NRT1.1, e os reguladores transcricionais, como o NIN-LIKE PROTEIN (NLP) (Liu et al., 2017).

O Glu influencia a expressão de genes relacionados ao metabolismo do N, como por exemplo, a presença de Glu pode induzir a expressão de genes que codificam para enzimas chave na assimilação de N, como as nitrato redutases (NR) e glutamina sintases (GS) (Wang et al., 2018). A sinalização mediada pelo Glu pode ser modulada por fatores de transcrição específicos, como os NLPs, que são ativados em resposta à disponibilidade de NO_3^- e regulam a expressão de genes envolvidos na assimilação e no metabolismo do N (Marchive et al., 2013).

O Glu também desempenha um papel na modulação de vias metabólicas relacionadas ao N. Estudos demonstram que o Glu pode afetar a atividade de enzimas envolvidas na assimilação de NO_3^- , influenciando a eficiência com que as plantas utilizam o N disponível (Yamaya et al., 2021). Além disso, a interação do Glu com outras moléculas sinalizadoras, como o ABA, pode integrar sinais de estresse ambiental com a regulação do metabolismo do N, permitindo uma resposta coordenada a condições adversas (Liu et al., 2020).

A sinalização do Glu está intimamente ligada à regulação hormonal nas plantas, interagindo com hormônios vegetais, como as auxinas e as citocininas, que são fundamentais para o crescimento e desenvolvimento das plantas (Forde, 2014). Por exemplo, a aplicação de Glu pode influenciar a distribuição de auxinas nas raízes, afetando a formação e a arquitetura radicular, o que, por sua vez, impacta a absorção de nutrientes, incluindo o N. Essa interação destaca o papel do Glu como um integrador de sinais nutricionais e hormonais.

As interações entre o Glu e as vias de sinalização do N também são cruciais para a resposta das plantas a estresses ambientais, como a deficiência de N. Nessas condições, o Glu pode atuar como um sinal para a ativação de mecanismos de reciclagem de N, promovendo a mobilização de reservas internas e a redistribuição de N para órgãos prioritários, como as folhas jovens e os órgãos reprodutivos (Tegeder e Masclaux-Daubresse, 2018). Além disso, o Glu pode modular a expressão de genes envolvidos na resposta ao estresse oxidativo, ajudando a mitigar os efeitos adversos da deficiência de N e de outros estresses abióticos (Cai et al., 2018).

A interação entre o Glu e as vias de sinalização do N também envolve mecanismos de feedback que ajudam a manter a homeostase do N nas plantas. O acúmulo de Glu pode sinalizar a disponibilidade de N suficiente, levando à repressão da expressão de genes de assimilação de NO_3^- para evitar o excesso de N, que pode ser tóxico para as plantas (Xu et al., 2012). Esses mecanismos de feedback são essenciais para ajustar o metabolismo do N de acordo com as necessidades metabólicas e as condições ambientais.

2.3 Importância do Si para as plantas

O Si é considerado um elemento benéfico às plantas, e sua suplementação vem sendo utilizada como estratégia eficiente para aliviar efeitos negativos provenientes de estresses bióticos e abióticos (Sousa Junior, 2020). O elemento classificado como benéfico não é absolutamente necessário para que seja completado o ciclo vegetal, entretanto, vários trabalhos comprovam sua eficiência tanto na melhoria de aspectos relacionados à morfologia e estrutura quanto ao longo do ciclo de desenvolvimento das culturas agrícolas (Menegale et al., 2015).

Nas plantas, podemos relacionar a presença do elemento à maior resistência ao acamamento, diminuição do ataque por pragas e doenças (por conta de alterações na anatomia da planta, como a formação de células epidérmicas mais grossas e maior grau de lignificação e/ou silicificação), maior resistência a condições adversas, causadas por situações de estresse abiótico e biótico, como menor efeito deletério provocado pela geada, menor taxa de evapotranspiração (em situações de déficit hídrico), favorecimento de nodulação em leguminosas, ativação da atividade de

enzimas e efeitos na composição mineral (Menegale, 2012; Khan et al., 2018; Pavlovic et al., 2021).

A adubação silicatada vem demonstrando efeitos importantes no combate a estresses causados em plantas por fatores físicos, climáticos e biológicos, este fato ocorre devido a sua atuação na formação de complexos protetores e reguladores da fotossíntese e de outras atividades enzimáticas, assim, diminuindo a perda de água por evapotranspiração, elevando a eficiência fotossintética e consequentemente, os benefícios proporcionados podem resultar no aumento do crescimento vegetal, em ganhos de produtividade e de qualidade (Marschner, 1995; Savant et al., 1997; Epstein, 1999; Rodrigues, 2002; Nojosa et al., 2006; Lima Filho, 2010).

Neste mesmo sentido, estudos com aplicação foliar de Si sob deficiência de N em plantas cultivadas em vasos, como nas culturas de arroz (Kuhla et al., 2021), cana-de-açúcar (Verma et al., 2021), milho (Galindo et al., 2021), trigo (Jeer et al., 2021), sorgo (Avila et al., 2021) e milheto (Ahmadi et al., 2021), demonstram resultados positivos na mitigação dos efeitos da deficiência de N. Esses estudos mostram um aumento na produtividade em plantas acumuladoras desse elemento, como ocorre com a maioria das gramíneas.

Além disso, segundo Monzon et al. (2021), a aplicação foliar de Si sob deficiência de N, na cultura do arroz apresenta aumento na produtividade de grãos, comparado ao tratamento sem Si, ao contrário de Thorne e colaboradores (2021) e Hussain et al., (2021), que não verificaram efeito do Si na produtividade de grãos. Os resultados ainda são divergentes, nessa situação, as alterações de metodologia de colocação desse elemento à disposição da planta, como aumento de dose, forma de aplicação (sulco, cobertura e adubação foliar), poderiam constituir-se em uma nova alternativa de fornecimento desse elemento às plantas, no sentido de se obter resultados positivos com essa aplicação (Berthelsen e Kordorfer, 2005).

Reis e colaboradores (2007), salienta que a adubação com Si propicia incremento no crescimento e na produção vegetal por meio de várias ações diretas e indiretas, podendo, também, apresentar efeitos sinérgicos com alguns produtos, potencializando ou mesmo reduzindo as dosagens recomendadas (Reis et al., 2007). O Si proporciona maior possibilidade de resposta das plantas à adubação, principalmente a nitrogenada (Malavolta, 2006).

Existem poucas pesquisas em plantas como as forrageiras sobre a relação entre o Si e outros nutrientes, como o N (Bruno et al., 2021). De acordo com Sikder et al. (2020), a aplicação de Si pode garantir a máxima expressão do N, sustentando o potencial das plantas em sistemas altamente produtivos.

Os efeitos benéficos do Si em gramíneas, foram verificados por Deus et al. (2019), que observaram o aumento do rendimento do arroz em 19% em condições deficientes de N.

2.3.1 Mecanismos de absorção, transporte e acúmulo do Si em plantas

A absorção do Si pelas plantas ocorre principalmente na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4) presente na solução do solo (Ma et al., 2001). Este processo é mediado por transportadores específicos nas membranas celulares das raízes. Um dos transportadores mais estudados é o Lsi1, que pertence à família dos transportadores de aquaporinas nodulinas-26-like (NIPs) (Ma et al., 2006). O Lsi1 facilita a entrada passiva do H_4SiO_4 nas células das raízes. Em milho, um estudo identificou o Lsi1 como um importante transportador responsável pela absorção de Si, demonstrando sua expressão predominante nas células epidérmicas e exodermes das raízes (Li et al., 2014), e há indícios de que transportadores semelhantes podem estar envolvidos na mobilização de Si para os tecidos aéreos.

Além do Lsi1, o transporte ativo de Si também é mediado por outro transportador, o Lsi2 (Sang et al., 2011). Este transportador está localizado na membrana plasmática das células da endoderme e é responsável pela exportação do H_4SiO_4 das células radiculares para o xilema, permitindo seu movimento ascendente na planta. Em arroz, a função do Lsi2 foi elucidada, mostrando que sua atividade é crucial para o acúmulo de Si nos tecidos da planta (Mitani et al., 2009).

Uma vez absorvido, o H_4SiO_4 é transportado pelo xilema até os tecidos aéreos da planta. Este movimento é facilitado pela transpiração, que cria um gradiente de concentração necessário para o transporte do Si. Durante este processo, o Si pode ser translocado de maneira passiva através do fluxo de água no xilema (Guntzer et al., 2012).

A eficiência do transporte de Si pode variar entre diferentes espécies de plantas, dependendo da presença e atividade dos transportadores de Si. Em espécies

acumuladoras de Si, como o arroz e a cana-de-açúcar, há uma eficiente absorção e transporte de Si, resultando em altos níveis de acúmulo nos tecidos aéreos (Bose et al., 2019). No milho, estudos também mostram uma boa capacidade de acumular Si (Miller et al., 2015). Por outro lado, em plantas não acumuladoras, como o tomate, a capacidade de transporte de Si é limitada, resultando em menor acúmulo (Ma et al., 2001).

O Si se acumula principalmente nos tecidos epidérmicos das folhas e caules na forma de fitólitos, que são depósitos de sílica ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) (Raven, 2001). Estes depósitos conferem rigidez às paredes celulares e aumentam a resistência mecânica das plantas, protegendo-as contra danos e doenças. A deposição de $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ na epiderme foliar aumenta a resistência da planta à pragas e doenças, além de reduzir a perda de água pela transpiração (Raven, 2001).

Além dos benefícios físicos, o acúmulo de Si pode influenciar processos bioquímicos e fisiológicos nas plantas, modulando a expressão de genes relacionados ao estresse (Yoshida et al., 1981), aumentando a atividade enzimática antioxidante, como a superóxido dismutase (SOD) e a peroxidase (POD) (Liang et al., 2007), ajudando a planta a combater o estresse oxidativo. Em plantas de milho sob deficiência de N, a aplicação de Si tem demonstrado aumentar a atividade de enzimas antioxidantes, contribuindo para uma melhor resposta ao estresse e à deficiência nutricional (Huang et al., 2016).

2.3.1 Efeitos do Si na absorção, assimilação e utilização do N pelas plantas

O Si pode influenciar a eficiência com que esses íons NO_3^- e NH_4^+ são absorvidos pelas plantas, especialmente em condições de deficiência de N. Estudos demonstram que a presença de Si pode aumentar a atividade de transportadores específicos de NO_3^- e NH_4^+ nas membranas das células das plantas, melhorando a capacidade da planta de absorver essas formas de N do solo (Epstein, 2009; Ma et al., 2001).

Por exemplo, Sahebi et al. (2015) observaram que a aplicação de Si em arroz aumentou a expressão de genes relacionados aos transportadores de NO_3^- , como NRT1 e NRT2, resultando em maior absorção do mesmo. Similarmente, a presença de Si foi associada a um aumento na expressão de transportadores de NH_4^+ , como o

gene AMT1, melhorando a absorção de NH_4^+ pelas raízes das plantas (Sahebi et al., 2015).

O Si também tem demonstrado a capacidade de aumentar as atividades enzimáticas envolvidas na assimilação do N. Liang et al. (2018) observaram que a aplicação de Si em plantas de milho resultou em um aumento significativo na atividade da redutase do NO_3^- , facilitando a conversão de NO_3^- em nitrito. Além disso, a GS mostrou aumento de atividade na presença de Si, melhorando a incorporação de amônia em aminoácidos (Zhu et al., 2016).

A utilização eficiente do N está intimamente relacionada à capacidade da planta de translocar e usar o N assimilado para a síntese de proteínas, ácidos nucleicos e outros compostos essenciais para o crescimento e desenvolvimento. O Si pode influenciar positivamente esses processos ao aumentar a eficiência com que o N é utilizado pelas plantas. Savant et al. (1997) relataram que a aplicação de Si em arroz aumentou a concentração de proteínas solúveis e clorofila nas folhas, indicando uma utilização mais eficiente do Si assimilado.

Além disso, o Si pode auxiliar as plantas a manter um balanço adequado de N sob condições de estresse, como a deficiência de N. Em tais condições, o Si pode contribuir para a manutenção das atividades fotossintéticas e do crescimento da planta, conforme descrito por Wang et al. (2017). Esse efeito é atribuído à capacidade do Si de aumentar a eficiência da fotossíntese e reduzir o estresse oxidativo, permitindo uma melhor utilização do N disponível (Wang et al., 2017).

3. REFERÊNCIAS

AGUIAR, A. T. E.; GONÇALVES, C.; PATERNIANI, M.; TUCCI, M.; CASTRO, C. **Boletim 200: instruções agrícolas para as principais culturas econômicas**. IAC Campinas, , 2014.

AHMAD, I.; BATYRBEK, M.; IKRAM, K.; AHMAD, S.; KAMRAN, M.; MISBAH; KHAN, R. S.; HOU, F.; HAN, Q. Nitrogen management improves lodging resistance and production in maize (*Zea mays* L.) at a high plant density. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 22, n. 2, p. 417–433, 1 fev. 2023.

AHMAD, W.; COFFMAN, L.; WEERASOORIYA, A. D.; CRAWFORD, K.; KHAN, A. L. The silicon regulates microbiome diversity and plant defenses during cold stress in *Glycine max* L. **Frontiers in Plant Science**, v. 14, p. 1280251, 10 jan. 2024.

ALFOSEA-SIMÓN, M.; SIMÓN-GRAO, S.; ZAVALA-GONZALEZ, E. A.; CÁMARA-ZAPATA, J. M.; SIMÓN, I.; MARTÍNEZ-NICOLÁS, J. J.; LIDÓN, V.; RODRÍGUEZ-ORTEGA, W. M.; GARCÍA-SÁNCHEZ, F. Application of Biostimulants Containing Amino Acids to Tomatoes Could Favor Sustainable Cultivation: Implications for Tyrosine, Lysine, and Methionine. **Sustainability**, v. 12, n. 22, p. 9729, jan. 2020.

ALVARENGA, R. C.; CRUZ, J.; NOVOTNY, E. Cultivo do milho: preparo convencional do solo. 2002.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 1 dez. 2013.

ARAÚJO, W. B. S.; TEIXEIRA, G. C. M.; MELLO PRADO, R. DE; ROCHA, A. M. S. Silicon mitigates nutritional stress of nitrogen, phosphorus, and calcium deficiency in two forages plants. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 6611, 22 abr. 2022.

BARRETO, R. F.; MAIER, B. R.; PRADO, R. D. M.; DE MORAIS, T. C. B.; FELISBERTO, G. Silicon attenuates potassium and sulfur deficiency by increasing nutrient use efficiency in basil plants. **Scientia Horticulturae**, v. 291, p. 110616, jan. 2022.

BIGOLIN, T.; TALAMINI, E. Impacts of Climate Change Scenarios on the Corn and Soybean Double-Cropping System in Brazil. **Climate**, v. 12, n. 3, p. 42, mar. 2024.

CAMARGO, F. A. O.; SILVA, L. S.; MERTEN, G. H.; CARLOS, F. S.; BAVEYE, P. C.; TRIPLETT, E. W. Chapter Two - Brazilian Agriculture in Perspective: Great Expectations vs Reality. *Em*: SPARKS, D. L. (Ed.). . **Advances in Agronomy**. [s.l.] Academic Press, 2017. v. 141p. 53–114.

CAMPOS, C. N. S.; SILVA JÚNIOR, G. B. D.; PRADO, R. D. M.; DAVID, C. H. O. D.; SOUZA JUNIOR, J. P. D.; TEODORO, P. E. Silicon mitigates ammonium toxicity in plants. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 2, p. 635–647, mar. 2020.

CONAB, C. N. DE A. **Série Histórica Das Safras**. [s.l.: s.n.]. . Acesso em: 22 jul. 2024.

DE MELLO PRADO, R. **Mineral nutrition of tropical plants**. Cham: Springer International Publishing, 2021.

DEUS, A. C. F.; MELLO PRADO, R. DE; CÁSSIA FÉLIX ALVAREZ, R. DE; OLIVEIRA, R. L. L. DE; FELISBERTO, G. Role of Silicon and Salicylic Acid in the Mitigation of Nitrogen Deficiency Stress in Rice Plants. **Silicon**, v. 12, n. 5, p. 997–1005, 1 maio 2020.

DIONISIO-SESE, M. L.; TOBITA, S. Antioxidant responses of rice seedlings to salinity stress. **Plant Science**, v. 135, n. 1, p. 1–9, jun. 1998.

ERENSTEIN, O.; JALETA, M.; SONDER, K.; MOTTALEB, K.; PRASANNA, B. M. Global maize production, consumption and trade: trends and R&D implications. **Food Security**, v. 14, n. 5, p. 1295–1319, 1 out. 2022.

FAOSTAT. **FAOSTAT**. Disponível em: <<https://www.fao.org/faostat/en/#home>>. Acesso em: 22 jul. 2024.

FATHI, A. Role of nitrogen (N) in plant growth, photosynthesis pigments, and N use efficiency: A review. 4 out. 2022.

FREDDI, O. DA S.; FERRAUDO, A. S.; CENTURION, J. F. Análise multivariada na compactação de um latossolo vermelho cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 953–961, jun. 2008.

GALINDO, F. S.; TEIXEIRA FILHO, M. C. M.; BUZETTI, S.; PAGLIARI, P. H.; SANTINI, J. M. K.; ALVES, C. J.; MEGDA, M. M.; NOGUEIRA, T. A. R.; ANDREOTTI, M.; ARF, O. Maize Yield Response to Nitrogen Rates and Sources Associated with *Azospirillum brasilense*. **Agronomy Journal**, v. 111, n. 4, p. 1985–1997, jul. 2019.

GOU, T.; YANG, L.; HU, W.; CHEN, X.; ZHU, Y.; GUO, J.; GONG, H. Silicon improves the growth of cucumber under excess nitrate stress by enhancing nitrogen assimilation and chlorophyll synthesis. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 152, p. 53–61, jul. 2020.

HAVAUX, M. Carotenoid oxidation products as stress signals in plants. **The Plant Journal**, v. 79, n. 4, p. 597–606, 2014.

HIRAGA, S.; SASAKI, K.; ITO, H.; OHASHI, Y.; MATSUI, H. A large family of class III plant peroxidases. **Plant and Cell Physiology**, v. 42, n. 5, p. 462–468, 2001.

HOSSEINI, S.; SHABANI, L.; SABZALIAN, M. R.; GHARIBI, S. Foliar spray of commercial seaweed and amino acid-derived biostimulants promoted phytoremediation potential and salinity stress tolerance in halophytic grass, *Puccinellia distans*. **International Journal of Phytoremediation**, v. 25, n. 4, p. 415–429, 21 mar. 2023.

ILER, R. K. The Chemistry of Silica, Solubility, Polymerization. **Colloid and Surface Properties, and Biochemistry**, v. 866, 1979.

KAN, C.-C.; CHUNG, T.-Y.; WU, H.-Y.; JUO, Y.-A.; HSIEH, M.-H. Exogenous glutamate rapidly induces the expression of genes involved in metabolism and defense responses in rice roots. **BMC Genomics**, v. 18, n. 1, p. 186, 17 fev. 2017.

KHAN, I.; AWAN, S. A.; RIZWAN, M.; BRESTIC, M.; XIE, W. Silicon: an essential element for plant nutrition and phytohormones signaling mechanism under stressful conditions. **Plant Growth Regulation**, v. 100, n. 2, p. 301–319, 2023.

KHAN, S.; YU, H.; LI, Q.; GAO, Y.; SALLAM, B. N.; WANG, H.; LIU, P.; JIANG, W. Exogenous Application of Amino Acids Improves the Growth and Yield of Lettuce by Enhancing Photosynthetic Assimilation and Nutrient Availability. **Agronomy**, v. 9, n. 5, p. 266, 26 maio 2019.

KORNDORFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; NOLLA, A. Análise de silício: solo, planta e fertilizantes. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 34p. **Boletim técnico**, n. 2, 2004.

LANDAU, E. C.; SANS, L. M. A.; SANTANA, D. P. Cultivo do milho. **Sistema de produção**, v. 2, 2008.

LEE, H. J.; KIM, J. S.; LEE, S. G.; KIM, S. K.; MUN, B.; CHOI, C. S. Glutamic Acid Foliar Application Enhances Antioxidant Enzyme Activities in Kimchi Cabbages Leaves Treated with Low Air Temperature. **Horticultural Science and Technology**, v. 35, n. 6, p. 700–706, 31 dez. 2017.

LI, W.; GU, X.; FANG, H.; ZHAO, T.; YIN, R.; CHENG, Z.; TAN, C.; ZHOU, Z.; DU, Y. Optimizing nitrogen application rate by establishing a unified critical nitrogen dilution curve for maize under different mulching planting patterns. **European Journal of Agronomy**, v. 152, p. 127026, jan. 2024.

LICHTENTHALER, H. K. [34] Chlorophylls and carotenoids: pigments of photosynthetic biomembranes. *Em: Methods in enzymology*. [s.l.] Elsevier, 1987. v. 148p. 350–382.

LINHARES, R. R. **Eficiência de fungicidas no tratamento de sementes de linhagens e respectivos híbridos de milho**. [s.l.] UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2014.

MADDONNI, G. A. Analysis of the climatic constraints to maize production in the current agricultural region of Argentina—a probabilistic approach. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 107, n. 3, p. 325–345, 1 fev. 2012.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. DE. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 1997.

MIFLIN, B. J.; LEA, P. J. The pathway of nitrogen assimilation in plants. **Phytochemistry**, v. 15, n. 6, p. 873–885, jan. 1976.

MUTALE-JOAN, C.; REDOUANE, B.; NAJIB, E.; YASSINE, K.; LYAMLOULI, K.; LAILA, S.; ZEROUAL, Y.; HICHAM, E. A. Screening of microalgae liquid extracts for their bio stimulant properties on plant growth, nutrient uptake and metabolite profile of *Solanum lycopersicum* L. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, p. 2820, 18 fev. 2020.

NEUMANN, M.; HORST, E. H.; CRISTO, F. B.; SOUZA, A. M.; PLODOVISKI, D. C.; COSTA, L. Evaluation of corn hybrids for silage grown in different locations. **Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia**, v. 73, p. 1171–1179, 5 nov. 2021.

NISHIYAMA, R.; KATO, M.; NAGATA, S.; YANAGISAWA, S.; YONEYAMA, T. Identification of Zn–Nicotianamine and Fe–2'-Deoxymugineic Acid in the Phloem Sap from Rice Plants (*Oryza sativa* L.). **Plant and Cell Physiology**, v. 53, n. 2, p. 381–390, fev. 2012.

NOGUEIRA, A. R. DE A.; MACHADO, P. L. O. DE A.; CARMO, C. A. F. DE S. DO; FERREIRA, J. R. **Manual de laboratórios: solo, água, nutrição vegetal, nutrição animal e alimentos. 1. Coleta, acondicionamento e preparo de amostras.** [s.l.] Sao Carlos: EMBRAPA-CPPSE, 1998., 1998.

OLIVEIRA, R. L. L.; MELLO PRADO, R. DE; FELISBERTO, G.; CHECCHIO, M. V.; GRATÃO, P. L. Silicon Mitigates Manganese Deficiency Stress by Regulating the Physiology and Activity of Antioxidant Enzymes in Sorghum Plants. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 19, n. 3, p. 524–534, 1 set. 2019.

PAULA, R. J. DE. Respostas antioxidantes de cultivares de cana-de-açúcar tolerantes à seca e a herbicidas ao déficit hídrico. 2019.

PUPPE, D.; SOMMER, M. Experiments, Uptake Mechanisms, and Functioning of Silicon Foliar Fertilization—A Review Focusing on Maize, Rice, and Wheat. *Em: Advances in Agronomy*. [s.l.] Elsevier, 2018. v. 152p. 1–49.

RAIJ, B. V. **Fertilidade do solo e manejo dos nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011.

RHODES, D.; BRUNK, D. G.; MAGALHÃES, J. R. Assimilation Of Ammonia by Glutamate Dehydrogenase? *Em: POULTON, J. E.; ROMEO, J. T.; CONN, E. E. (Eds.). . Plant Nitrogen Metabolism*. Boston, MA: Springer US, 1989. p. 191–226.

ROBERTSON, G. P.; GROFFMAN, P. M. Nitrogen transformations. *Em: Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry*. [s.l.] Elsevier, 2024. p. 407–438.

RODRIGUES, V.; PINHO, R.; PAGLIS, C.; BUENO FILHO, J.; BRITO, A. Comparação entre métodos para estimar a produtividade de grãos de milho. **Ciencia E Agrotecnologia - CIENC AGROTEC**, v. 29, 1 fev. 2005.

ROUPHAEL, Y.; SPÍCHAL, L.; PANZAROVÁ, K.; CASA, R.; COLLA, G. High-Throughput Plant Phenotyping for Developing Novel Biostimulants: From Lab to Field or From Field to Lab? **Frontiers in Plant Science**, v. 9, p. 1197, 14 ago. 2018.

SANTOS, H. G. DOS. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5ª edição revista e ampliada ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

SERNA-SALDIVAR, S. O. Chapter 14 - Maize. *Em: SHEWRY, P. R.; KOKSEL, H.; TAYLOR, J. R. N. (Eds.). . ICC Handbook of 21st Century Cereal Science and Technology*. [s.l.] Academic Press, 2023. p. 131–143.

SIEBENEICHLER, T. J.; CRIZEL, R. L.; ROMBALDI, C. V.; GALLI, V. Regulation of phenylpropanoid biosynthesis in strawberry ripening: molecular and hormonal mechanisms. **Phytochemistry Reviews**, 5 jan. 2024.

SINGLETON, V. L.; ROSSI, J. A. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. **American journal of Enology and Viticulture**, v. 16, n. 3, p. 144–158, 1965.

SONG, T.; XIONG, Z.; SHI, T.; YUAN, L.; GAO, R. Effect of glutamic acid on the preparation and characterization of Pickering emulsions stabilized by zein. **Food Chemistry**, v. 366, p. 130598, 1 jan. 2022.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fundamentos de Fisiologia Vegetal-6**. [s.l.] Artmed Editora, 2021.

USDA, N. World agricultural supply and demand estimates. Internet site: <http://usda.mannlib.cornell.edu/reports/waobr/wasde-bb> (Accessed May 11, 2005), 2023.

VALMALETTE, J. C.; DOMBROVSKY, A.; BRAT, P.; MERTZ, C.; CAPOVILLA, M.; ROBICHON, A. Light-induced electron transfer and ATP synthesis in a carotene synthesizing insect. **Scientific Reports**, v. 2, n. 1, p. 579, 2012.

WANI, B. A.; RASHID, S.; RASHID, K.; JAVID, H.; MAGRAY, J. A.; QADIR, R. UL; ISLAM, T. 3 Nitrogen Deficiency in Plants. **Advances in Plant Nitrogen Metabolism**, p. 28–37, 2022.

YADAV, M. R. *et al.* Strategies for improving nitrogen use efficiency: A review. **Agricultural Reviews**, n. OF, 16 fev. 2017.

YAMAYA, T.; KUSANO, M. Evidence supporting distinct functions of three cytosolic glutamine synthetases and two NADH-glutamate synthases in rice. **Journal of Experimental Botany**, v. 65, n. 19, p. 5519–5525, out. 2014.

YANG, Y.; XIONG, J.; TAO, L.; CAO, Z.; TANG, W.; ZHANG, J.; YU, X.; FU, G.; ZHANG, X.; LU, Y. Regulatory mechanisms of nitrogen (N) on cadmium (Cd) uptake and accumulation in plants: A review. **Science of The Total Environment**, v. 708, p. 135186, mar. 2020.

YU, C.; LV, D. G.; QIN, S. J.; YANG, L.; MA, H. Y.; LIU, G. C. Changes in photosynthesis, fluorescence, and nitrogen metabolism of hawthorn (*Crataegus pinnatifida*) in response to exogenous glutamic acid. **Photosynthetica**, v. 48, n. 3, p. 339–347, 1 set. 2010.

ZHANG, W.; ZHANG, Z.; YAN, S. Effects of various amino acids as organic nitrogen sources on the growth and biochemical composition of *Chlorella pyrenoidosa*. **Bioresource Technology**, v. 197, p. 458–464, dez. 2015.

CAPÍTULO 2 - Elucidando papel do ácido glutâmico e do silício fornecidos via foliar para aumentar a tolerância do milho a deficiência de nitrogênio¹

Resumo - O uso de bioestimulantes têm propiciado a agricultura adaptação às condições ambientais desafiadoras. No entanto, faltam estudos específicos para compreensão da capacidade dos bioestimulantes ácido glutâmico (Glu) e o silício (Si) para atenuar a deficiência de N que é comum nos cultivos de milho e elucidar os mecanismos envolvidos. Para avançar o conhecimento deste tema, realizou-se uma pesquisa de campo com o objetivo de avaliar os efeitos da aplicação foliar de Glu e de Si, na forma isolada e combinada, em atributos bioquímicos e fisiológicos das plantas de milho, visando aumentar a tolerância da cultura a deficiência moderada de N. Para isso, realizaram-se dois experimentos em campo em duas áreas distintas da Unesp, Jaboticabal, Brasil. Nos dois experimentos aplicaram-se os mesmos quatro tratamentos de aplicação foliar: controle (apenas água), Si isolado, Glu isolado e a combinação Glu+Si dispostos em delineamento em blocos casualizados com seis repetições. Foram realizadas quatro aplicações foliares dos bioestimulantes durante o cultivo do milho e foram realizadas avaliações nutricionais e fisiológicas na planta. As nossas descobertas indicam que aplicação foliar de Glu e de Si tem efeitos semelhantes e benéficos para as plantas de milho deficientes de N por modular mecanismos fisiológicos ao diminuir o estresse oxidativo e aumentar concentração de pigmentos fotossintetizantes e a eficiência da fotossíntese e consequentemente a produtividade. A pesquisa forneceu uma estratégia adicional em base sustentável para minimizar os danos da deficiência de N no cultivo do milho a nível de campo a partir da exploração do uso dos bioestimulantes Glu ou Si.

Palavras-chave: Glu; Si; produtividade; desordem nutricional; estresse.

¹Este capítulo corresponde ao artigo científico submetido à revista Journal of Soil Science and Plant Nutrition e encontra-se em avaliação para publicação.

1. INTRODUÇÃO

As plantas de interesse agrícola enfrentam múltiplos estresses ao longo de seu ciclo fenológico (Ahmad *et al.*, 2024), sendo comum a deficiência de nitrogênio (N) (Muratore; Espen; Prinsi, 2021) induzindo prejuízos nos processos bioquímicos e fisiológicos das plantas (Siebeneichler *et al.*, 2024). A deficiência de N, ocorre com uso de subdoses do N (Campos *et al.*, 2020) que é comum em países subdesenvolvidos tendo recursos financeiros limitados. Além disso, as mudanças climáticas têm provocado condições ambientais adversas (Wani *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2024) como déficit hídrico e outros estresses que causam prejuízos na absorção de N induzindo deficiência na planta.

Diante das funções estruturais do N nas plantas, que compõem centenas de compostos orgânicos vitais para o ótimo metabolismo da planta, coloca esse nutriente como elemento que mais limita a produtividade dos cultivos no mundo (Prado, 2021). Isso é preocupante em cultivos de milho pois é a maior cultura agrícola do mundo, atingindo produção anual superior a 1 bilhão de toneladas métricas (USDA, 2023).

Para aumentar a tolerância da cultura do milho cultivado sob estresse causado pela deficiência de N, têm surgido recentemente estratégias a partir do uso de bioestimulantes conhecidos como mitigadores de diferentes estresses com destaque ao uso de ácido glutâmico (Glu) e de silício (Si) (Gou *et al.*, 2020; Yang *et al.*, 2020) que podem ser fornecidos via foliar.

O Si é considerado um elemento benéfico, sendo absorvido na forma de H_4SiO_4 (Barreto *et al.*, 2022) e desempenha papel fundamental na tolerância das plantas a estresse incluindo o nutricional (Khan *et al.*, 2023). Isso pode ocorrer porque o Si está associado a melhoria dos índices de cor verde-GCI (Feller; Anders; Demirevska, 2008), eficiência fotoquímica do fotossistema II-FV/FM (Havaux, 2014), e menor índice de extravasamento de eletrólitos-EE (Valmalette *et al.*, 2012), e o aumento dos pigmentos de clorofilas e carotenoides (Hiraga *et al.*, 2001). Isso poderia neutralizar ou atenuar os efeitos da falta de N na planta que justamente causa diminuição de pigmentos e danos ao aparato fotossintético. Inclusive tem relatos que o fornecimento de Si no solo pode aumentar a eficiência de uso do N, favorecendo a produtividade do milho mesmo cultivado com ótimo N (Mabagala *et al.*, 2020).

A maioria das pesquisas envolvendo a relação Si e deficiência de N, foram realizadas em condições controladas e com fornecimento do Si via raiz e existem dúvidas se a aplicação foliar do Si é capaz de induzir uma tolerância à cultura do milho a deficiência de N e os mecanismos de ação envolvidos.

Um outro bioestimulante ainda pouco estudado para mitigar estresse nutricional é o aminoácido Glu que segundo Al-Hadithy; Al-Mohammedi (2023) é absorvido pela planta na forma $C_5H_9NO_4$. O aumento da concentração de Glu na planta aumenta ação da enzima glutamina-oxoglutarato aminotransferase (GS/GOGAT) (Mifflin e Lea, 1976) favorecendo a entrada do N no metabolismo primário da planta (Rhodes, Brunk e Magalhães, 1989). Além disso, o Glu está envolvido em nova assimilação de N da atividade fotorrespiratória (Yamaya e Kusano, 2014) reciclando esse nutriente da planta (Nishiyama *et al.*, 2012).

Diante destes benefícios do Glu no metabolismo do N da planta, têm surgido pesquisas avaliando os efeitos da aplicação foliar deste aminoácido em plantas de hortaliças atenuando estresse por baixa temperatura (Lee *et al.*, 2017) e a deficiência de N visto em apenas três espécies cultivadas em vasos como *Solanum lycopersicum*, *Crataegus pinnatifida* (Yu *et al.*, 2010; Zhang, Zhang e Yan, 2015) e em *Oryza sativa* Kan *et. al.* (2017), resultando em melhorias bioquímicas e fisiológicas nas plantas. Esses resultados chamam atenção, mas para haver importância agrônômica são necessárias pesquisas a nível de campo que possam ampliar o número de espécies estudadas.

Além disso, é importante investigar se há ganhos na aplicação conjunta do aminoácido e do silício que pudesse ampliar a mitigação dos efeitos da deficiência de nitrogênio nas plantas. Uma questão inicial que deve ser vencida, seria aferir se a mistura destes bioestimulantes compõem ou não uma solução estável, pois segundo Iler (1979), o Si em solução tem grande risco de polimerização especialmente se houver mistura com outras substâncias. Portanto, testes laboratoriais prévios são importantes para elucidar a homogeneidade e a estabilidade destes bioestimulantes em solução para que possa favorecer a sua absorção foliar pelas plantas.

Para isso, realizou-se essa pesquisa para testar a hipótese que a aplicação de Glu e de Si podem ser semelhantes na melhoria de aspectos nutricionais e fisiológicos

e especialmente a produtividade da cultura do milho cultivado em condições desafiadoras causado pela deficiência de N.

Portanto, objetivou-se com este estudo avaliar os efeitos da aplicação foliar de Glu e Si, isoladamente e em combinação em aspectos fisiológicos das plantas de milho, visando aumentar a tolerância da cultura cultivada em campo com carência de N.

Se essa hipótese for confirmada, poderemos otimizar a utilização dos bioestimulantes Glu e Si, o que estabelecerá uma estratégia sustentável para enfrentar a deficiência de N que segundo Robertson & Groffman (2024) é comum em diversas regiões do mundo que cultiva o milho.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização das áreas experimentais e do material vegetal

Durante a safra de inverno do milho foi realizado um estudo para avaliar a aplicação isolada e combinada de Glu e de Si para atenuar a deficiência de N na planta. Para isso, foram selecionadas duas áreas experimentais adjacentes da Universidade Estadual Paulista (Unesp), localizadas no Câmpus de Jaboticabal, São Paulo, Brasil (21°15'17" S, 48°19'20" W e altitude de 605 m).

O clima local é caracterizado como "Aw" segundo a classificação de Köppen; tendo características subtropicais marcadas por verões chuvosos, invernos relativamente secos, temperatura média anual de 23,2°C e precipitação pluvial média anual próxima de 1405 mm (Alvares *et al.*, 2013).

Os solos das áreas experimentais foram classificados como Latossolo Vermelho eutroférico de textura argilosa, em relevo ondulado liso (Santos, 2018). Realizou-se a análise da composição granulométrica do solo (323 g kg⁻¹ de argila, 45 g kg⁻¹ de silte e 632 g kg⁻¹ de areia) (Freddi, Ferraudo e Centurion, 2008).

Nos últimos anos as áreas experimentais 1 e 2 apresentavam cultivos anteriores distintos, pois na área 1 teve o histórico de cultivos anuais com rotação de milho e de soja e na área 2 teve cultivos contínuos de cana-de-açúcar.

Antes da instalação dos experimentos, realizou-se a coleta de amostras de solo da camada de 0 a 20 cm de profundidade, para análise química para fins de fertilidade do solo (Nogueira *et al.*, 1998). Os resultados da análise química do solo para as áreas

experimentais referente aos experimentos 1 e 2, foram os seguintes: pH (CaCl_2) = 6,2 e 6,0; M.O. (matéria orgânica) = 15 e 13 g dm^{-3} ; P (resina) = 40 e 43 mg dm^{-3} ; K = 3,3 e 3,4 mmolc dm^{-3} ; Ca = 32 e 34 mmolc dm^{-3} ; Mg = 15 e 16 mmolc dm^{-3} ; H+Al = 19 e 21 mmolc dm^{-3} ; SB (soma de bases) = 50,3 e 53,4; CTC (capacidade de troca catiônica) = 69,9 e 74,0 mmolc dm^{-3} e V (saturação por bases) = 73 e 72%, respectivamente.

Com base na análise de solo realizada nas áreas experimentais, procedeu a execução das operações convencionais de preparo do solo a partir da aração, seguida pela gradagem pesada e pela gradagem de nivelamento do solo (Alvarenga, CRUZ e NOVOTNY, 2002). Antes da semeadura realizou-se a aplicação mecanizada do herbicida glyphosate, tendo 1.800 g ha^{-1} do ingrediente ativo (i.a.) em um volume de calda equivalente a 250 L ha^{-1} (Aguiar *et al.*, 2014).

Em seguida realizou-se a semeadura dos experimentos (28 de fevereiro de 2022) de forma mecanizada. Utilizou-se para os experimentos milho híbrido P2830VYH, da Pioneer® tendo tolerância a nematóides, pragas e doenças, maturação semiprecoce, adaptação eficaz às terras baixas (400 a 700 m de altitude) (Neumann *et al.*, 2021).

Na semeadura adotou-se espaçamento de 0,45 m entre linhas, com densidade de semeadura de 3,1 sementes por metro linear atingindo aproximadamente 68,8 mil plantas. As sementes do milho foram previamente tratadas com os fungicidas (carboxina + tirame, 1 g i.a. kg^{-1}), conforme indicado por LINHARES (2014).

A adubação de semeadura foi realizada com aplicação localizada de 325 kg ha^{-1} do formulado 8-28-16 que corresponde a 8 kg ha^{-1} de N, 28 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 16 kg ha^{-1} de K_2O , que foi definido com base a análise química do solo e seguindo a indicação de AGUIAR *et al.* (2014). Adicionalmente, foi aplicado em área total 2 kg ha^{-1} de B na forma de boráx.

As condições meteorológicas foram monitoradas diariamente nos experimentos por meio da estação meteorológica do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), incluindo dados da temperatura do ar, umidade do ar e radiação solar (Figura 1).

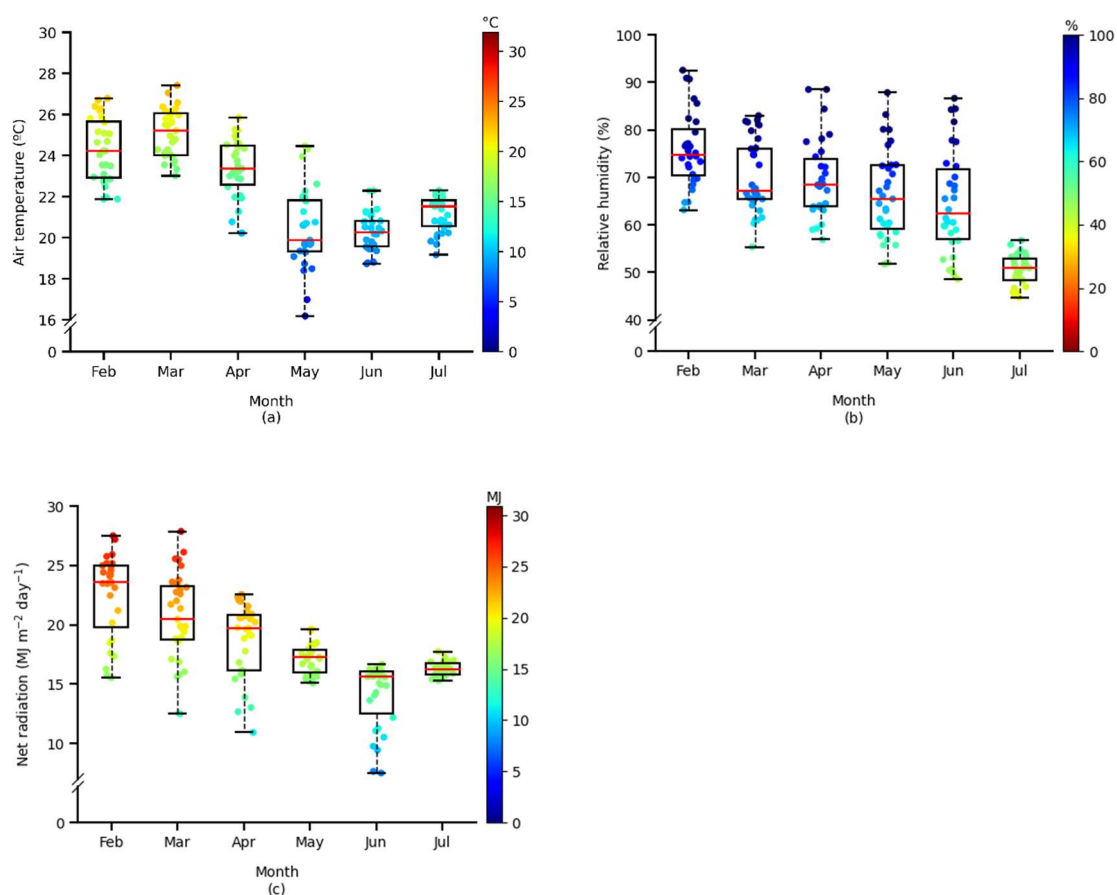


Figura 1 - Valores máximos, médios e mínimos da temperatura do ar (a), e umidade relativa do ar (b) e radiação solar (c) durante o período experimental.

Os valores médios mensais indicam que fevereiro, março e abril foram caracterizados por temperaturas mais elevadas (Figura 2a) atingindo 24 a 25°C, faixa considerada adequada para o cultivo do milho (Landau, Sans e Santana, 2008; Maddonni, 2012).

2.2 Delineamento, tratamentos e condução do experimento

O delineamento experimental adotado foi em blocos casualizados para ambos os experimentos, consistindo em quatro tratamentos foliares: controle (água deionizada); silício na forma de silicato de sódio e de potássio (SiNaKe) (1,15 g L⁻¹ de Si); glutamato monossódico (0,35 g L⁻¹ de Glu); e Glu + Si (0,35 g L⁻¹ de Glu e 1,15 L⁻¹ de Si), com seis repetições. As parcelas experimentais possuíam 8 linhas de milho com 12 m de comprimento e para área útil excluiu 0,5 m das extremidades da parcela.

As concentrações de Glu e de Si utilizadas nos experimentos foram fundamentadas nos estudos conduzidos por Kan et al. (2017) e Araújo et al. (2022), respectivamente. O potássio contido no SiNaKE foi devidamente balanceado em todos os tratamentos, utilizando KCl.

Antes da aplicação dos tratamentos realizou-se teste laboratorial para avaliar o índice de turbidez e alterações da cor da solução Glu e de Si (Figuras 3 e 4).

As aplicações foliares dos tratamentos foram realizadas nos estádios fenológicos: V6 (sexta folha expandida), V8 (oitava folha totalmente desenvolvida), R2 (grão em bolha d'água) e V12 (grão pastoso). Para isso, utilizou um pulverizador costal equipado com cilindro de alumínio com capacidade de 2 kg de CO₂, regulado a uma pressão de 2,5 bar munido de uma barra de aplicação com 2 bicos, utilizando pontas TT160-110025 TeeJet®. Em todas as aplicações, foi adicionado 1 ml L⁻¹ de óleo vegetal (Wetcit®) e utilizou-se volume de calda igual a 200 L ha⁻¹.

No estágio fenológico V4, foi realizada uma aplicação foliar em todas as parcelas dos experimentos de micronutrientes contendo solução 0,5% de sulfato de Zn e solução 0,5% de sulfato de Mn, com volume de calda de 300 L ha⁻¹.

2.3 Ensaio de homogeneidade da solução de Glu+Si

Realizou-se testes laboratoriais visual e de turbidez das caldas para avaliar a estabilidade das soluções utilizadas nos experimentos que foram descritas anteriormente em função do tempo.

Os valores do pH de todas as soluções dos tratamentos foram ajustados para $6,5 \pm 0,3$ com uso de soluções de HCl (1 M) ou NaOH (1 M) à temperatura de $25 \pm 2^\circ\text{C}$.

Em seguida, foi transferido 10 mL de cada calda para béqueres de 250 mL e, foi mensurado o índice de turbidez com uso do aparelho turbidity meter (modelo KR2000 da marca Akrom®) em função dos tempos 30; 60; 90; 120; 180; 240; 300 e 360 minutos e também foi realizado registros fotográficos (câmera Canon EOS Rebel T7 e lente de 18–55 mm) das soluções. As imagens foram processadas e diagramadas com a assistência do software CorelDRAW®.

2.4 Variáveis analisadas

2.4.1 Índice de cor verde (GCI)

De acordo com o tratamento, o índice de cor verde foi medido com o auxílio do equipamento Opti-sciences – CCM-200, a partir de cinco leituras realizadas nas folhas totalmente expandidas. Utilizou-se a folha diagnose, que consistiu na 1ª folha fisiologicamente madura, oposta e abaixo da espiga (Malavolta, Vitti e Oliveira, 1997).

2.4.2 Determinação dos teores de N e Si

Inicialmente as amostras do tecido vegetal foram secas e moídas em moinho tipo Wiley. A determinação dos teores de Si e de N foi realizada seguindo método descrito por Korndorfer et al. (2004) e Bataglia et al. (1978), respectivamente.

2.4.3 Índice de extravasamento de eletrólitos celulares (EE)

O índice de extravasamento de eletrólitos celulares (EE) em plantas de milho, foi determinado utilizando dez discos foliares de 6 mm retirados do terço médio da última folha totalmente expandida, que recebeu a última aplicação foliar aos 82 dias após a emergência (DAE). O índice EE foi determinado seguindo as indicações propostas por Dionisio-Sese & Tobias (1998): $EC_i/EC_f \times 100$.

2.4.4 Determinação dos teores de compostos fenólicos (CF)

A determinação do teor de compostos fenólicos totais (CF) foi realizada conforme descrito por Singleton & Rossi (1965).

2.4.5 Clorofila a+b e carotenóides

O teor de pigmentos foi determinado por espectrofotometria (DU 600 Series - Beckman Instruments Inc, Fullerton, EUA). Discos foliares foram coletados pela manhã a partir do terço médio da última folha totalmente expandida. A concentração de cada pigmento foi obtida a partir das equações correspondentes descritas por Lichtenthaler (1987).

2.4.6 Rendimento quântico de PSII (Fv/Fm)

A eficiência quântica do Fotossistema II foi obtida medindo a fluorescência da clorofila com um fluorímetro (Opti-sciences® - Os30P). Para isso, a região amostrada foi submetida ao escuro para adaptação de pelo menos 30 min antes da excitação do pulso de luz vermelha de 1 s.

Os parâmetros F0 (fluorescência mínima para excitação da clorofila) e Fm (fluorescência máxima para excitação da clorofila) foram avaliados. Fv (fluorescência variável calculada a partir de F0 e Fm), Fv/Fm (fluorescência variável para proporção máxima de fluorescência) e Fv/F0 (fluorescência variável para relação mínima de fluorescência) foram obtidos a partir desses parâmetros. As medições foram realizadas entre 7h30min e 8h30min no terço médio da folha mais nova totalmente expandida que recebeu a última aplicação foliar (sexta folha).

2.4.7 Determinação da produtividade

A produtividade de grãos foi obtida a partir da soma das massas dos grãos das espigas, convertendo-se o resultado para kg ha⁻¹ (Rodrigues *et al.*, 2005) e corrigido para umidade igual a 13%.

2.1 Análise estatística

Os dados foram avaliados para normalidade dos resíduos utilizando o teste de Shapiro-Wilk ($p < 0,05$) e para homogeneidade de variâncias utilizando o teste de Levene ($p < 0,05\%$). Cumprindo esses critérios, procedeu-se à análise de variância (ANOVA) para examinar os efeitos principais e suas interações (teste F, $p < 0,05$). Quando as diferenças foram significativas, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). As interações entre as pulverizações e seus efeitos foram verificadas pelo teste multivariado de análise de componentes principais (PCA).

3. RESULTADOS

3.1 Teste de turbidez das caldas

Os resultados na análise de turbidez das caldas foliares revelaram crescimento logarítmico e faixas com valores de até 1,72 Unidade Nefelométrica de Turbidez – NTU (Figura 3). Além disso, a tendência comum observada para as caldas Glu, Si e a

mistura de Glu e Si não foi evidenciada na calda controle, que manteve seu índice de turbidez estável (com valor médio de 0,55 NTU) ao longo dos 360 minutos após o preparo (Figura 2).

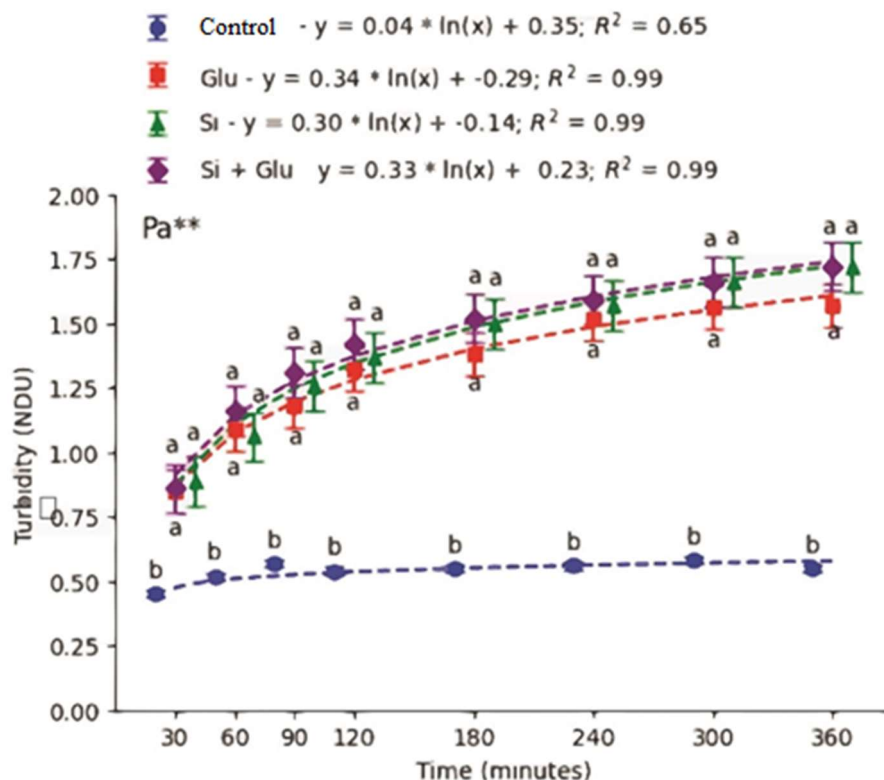


Figura 2 - Índice de turbidez das caldas Control, Si, Glu e Si+Glu em função do tempo após a preparação das soluções

De modo geral, observa-se que às caldas de Si isolada e à combinação de Glu e Si, apresentaram tendência de valores de NTU bastante próximos (1,37 a 1,38) ao longo do período analisado (Figura 3).

Ainda em relação às caldas de Si isolado e sua combinação com Glu, não apresentou alterações na cor das caldas, mesmo com o aumento gradual do índice de turbidez ao longo do período analisado, indicando possivelmente que não ocorreu polimerização (Figura 3).



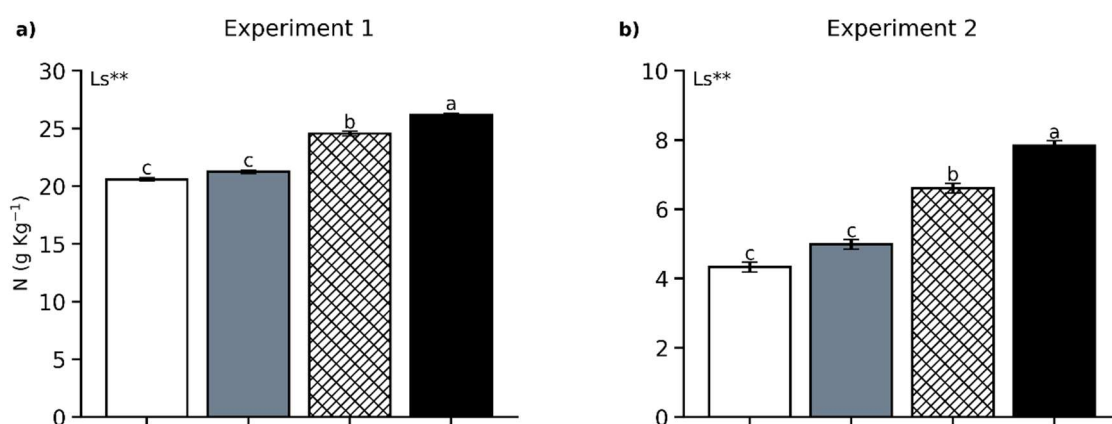
Figura 3 - Avaliação das mudanças colorimétricas das caldas Control, Si, Glu e Si+Glu em função do tempo de 360 minutos após o preparo das soluções.

3.2 Análise univariada

As plantas submetidas aos tratamentos Si, Glu e Glu+Si, demonstraram resultados consideravelmente distintos em relação ao grupo de controle. Houve aumento nos teores de N (Figura 4a, b) e de Si (Figura 4c, d), clorofila a+b (Figura 5a, b), carotenoides (Figura 5c, d), GCI (Figura 5e, f) e FV/FM (Figura 5g, h) e diminuiu o extravasamento de eletrólitos (Figura 6c, d) e aumentou a produtividade do milho (Figura 6a, b).

3.2.1 Teor de nitrogênio (N) e silício (Si) foliar

A aplicação de Glu+Si em relação à aplicação exclusiva de Glu resultou em um aumento significativo nos teores de N e de Si nas folhas de milho nos experimentos 1 e 2 (Figura 4) atingindo 6% e 18%, respectivamente. Essa tendência semelhante nos teores de N nas folhas de milho também foi observada nos teores de Si, evidenciando um aumento de 26% (experimento 1) e 22% (experimento 2,) em relação às plantas que receberam apenas Si (Figura 4c e d).



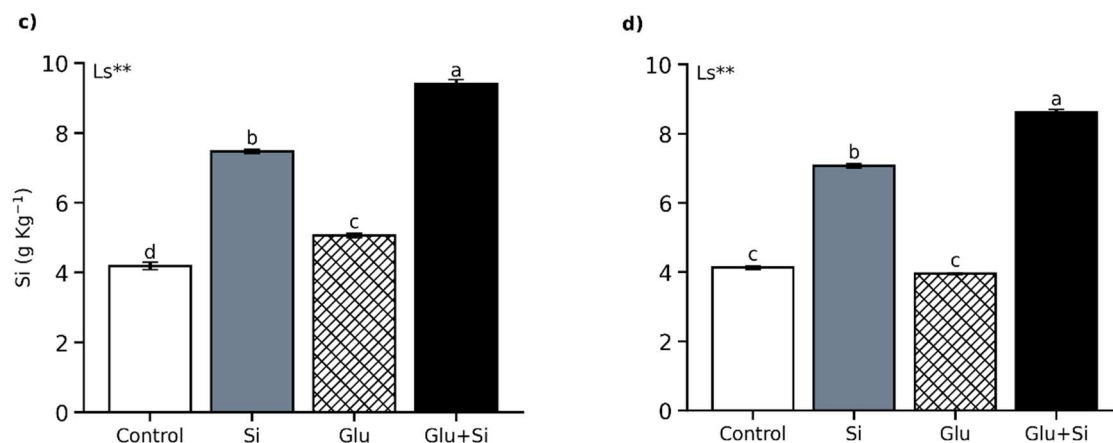
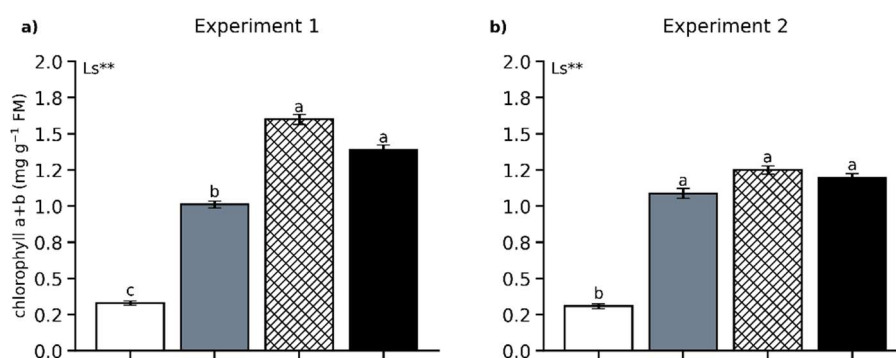


Figura 4 - Efeitos das pulverizações foliares sob os teores de N (a, b) e Si (b, c) na cultura do milho em duas áreas experimentais (1, 2) com deficiência de N. As Letras diferem os efeitos entre os tratamentos, e ** os efeitos significativos, ambos a 1% de probabilidade pelo teste Tukey. As barras representam o erro padrão da média, n = 6.

3.2.2 Pigmentos fotossintéticos, FV/FM e GCI

A aplicação foliar de Si e de Glu isolados e combinados resultaram em aumentos na concentração de clorofila em comparação com o grupo controle (Figura 5a,b). No entanto, entre os três tratamentos Si e de Glu isolados e combinados destacou-se tendo maior teor de clorofila Glu isolado e Glu e Si associados para experimento 1 e esses três tratamentos foram semelhantes para experimento 2.



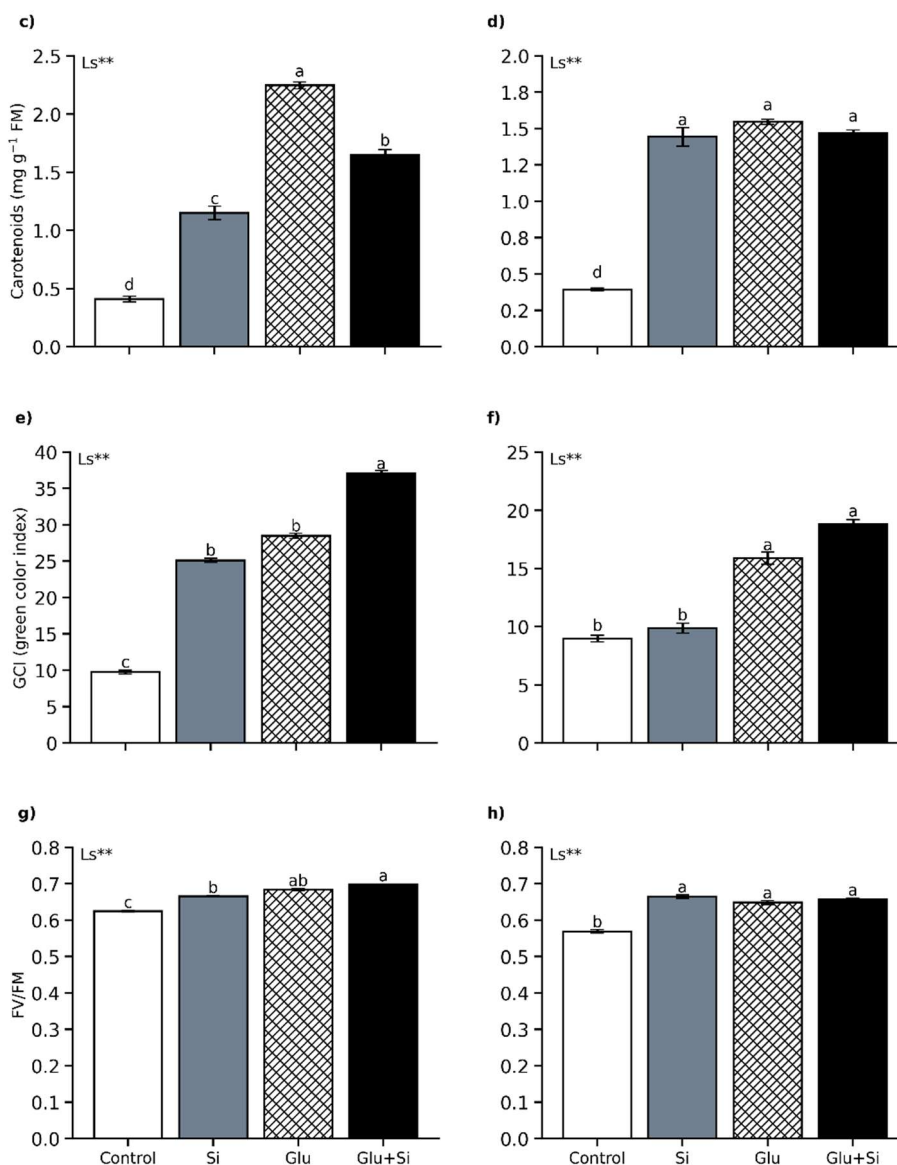


Figura 5 - Efeitos das pulverizações foliares sob chlorophyll a+b (a, b), carotenoids (c, d), Índice de Cor Verde – GCI (e, f) e rendimento quântico do PSII – FV/FM (g, h) na cultura do milho em duas áreas experimentais (1, 2) com potenciais deficiência de N. As Letras diferem os efeitos entre os tratamentos, e ** os efeitos significativos, ambos a 1% de probabilidade pelo teste Tukey. As barras representam o erro padrão da média, n = 6.

A aplicação de Si e Glu, individualmente ou em conjunto, resultou no aumento na concentração de carotenoides em relação ao controle nos dois experimentos (Figura 5c, d). No experimento 1, o tratamento Glu destacou-se atingindo um incremento próximo de 449% em relação ao controle e de 96% em relação ao

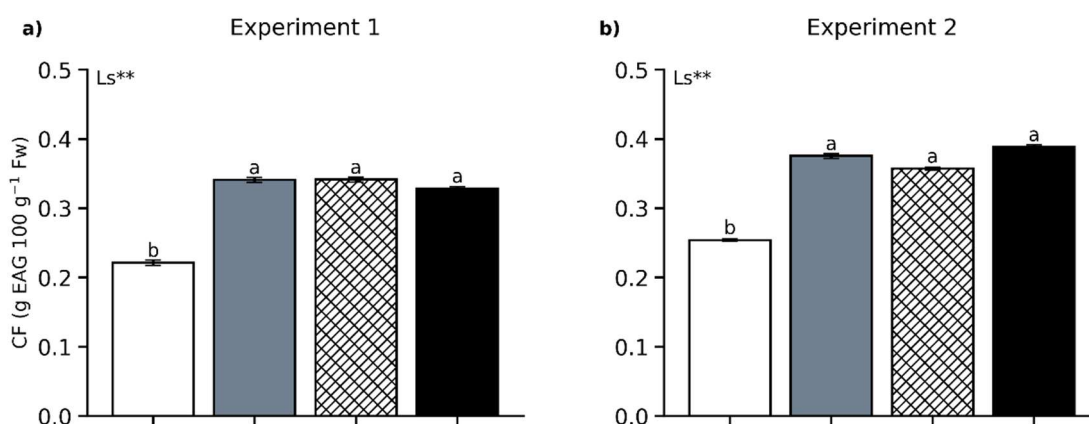
tratamento Si, e cerca de 36% em relação ao tratamento Si+AG. Já no experimento 2, destacou-se apenas o tratamento Glu e resultou em incremento próximo de 269% no teor de carotenoides em relação ao controle.

As plantas tratadas com Si e Glu, isoladamente ou em combinação, exibiram aumento no GCI em comparação ao controle (Figura 5e, f). O tratamento Glu+Si demonstrou o efeito mais pronunciado nesta variável apenas para experimento 1, pois teve incremento aproximadamente 280% em relação ao controle, 48% em relação ao tratamento Si, e cerca de 30% em relação ao tratamento Glu. No experimento 2, para o GCI o tratamento Glu+Si diferenciou-se apenas para os grupos controle e o Si isolado, havendo um aumento de aproximadamente 109% em relação ao controle, 90% em relação ao tratamento Si, e cerca de 18% em relação ao tratamento Glu.

As plantas submetidas à aplicação de Si e Glu exibiram incremento na eficiência fotoquímica FV/FM (Figura 5g, h). Nos experimentos 1 e 2, os tratamentos Si, Glu e Glu+Si apresentaram um aumento de aproximadamente 8 e 19% em relação ao controle, respectivamente.

3.2.3 CF e EE e Produtividade

Notavelmente, a aplicação foliar de Si e Glu isoladamente e a combinação de ambos demonstraram aumento substancial nos níveis de CF atingindo próximo de 55 e 56% em comparação com o controle para os experimentos 1 e 2, respectivamente (Figura 6a, b), mas em ambos os experimentos os tratamentos Si, Glu e Glu+Si não houveram diferenças entre si.



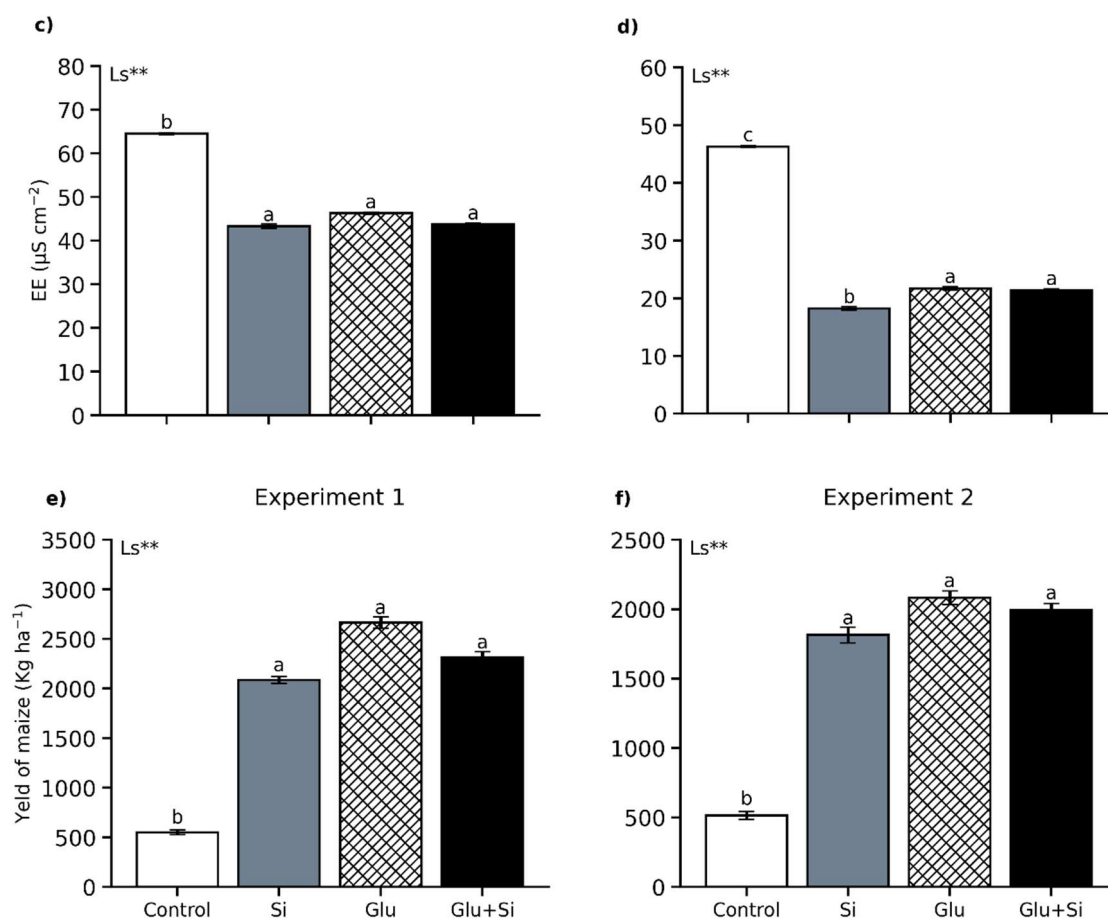


Figura 6 - Efeitos das pulverizações foliares sob composto fenólicos – CF (a, b), Extravasamento de Eletrólitos – EE (c, d) e Produtividade (e, f) na cultura do milho em duas áreas experimentais com potenciais deficiência de N. As Letras diferem os efeitos entre os tratamentos, e ** os efeitos significativos, ambos a 1% de probabilidade pelo teste Tukey. As barras representam o erro padrão da média, $n = 6$.

O EE, que é um indicador de ruptura das membranas celulares, foi reduzido nas plantas tratadas com Si e Glu e a combinação em relação às plantas controle (Figura 6c, d).

Para a variável produtividade de milho os tratamentos com aplicação foliar Si e Glu tiveram resultados superiores em relação aos demais tratamentos para a produtividade do milho (Figura 6e, f). Tanto o Si quanto o Glu, aplicados isoladamente ou em conjunto, resultaram em aumentos da produtividade do milho em comparação com o tratamento controle. Desse modo, os tratamentos aumentaram a produtividade

das plantas de milho, chegando a 1700, 2700 e 2300 kg ha⁻¹ no experimento 1 e 1800, 2000 e 1900 kg ha⁻¹ no experimento 2 para Si, Glu e Glu+Si, respectivamente.

3.3 Análise multivariada

3.3.1 Análise de Componentes Principais (PCA)

Além de analisar individualmente os efeitos das aplicações foliares e suas correlações, também utilizamos a Análise de Componentes Principais (PCA) para compreender a estrutura dos dados coletados a partir das variáveis em foco, relacionadas às áreas com deficiências de moderada N e como as aplicações foliares (Controle, Si, Glu e Glu+Si) contribuíram para a redução desse estresse. A análise de PCA revelou que uma parte substancial da variação nos dados pode ser explicada por um reduzido conjunto de componentes principais (Figura 7a, b).

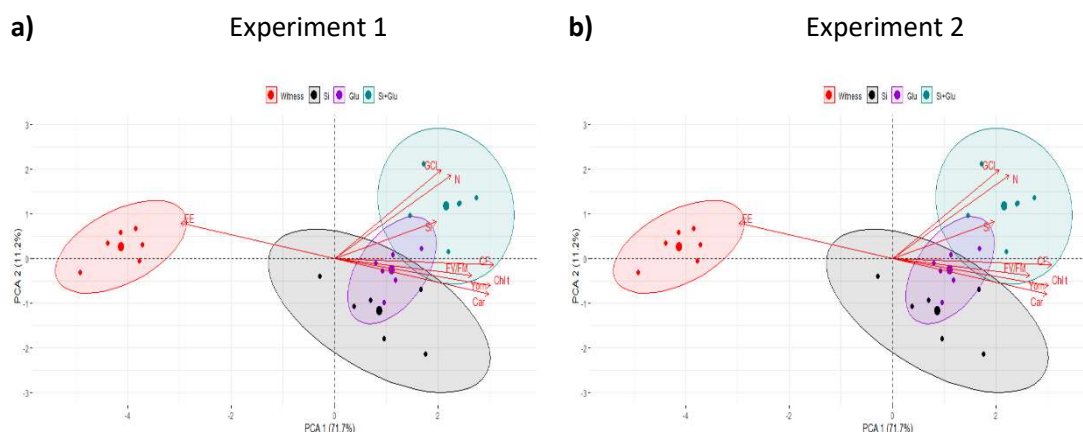


Figura 7 - Biplot das pulverizações foliares sob os teor de N, Si, Chlorophyll (a+b), Caratenoids, Índice de Cor Verde – GCI, rendimento quântico do PSII (FV/FM), Composto fenólicos (CF), Extravasamento de Eletrólitos (EE) e Produtividade na cultura do milho em função de duas áreas experimentais com potenciais deficiência de N. Os descrever os tratamentos, quais as áreas experimentais, o que tinha de diferentes nelas.

No experimento 1, a PCA revelou que os dois primeiros componentes principais (PC1 e PC2) explicaram a maior parte da variância nos dados, com proporções de variância de aproximadamente 77% e 12%, respectivamente (Figura 7a). Esses dois componentes capturaram informações essenciais sobre as variáveis originais e suas interações.

A correlação positiva do PC1 com a maioria das variáveis, sugere que os tratamentos com Si, Glu e a combinação de ambos exerceram um impacto positivo na capacidade de adaptação das plantas às condições do experimento 1. Essa observação é notável quando comparada ao grupo de controle, que revelou níveis significativamente elevados de EE, indicando uma resposta desfavorável das plantas às condições de estresse.

Os resultados da análise dos Componentes Principais (PC1) no experimento 2 indicam uma composição significativa, com influência predominante dos tratamentos com Si, Glu e Glu+Si na maioria das variáveis estudadas (Figura 7b). Esses tratamentos apresentaram cargas fatoriais positivas no PC1, sugerindo que eles exercem uma influência positiva na variação dos dados. Além disso, é importante notar que a variável EE apresentou significância estatística apenas no tratamento controle, semelhante a PCA do experimento 1. Isso sugere uma associação distinta para essa variável em relação aos demais tratamentos. Essa observação indica que o controle exibiu uma resposta diferente às condições de estresse em comparação com os tratamentos com Si, Glu e Glu+Si.

Ressalta ainda que os tratamentos com Si e Glu e a combinação de ambos, teve um padrão semelhante com do experimento 1, ou seja, aumento nas concentrações de N, Si, clorofila, carotenoides, GCI, FV/FM, CF e na produtividade, indicando os impactos positivos dos tratamentos Si, Glu e Glu+Si em promover essas variáveis.

4. DISCUSSÃO

4.1 Estabilidade das caldas Si, Glu e Glu+Si

Neste trabalho, investigamos aplicações foliares dos bioestimulantes e para que haja potencial benefícios nas plantas, é relevante conhecer melhor a estabilidade das soluções que seriam aplicadas nas folhas da cultura. Assim, foi realizado um teste laboratorial preliminar para verificação visual da calda dos tratamentos em relação a sua estabilidade a partir da leitura do índice de turbidez das soluções.

O índice de turbidez está relacionado à presença de partículas em suspensão e à formação de polímeros na solução, destaca-se como um fenômeno

particularmente evidente nas soluções que contêm Si, devido à sua notável instabilidade em função do tempo (Pang et al., 2024).

As avaliações das soluções contendo Si é relevantes devido a riscos de reações de polimerização do Si que é afetado por diferentes condições. É conhecido que o Si é absorvido pelas plantas na forma de ácido monossilícico (Si(OH)_4), que é sua forma instável, sendo esse processo eficiente em concentrações abaixo de 3 mM (Birchall, 1995). Em concentrações acima desse limite tem-se supersaturação do ácido forma-se sílica (SiO_2) insolúvel convertida em sua forma polimérica, constituindo partículas coloidais esféricas (Zaid et al., 2018) não nanométricas.

Somado a isso, a adição de outra substância à solução contendo Si pode acelerar as reações de polimerização do Si (Iler, 1979), e, nesse contexto, a tentativa de formar uma solução estável de Si com glutamato monossódico assume importância significativa por permitir que plantas absorvam ambos os elementos.

Assim, estudos para elucidar o processo de interação entre Glu e Si têm sido pouco explorados. No entanto, os poucos estudos desenvolvidos baseados na mistura aminoácidos (Gly, Arg, Asn, Gln, Glx, Ser, Thr, Tyr, Pro, Ala, Lys) e Si, tem demonstrado resultados promissores e indicam que os aminoácidos tende a manter as soluções límpidas, estáveis e com baixa polimerização do Si, principalmente durante as 3 horas subsequentes após o preparo das soluções (Coradin; Livage, 2001; Belton et al., 2004).

Nossos resultados corroboram em parte com esses achados, pois nossa solução combinada de Glu ($0,35 \text{ g L}^{-1}$) e Si ($1,15 \text{ g L}^{-1}$), manteve-se aspecto de uma solução transparente e com baixo índice de turbidez, por mais tempo, ou seja, por 6 horas após o preparo das mesmas. Essas descobertas indicam a viabilidade técnica da mistura de Glu+Si para pulverização foliar pois pode-se indicar que tem-se baixo risco de polimerização ou seja tem potencial para que haja absorção pela planta mas isso precisa ser comprovado com as respostas biológicas das plantas

4.2 Impacto da deficiência de N em plantas de milho

Ficou evidenciado nas plantas do tratamento controle em relação aos outros tratamentos uma baixa concentração de N nas folhas (Figura 4a, b) associado a baixa produtividade (Figura 6e, f). Essa constatação era prevista, dada a alta exigência de

N por parte das plantas de milho (De Mello Prado, 2021; Ahmad et al., 2023) e seu papel vital na formação de enzimas e transportadores da membrana celular (Muratore et al., 2021), sendo crucial para a síntese de proteínas (Gojon et al., 2011), e a atividade fotossintética (Cassman et al., 2002).

O comprometimento das funções do N nas plantas controle ficou bem claro com diminuição significativa no CGI (Figura 5e, f), validado pela redução na concentração de pigmentos, especialmente a clorofila (Figura 5a, b, c, d). Esse processo da diminuição da clorofila é muito conhecido como resultado da proteólise da enzima Rubisco e de outras proteínas presentes nos cloroplastos, visando atender à demanda crescente de N por novos órgãos (Feller et al., 2008b).

Neste cenário, ficou evidenciado a deficiência de N nas plantas controle tendo baixa eficiência fotossintética (Figura 5g, h), dada importância dos pigmentos fotossintéticos que desempenham um papel central na transferência de energia de excitação para os fotossistemas (Zhang et al., 2023). Como consequência, esse cenário provavelmente resultou em estresse oxidativo, evidenciado pelo aumento do EE (Figura 6c, d) que é um indicador de danos celulares e estresse (Hasanuzzaman et al., 2017). Esse estresse ficou agravado porque houve diminuição dos compostos fenólicos (Figura 7a, b), pois esses compostos têm ação antioxidantes não enzimáticos (Y. Zhang et al., 2024).

4.3 Papel do Si, Glu e Glu+Si na tolerância das plantas de milho a deficiência nutricional de N.

Existem muitas regiões do mundo com solos com baixa disponibilidade de Si (Schaller et al., 2020) e com isso tem ampliado interesse por pesquisas com aplicação foliar deste elemento benéfico.

O presente estudo, indicou o potencial da adubação foliar com Si em relação às plantas do controle, pois ficou claro o aumento do teor de Si nas plantas de milho (Figura 4c, d). Isso indica que houve uma ótima absorção de Si, pelo fato de não haver polimerização de Si em solução e devido a alta eficiência dos transportadores de Si nas membranas que é comum em espécies acumuladoras como milho (teor foliar de Si $>10 \text{ g kg}^{-1}$) conforme indicado por Ma; Takahashi (2002).

Diante do incremento do Si nas plantas de milho com a aplicação foliar isolada deste elemento em relação às plantas controle, evidenciamos benefícios biológicos importantes na cultura a partir do aumento do CGI e dos pigmentos fotossintéticos e consequentemente no FV/FM e nos CF e ao mesmo tempo na diminuição do EE, bem como no incremento da produtividade da cultura.

Os benefícios da aplicação foliar individual de Si tem sido indicado em cultivos em vasos em condições controladas (Galindo et al., 2021; Haddad et al., 2018) em plantas de sorgo (de Oliveira et al., 2019), forragem (Buchelt et al., 2020) e milho (da Silva et al., 2021). Os efeitos positivos do Si via foliar tem relação com a melhoria do aparelho fotossintético devido a diminuição do estresse por induzir compostos antioxidantes (Buchelt et al., 2020) e isso melhora a eficiência de uso do N na planta (Deus et al., 2020) e consequentemente tem benefícios na produtividade do cultivo. Embora a maioria destes estudos indiquem benefícios do Si via foliar no cultivo do milho, porém foram desenvolvidos em condições controladas e nesta pesquisa confirma esses benefícios em condições de campo e portanto, aumenta a aplicabilidade prática desta informação para os cultivos e consequentemente a viabilidade agrônômica.

Um outro bioestimulante importante para aplicação foliar seria os aminoácidos que tem chamado a atenção dos pesquisadores, embora a maioria dos estudos avaliaram a mistura de diferentes aminoácidos (Rouphael et al., 2018; Khan et al., 2019) que tem origem de subprodutos da agroindústria. No entanto, falta avançar os estudos avaliando os efeitos isolados do aminoácido para melhor compreensão científica dos efeitos na planta.

Neste cenário, optamos pelo estudo de apenas um aminoácido escolhendo o Glu pois é um conhecido precursor de outros aminoácidos e hormônios vegetais e pode regular processos fotossintéticos, incluindo a abertura estomática que afeta a entrada de dióxido de carbono e a saída de oxigênio (López, 2022), influenciando a eficiência da fotossíntese especialmente em plantas com estresse. No entanto, apesar destes efeitos benéficos são poucas pesquisas avaliando esse aminoácido fornecido via foliar isoladamente em estudos a nível de campo e em plantas de milho com estresse nutricional.

Na presente pesquisa evidenciamos que a aplicação foliar isolada de Glu foi benéfica para aumentar a tolerância da cultura do milho a deficiência de N que teve início pelo incremento dos teores de N nas folhas da cultura (Figura 4a , b). Isso se deve possivelmente ao fato do Glu ao atingir o citoplasma das células foliares atuam como precursor para outros aminoácidos (Decoursey, 2003) induzindo a formação de aminoácidos livres, proteínas solúveis e consequentemente o N (Cusido et al., 1987). Isso sugere que a aplicação de Glu possa ter ampliado a atividade do complexo enzimático GS/GOGAT, contribuindo efetivamente para a reassimilação de N liberado durante a fotorrespiração (Novitskaya et al., 2002).

Neste cenário, ficou claro que a aplicação foliar de Glu isoladamente em relação às plantas controle foi suficiente para incrementar o conteúdo dos pigmentos fotossintéticos e consequentemente o FV/FM nas plantas de milho. Esses resultados são respaldados pelos achados de Lee et al. (2017), que também observaram efeitos positivos na fisiologia da planta e incrementou a taxa fotossintética e a condutância estomática com a aplicação foliar de Glu em uma hortaliça.

Além disso, aplicação foliar de Glu ao mesmo tempo que favoreceu o metabolismo do N na planta estressada foi responsável por diminuir o EE possivelmente por ter anulado o estresse oxidativo devido ao incremento de compostos fenólicos antioxidantes (Figura 6a, b, c, d). Portanto, o fornecimento do Glu via foliar é suficiente para induzir aumento de compostos antioxidantes, tanto enzimáticos quanto não enzimáticos (Gou et al., 2020; Asghar et al., 2023). Esses benefícios do Glu associado a melhoria fisiológica e na resposta antioxidante é um achado para o cultivo do milho com restrição de N e possivelmente recebeu contribuição dos receptores de glutamato (GLRs) presentes na planta que podem ser ativados pelo Glu e gera uma cascata de mecanismos sinalizadores (Forde & Lea, 2007) que tem implicações no metabolismo de defesa para aumentar a resiliência da planta ao estresse nutricional.

Uma estratégia interessante para aumentar a resiliência das plantas de milho com estresse nutricional seria a combinação de dois bioestimulantes, mas isso precisa ser comprovado. Os efeitos da aplicação conjunta do Si e do Glu via foliar em cultivos com deficiência nutricional ainda é pouco conhecida especialmente na cultura do milho e não se sabe se poderia haver sinergia entre eles em relação à aplicação

isolada. Nesta pesquisa evidenciou que existe uma compatibilidade entre esses dois elementos, fato desconhecido no cultivo do milho pois favoreceu a absorção de Si e do N pela planta em relação a aplicações isoladas e ainda pelo fato dos testes preliminares realizados na solução reforçam esse efeito. No entanto, de forma geral essa sinergia da aplicação conjunta do Glu e do Si na nutrição da planta pode ser considerada neutra pois não foi suficiente para superar os benefícios em aspectos fisiológicos e consequentemente não aumentou a produtividade do milho em relação a aplicações isoladas, fatos discutidos anteriormente. Portanto, não havendo ganhos cumulativos para o uso combinado do Glu e do Si não justifica agronomicamente seu uso associado em aplicações foliares em cultivos de milho deficiente em N.

A Análise de Componentes Principais (PCA) reforça a importância dos tratamentos foliares para atenuação do estresse nutricional estudado. No Experimento 1, a PCA revelou que os dois primeiros componentes principais (PC1 e PC2) explicaram a maior parte da variância nos dados, com proporções de variância de 77% e 12%, respectivamente (Figura 8). Esses dois componentes capturaram informações essenciais sobre as variáveis originais e suas interações (Jolliffe & Cadima, 2016). A correlação positiva do PC1 dos experimentos 1 e 2 para a maioria das variáveis confirma que os três tratamentos foliares estudados exerceram um impacto positivo na capacidade de adaptação das plantas cultivadas sob estresse (Hosseini et al., 2023).

As informações deste estudo demonstram pela primeira vez a similaridade dos dois bioestimulantes para aumentar a tolerância a deficiência de N e deverá beneficiar vasta área no mundo que cultiva o milho com recursos limitados para aquisição de fertilizantes nitrogenados que normalmente têm elevados preços tendo implicações sustentáveis para a segurança alimentar.

5. CONCLUSÃO

As nossas descobertas indicam que aplicação foliar de Glu e de Si tem efeitos semelhantes e benéficos para as plantas de milho deficientes de N por modular mecanismos fisiológicos ao diminuir o estresse oxidativo e aumentar concentração de pigmentos fotossintetizantes e a eficiência da fotossíntese e a produtividade. A pesquisa forneceu uma estratégia adicional em base sustentável para aumentar

resiliência do milho cultivado com deficiência de N a partir da exploração do uso dos bioestimulantes Glu ou Si não havendo necessidade de combinação.

6. REFERÊNCIAS

Aguiar, A. T. E., Gonçalves, C., Paterniani, M., Tucci, M., & Castro, C. (2014). Boletim 200: Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas. IAC Campinas.

Ahmad, I., Batyrbek, M., Ikram, K., Ahmad, S., Kamran, M., Misbah, Khan, R. S., Hou, F., & Han, Q. (2023). Nitrogen management improves lodging resistance and production in maize (*Zea mays* L.) at a high plant density. *Journal of Integrative Agriculture*, 22(2), 417–433. <https://doi.org/10.1016/j.jia.2022.08.074>

Ahmad, W., Coffman, L., Weerasooriya, A. D., Crawford, K., & Khan, A. L. (2024). The silicon regulates microbiome diversity and plant defenses during cold stress in *Glycine max* L. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1280251. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1280251>

Alvarenga, R. C., CRUZ, J., & NOVOTNY, E. (2002). Cultivo do milho: Preparo convencional do solo.

Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., De Moraes Gonçalves, J. L., & Sparovek, G. (2013). Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711–728. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>

Araújo, W. B. S., Teixeira, G. C. M., de Mello Prado, R., & Rocha, A. M. S. (2022). Silicon mitigates nutritional stress of nitrogen, phosphorus, and calcium deficiency in two forages plants. *Scientific Reports*, 12(1), Artigo 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10615-z>

Asghar, M. A., Balogh, E., Ahres, M., Szalai, G., Gondor, O. K., Darkó, É., Borbély, P., Kulman, K., Mednyánszky, Z., Simon-Sarkadi, L., & Kocsy, G. (2023). Ascorbate and Hydrogen Peroxide Modify Metabolite Profile of Wheat Differently. *Journal of Plant Growth Regulation*, 42(10), 6155–6170. <https://doi.org/10.1007/s00344-022-10793-0>

Barreto, R. F., Maier, B. R., Prado, R. D. M., De Moraes, T. C. B., & Felisberto, G. (2022). Silicon attenuates potassium and sulfur deficiency by increasing nutrient use efficiency in basil plants. *Scientia Horticulturae*, 291, 110616. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110616>

Belton, D., Paine, G., Patwardhan, S. V., & Perry, C. C. (2004). Towards an understanding of (bio)silicification: The role of amino acids and lysine oligomers in silicification. *Journal of Materials Chemistry*, 14(14), 2231–2241. <https://doi.org/10.1039/B401882F>

Birchall, J. D. (1995). The essentiality of silicon in biology. *Chemical Society Reviews*, 24(5), 351. <https://doi.org/10.1039/cs9952400351>

Buchelt, A. C., Teixeira, G. C. M., Oliveira, K. S., Rocha, A. M. S., De Mello Prado, R., & Caione, G. (2020). Silicon Contribution Via Nutrient Solution in Forage Plants to Mitigate Nitrogen, Potassium, Calcium, Magnesium, and Sulfur Deficiency. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 20(3), 1532–1548. <https://doi.org/10.1007/s42729-020-00245-7>

Campos, C. N. S., Silva Júnior, G. B. D., Prado, R. D. M., David, C. H. O. D., Souza Junior, J. P. D., & Teodoro, P. E. (2020). Silicon mitigates ammonium toxicity in plants. *Agronomy Journal*, 112(2), 635–647. <https://doi.org/10.1002/agj2.20069>

Cassman, K. G., Dobermann, A., & Walters, D. T. (2002). Agroecosystems, Nitrogen-use Efficiency, and Nitrogen Management. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 31(2), 132–140. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-31.2.132>

Coradin, T., & Livage, J. (2001). Effect of some amino acids and peptides on silicic acid polymerization. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 21(4), 329–336. [https://doi.org/10.1016/S0927-7765\(01\)00143-6](https://doi.org/10.1016/S0927-7765(01)00143-6)

Cusido, R. M., Palazon, J., Altabella, T., & Morales, C. (1987). Effect of salinity on soluble protein, free amino acids and nicotine contents in *Nicotiana rustica* L. *Plant and Soil*, 102(1), 55–60. <https://doi.org/10.1007/BF02370900>

da Silva, E. S., de Mello Prado, R., Soares, A. de A. V. L., de Almeida, H. J., & dos Santos, D. M. M. (2021). Response of Corn Seedlings (*Zea mays* L.) to Different Concentrations of Nitrogen in Absence and Presence of Silicon. *Silicon*, 13(3), 813–818. <https://doi.org/10.1007/s12633-020-00480-8>

De Mello Prado, R. (2021). Mineral nutrition of tropical plants. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-71262-4>

de Oliveira, R. L. L., de Mello Prado, R., Felisberto, G., Checchio, M. V., & Gratão, P. L. (2019). Silicon Mitigates Manganese Deficiency Stress by Regulating the Physiology and Activity of Antioxidant Enzymes in Sorghum Plants. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 19(3), 524–534. <https://doi.org/10.1007/s42729-019-00051-w>

Decoursey, T. E. (2003). Voltage-Gated Proton Channels and Other Proton Transfer Pathways. *Physiological Reviews*, 83(2), 475–579. <https://doi.org/10.1152/physrev.00028.2002>

Deus, A. C. F., de Mello Prado, R., de Cássia Félix Alvarez, R., de Oliveira, R. L. L., & Felisberto, G. (2020). Role of Silicon and Salicylic Acid in the Mitigation of Nitrogen Deficiency Stress in Rice Plants. *Silicon*, 12(5), 997–1005. <https://doi.org/10.1007/s12633-019-00195-5>

Dionisio-Sese, M. L., & Tobita, S. (1998). Antioxidant responses of rice seedlings to salinity stress. *Plant Science*, 135(1), 1–9. [https://doi.org/10.1016/S0168-9452\(98\)00025-9](https://doi.org/10.1016/S0168-9452(98)00025-9)

Feller, U., Anders, I., & Demirevska, K. (2008a). Degradation of rubisco and other chloroplast... - Google Acadêmico. https://scholar.google.com/scholar_lookup?title=Degradation%20of%20rubisco%20and%20other%20chloroplast%20proteins%20under%20abiotic%20stress&journal=Gen.%20Appl.%20Plant%20Physiol.%20GAPP&volume=34&pages=5-18&publication_year=2008&author=Feller%2CU&author=Anders%2CI&author=Demi revska%2CK

Feller, U., Anders, I., & Demirevska, K. (2008b). Degradation of Rubisco and other chloroplast proteins under abiotic stress. *General and Applied Plant Physiology*, 34.

Forde, B. G., & Lea, P. J. (2007). Glutamate in plants: Metabolism, regulation, and signalling. *Journal of Experimental Botany*, 58(9), 2339–2358. <https://doi.org/10.1093/jxb/erm121>

Freddi, O. da S., Ferraudo, A. S., & Centurion, J. F. (2008). Análise multivariada na compactação de um latossolo vermelho cultivado com milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32, 953–961. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000300005>

Galindo, F. S., Pagliari, P. H., Rodrigues, W. L., Fernandes, G. C., Boleta, E. H. M., Santini, J. M. K., Jalal, A., Buzetti, S., Lavres, J., & Teixeira Filho, M. C. M. (2021). Silicon Amendment Enhances Agronomic Efficiency of Nitrogen Fertilization in Maize and Wheat Crops under Tropical Conditions. *Plants*, 10(7), 1329. <https://doi.org/10.3390/plants10071329>

Gojon, A., Krouk, G., Perrine-Walker, F., & Laugier, E. (2011). Nitrate transceptor(s) in plants. *Journal of Experimental Botany*, 62(7), 2299–2308. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq419>

Gou, T., Yang, L., Hu, W., Chen, X., Zhu, Y., Guo, J., & Gong, H. (2020). Silicon improves the growth of cucumber under excess nitrate stress by enhancing nitrogen assimilation and chlorophyll synthesis. *Plant Physiology and Biochemistry*, 152, 53–61. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.04.031>

Haddad, C., Arkoun, M., Jamois, F., Schwarzenberg, A., Yvin, J.-C., Etienne, P., & Laîné, P. (2018). Silicon Promotes Growth of *Brassica napus* L. and Delays Leaf Senescence Induced by Nitrogen Starvation. *Frontiers in Plant Science*, 9, 516. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00516>

Havaux, M. (2014). Carotenoid oxidation products as stress signals in plants. *The Plant Journal*, 79(4), 597–606. <https://doi.org/10.1111/tpj.12386>

Hiraga, S., Sasaki, K., Ito, H., Ohashi, Y., & Matsui, H. (2001). A large family of class III plant peroxidases. *Plant and Cell Physiology*, 42(5), 462–468.

Hosseini, S., Shabani, L., Sabzalian, M. R., & Gharibi, S. (2023). Foliar spray of commercial seaweed and amino acid-derived biostimulants promoted phytoremediation potential and salinity stress tolerance in halophytic grass, *Puccinellia distans*. *International Journal of Phytoremediation*, 25(4), 415–429. <https://doi.org/10.1080/15226514.2022.2088688>

Iler, R. K. (1979). The Chemistry of Silica, Solubility, Polymerization. *Colloid and Surface Properties, and Biochemistry*, 866. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1571698599197117056>

Jolliffe, I. T., & Cadima, J. (2016). Principal component analysis: A review and recent developments. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 374(2065), 20150202. <https://doi.org/10.1098/rsta.2015.0202>

Kan, C.-C., Chung, T.-Y., Wu, H.-Y., Juo, Y.-A., & Hsieh, M.-H. (2017). Exogenous glutamate rapidly induces the expression of genes involved in metabolism and defense responses in rice roots. *BMC Genomics*, 18(1), 186. <https://doi.org/10.1186/s12864-017-3588-7>

Khan, I., Awan, S. A., Rizwan, M., Brestic, M., & Xie, W. (2023). Silicon: An essential element for plant nutrition and phytohormones signaling mechanism under stressful conditions. *Plant Growth Regulation*, 100(2), 301–319.

Khan, S., Yu, H., Li, Q., Gao, Y., Sallam, B. N., Wang, H., Liu, P., & Jiang, W. (2019). Exogenous Application of Amino Acids Improves the Growth and Yield of Lettuce by Enhancing Photosynthetic Assimilation and Nutrient Availability. *Agronomy*, 9(5), 266. <https://doi.org/10.3390/agronomy9050266>

Korndorfer, G. H., Pereira, H. S., & Nolla, A. (2004). Análise de silício: Solo, planta e fertilizantes. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 34p. Boletim técnico, 2.

Landau, E. C., Sans, L. M. A., & Santana, D. P. (2008). Cultivo do milho. Sistema de produção, 2. <https://core.ac.uk/download/pdf/45490820.pdf>

Lee, H. J., Kim, J. S., Lee, S. G., Kim, S. K., Mun, B., & Choi, C. S. (2017). Glutamic Acid Foliar Application Enhances Antioxidant Enzyme Activities in Kimchi Cabbages Leaves Treated with Low Air Temperature. *Horticultural Science and Technology*, 35(6), 700–706. <https://doi.org/10.12972/kjhst.20170074>

Li, W., Gu, X., Fang, H., Zhao, T., Yin, R., Cheng, Z., Tan, C., Zhou, Z., & Du, Y. (2024). Optimizing nitrogen application rate by establishing a unified critical nitrogen dilution curve for maize under different mulching planting patterns. *European Journal of Agronomy*, 152, 127026. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.127026>

Lichtenthaler, H. K. (1987). [34] Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes. Em *Methods in enzymology* (Vol. 148, p. 350–382). Elsevier.

Linhares, R. R. (2014). Eficiência de fungicidas no tratamento de sementes de linhagens e respectivos híbridos de milho [PhD Thesis]. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO.

López de la Calle, M. (2022). Metabolic changes induced by the combination of abiotic stresses and identification of tolerance mechanisms in tomato plants. *Proyecto de Investigación*: <https://digitum.um.es/digitum/handle/10201/118406>

Ma, J. F., & Takahashi, E. (2002). Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan. Elsevier Science.

Maddonni, G. A. (2012). Analysis of the climatic constraints to maize production in the current agricultural region of Argentina—A probabilistic approach. *Theoretical and Applied Climatology*, 107(3), 325–345. <https://doi.org/10.1007/s00704-011-0478-9>

Malavolta, E., Vitti, G. C., & Oliveira, S. A. de. (1997). Avaliação do estado nutricional das plantas: Princípios e aplicações.

Miflin, B. J., & Lea, P. J. (1976). The pathway of nitrogen assimilation in plants. *Phytochemistry*, 15(6), 873–885. [https://doi.org/10.1016/S0031-9422\(00\)84362-9](https://doi.org/10.1016/S0031-9422(00)84362-9)

Muratore, C., Espen, L., & Prinsi, B. (2021). Nitrogen Uptake in Plants: The Plasma Membrane Root Transport Systems from a Physiological and Proteomic Perspective. *Plants*, 10(4), Artigo 4. <https://doi.org/10.3390/plants10040681>

Neumann, M., Horst, E. H., Cristo, F. B., Souza, A. M., Plodoviski, D. C., & Costa, L. (2021). Evaluation of corn hybrids for silage grown in different locations. *Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia*, 73, 1171–1179. <https://doi.org/10.1590/1678-4162-12373>

Nishiyama, R., Kato, M., Nagata, S., Yanagisawa, S., & Yoneyama, T. (2012). Identification of Zn–Nicotianamine and Fe–2'-Deoxymugineic Acid in the Phloem Sap from Rice Plants (*Oryza sativa* L.). *Plant and Cell Physiology*, 53(2), 381–390. <https://doi.org/10.1093/pcp/pcr188>

Nogueira, A. R. de A., Machado, P. L. O. de A., Carmo, C. A. F. de S. do, & Ferreira, J. R. (1998). Manual de laboratórios: Solo, água, nutrição vegetal, nutrição animal e alimentos. 1. Coleta, acondicionamento e preparo de amostras. Sao Carlos: EMBRAPA-CPPSE, 1998. <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1154460>

Novitskaya, L., Trevanion, S. J., Driscoll, S., Foyer, C. H., & Noctor, G. (2002). How does photorespiration modulate leaf amino acid contents? A dual approach through modelling and metabolite analysis. *Plant, Cell & Environment*, 25(7), 821–835. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2002.00866.x>

Pang, Z., Shen, S., Ma, Q., Wang, Y., Peng, H., & Liang, Y. (2024). Extracellular silicon (Si) nanocoating induced by cationic polymers enhances heavy metal resistance in both Si-accumulating and non-Si-accumulating plants. *Environmental Technology & Innovation*, 33, 103500. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103500>

Rhodes, D., Brunk, D. G., & Magalhães, J. R. (1989). Assimilation Of Ammonia by Glutamate Dehydrogenase? Em J. E. Poulton, J. T. Romeo, & E. E. Conn (Orgs.),

Plant Nitrogen Metabolism (p. 191–226). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-0835-5_6

Robertson, G. P., & Groffman, P. M. (2024). Nitrogen transformations. Em *Soil Microbiology, Ecology and Biochemistry* (p. 407–438). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822941-5.00014-4>

Rodrigues, V., Pinho, R., Paglis, C., Bueno Filho, J., & Brito, A. (2005). Comparação entre métodos para estimar a produtividade de grãos de milho. *Ciencia E Agrotecnologia - CIENC AGROTEC*, 29. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542005000100004>

Rouphael, Y., Spíchal, L., Panzarová, K., Casa, R., & Colla, G. (2018). High-Throughput Plant Phenotyping for Developing Novel Biostimulants: From Lab to Field or From Field to Lab? *Frontiers in Plant Science*, 9, 1197. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01197>

Santos, H. G. dos. (2018). Sistema brasileiro de classificação de solos (5ª edição revista e ampliada). Embrapa.

Schaller, J., Cramer, A., Carminati, A., & Zarebanadkouki, M. (2020). Biogenic amorphous silica as main driver for plant available water in soils. *Scientific Reports*, 10(1), 2424. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59437-x>

Siebeneichler, T. J., Crizel, R. L., Rombaldi, C. V., & Galli, V. (2024). Regulation of phenylpropanoid biosynthesis in strawberry ripening: Molecular and hormonal mechanisms. *Phytochemistry Reviews*. <https://doi.org/10.1007/s11101-023-09907-7>

Singleton, V. L., & Rossi, J. A. (1965). Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phosphotungstic acid reagents. *American journal of Enology and Viticulture*, 16(3), 144–158.

USDA, N. (2023). World agricultural supply and demand estimates. Internet site: <http://usda.mannlib.cornell.edu/reports/waobr/wasde-bb> (Accessed May 11, 2005).

Valmalette, J. C., Dombrovsky, A., Brat, P., Mertz, C., Capovilla, M., & Robichon, A. (2012). Light-induced electron transfer and ATP synthesis in a carotene synthesizing insect. *Scientific Reports*, 2(1), 579.

Wani, B. A., Rashid, S., Rashid, K., Javid, H., Magray, J. A., ul Qadir, R., & Islam, T. (2022). 3 Nitrogen Deficiency in Plants. *Advances in Plant Nitrogen Metabolism*, 28–37.

Yamaya, T., & Kusano, M. (2014). Evidence supporting distinct functions of three cytosolic glutamine synthetases and two NADH-glutamate synthases in rice. *Journal of Experimental Botany*, 65(19), 5519–5525. <https://doi.org/10.1093/jxb/eru103>

Yang, Y., Xiong, J., Tao, L., Cao, Z., Tang, W., Zhang, J., Yu, X., Fu, G., Zhang, X., & Lu, Y. (2020). Regulatory mechanisms of nitrogen (N) on cadmium (Cd) uptake and accumulation in plants: A review. *Science of The Total Environment*, 708, 135186. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135186>

Yu, C., Lv, D. G., Qin, S. J., Yang, L., Ma, H. Y., & Liu, G. C. (2010). Changes in photosynthesis, fluorescence, and nitrogen metabolism of hawthorn (*Crataegus pinnatifida*) in response to exogenous glutamic acid. *Photosynthetica*, 48(3), 339–347. <https://doi.org/10.1007/s11099-010-0044-1>

Zaid, A., Gul, F., Ahanger, M. A., & Ahmad, P. (2018). Silicon-Mediated Alleviation of Stresses in Plants. *Em Plant Metabolites and Regulation Under Environmental Stress* (p. 377–387). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812689-9.00020-0>

Zhang, W., Zhang, Z., & Yan, S. (2015). Effects of various amino acids as organic nitrogen sources on the growth and biochemical composition of *Chlorella pyrenoidosa*. *Bioresource Technology*, 197, 458–464. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.08.100>

Zhang, X., Taniguchi, R., Nagao, R., Tomo, T., Noguchi, T., Ye, S., & Shibata, Y. (2023). Access to the Antenna System of Photosystem I via Single-Molecule Excitation-Emission Spectroscopy [Preprint]. In Review. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3002323/v1>

Zhang, Y., Zheng, J., Linyerera, S. M., Magwanga, R. O., Hou, Y., Wang, Y., Xu, Y., Khan, A., Yu, S., Zhou, Z., Liu, F., & Cai, X. (2024). Overexpression and knockdown of cotton GhdadD gene reveals its drought and salt stress tolerance role. *iScience*, 27(1), 108664. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.108664>

1 **CAPÍTULO 3 – Considerações Finais**

2 A pesquisa realizada demonstrou que a aplicação foliar de Glu e Si pode ser uma
3 ferramenta reduzir a desordem nutricional ocasionada por N, além de reduzir os efeitos
4 deletérios no aparato bioquímico e fisiológico na cultura do milho, aumentando sua
5 produtividade em condições de deficiência de N. Estes resultados oferecem uma base
6 promissora para o desenvolvimento de práticas agrícolas mais sustentáveis e eficientes com
7 implicações globais pois é comum no mundo solos com deficiência deste macronutriente.

8 Contudo, a continuidade dos estudos é essencial e futuras pesquisas devem incluir a
9 avaliação de longo prazo dos efeitos dos bioestimulantes, variações nas doses e métodos
10 de aplicação, e a influência de diferentes fatores ambientais. Além disso, é importante
11 expandir a pesquisa para outras culturas agrícolas e investigar as interações com outros
12 nutrientes contribuindo para a sustentabilidade e a eficiência da produção agrícola.