

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

**TRATAMENTO COM SILÍCIO EM PLANTAS DE SORGO
(*Sorghum bicolor*) EXPOSTAS A GLYPHOSATE**

Lesly Analay Yanes Simón

Engenheira Agrônoma

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

**TRATAMENTO COM SILÍCIO EM PLANTAS DE SORGO
(*Sorghum bicolor*) EXPOSTAS A GLYPHOSATE**

Lesly Analay Yanes Simón

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Bianco de Carvalho

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

S595t Simón, Lesly Analay Yanes
Tratamiento com sílicio em plantas de sorgo
(Sorghum bicolor) expostas a glyphosate / Lesly
Analay Yanes Simón. -- Jaboticabal, 2024
44 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual
Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e
Veterinárias, Jaboticabal
Orientador: Leonardo Bianco de Carvalho

1. Fenilalanina. 2. Teores de glyphosate e
AMPA. 3. Aminoácidos aromáticos. 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.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: TRATAMENTO COM SILÍCIO EM PLANTAS DE SORGO (*Sorghum bicolor*)
EXPOSTAS A GLYPHOSATE

AUTORA: LESLY ANALAY YANES SIMÓN

ORIENTADOR: LEONARDO BIANCO DE CARVALHO

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

Prof. Dr. LEONARDO BIANCO DE CARVALHO (Participação Virtual)
Departamento de Ciencias da Producao Agricola / FCAV UNESP Jaboticabal



Documento assinado digitalmente
LEONARDO BIANCO DE CARVALHO
Data: 28/02/2024 16:42:48-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. DILIER OLIVERA VICIEDO (Participação Virtual)
Universidad de OHiggins / Rancagua/OHiggins/Chile



Documento assinado digitalmente
DILIER OLIVERA VICIEDO
Data: 28/02/2024 17:23:55-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Pesquisadora Dra. YANNA KAROLINE SANTOS DA COSTA (Participação Virtual)
Associação Baiana dos Produtores de Algodão / Luís Eduardo Magalhães/BA



Documento assinado digitalmente
YANNA KAROLINE SANTOS DA COSTA
Data: 28/02/2024 18:26:04-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Jaboticabal, 28 de fevereiro de 2024

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

Lesly Analay Yanes Simón – Nasceu em Sancti Spíritus, Cuba, em 1º de abril de 1992. Estudou na Universidade "Jose Martí Perez" na província de Sancti Spíritus, Cuba, e se formou em 2015 como Engenheira Agrônoma. No período de 2016-2017, trabalhou no Ministério da Agricultura do município de Cabaiguán como técnica de solo. De 2017 a 2021, trabalhou como principal especialista de qualidade no Centro de Entomófagos e Entomopatógenos (CREE) localizado no município de Cabaiguán, província de Sancti Spíritus, onde trabalhou na busca pela qualidade de tricotoderma e tabaquina, além do trabalho manual na produção do referido tricotoderma. Em 2022, ingressou no curso de mestrado em Agronomia (Produção Vegetal) na Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Câmpus de Jaboticabal, da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP).

EPÍGRAFE

Há três coisas que cada pessoa deve fazer durante a vida: plantar uma árvore, ter um filho e escrever um livro.

José Martí

DEDICATORIA

Agradeço primeiramente à minha família pelo apoio que me deram em todos os momentos ao meu companheiro de vida Reidi Cabrera Diaz por todo amor, paciência e ajuda nas avaliações dos experimentos.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal – FCAV/UNESP e ao Programa de Pós-graduação em Agronomia – Produção Vegetal pela oportunidade da realização do curso de Mestrado, por toda infraestrutura e recursos recebidos.

Ao Prof. Dr. Leonardo Bianco de Carvalho pela orientação, pelos ensinamentos e contribuição no meu crescimento profissional e pessoal.

Aos colegas do Laboratório de Matologia (LabMATO), Maynumi, Nagilla, Karina, pela amizade e colaborações no desenvolvimento deste trabalho em todo momento.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos.

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

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. SORGO	3
2.2. SILÍCIO	4
2.3. GLYPHOSATE	5
3. MATERIAL E MÉTODOS	7
3.1. CONDIÇÕES DE CRESCIMENTO E MATERIAL VEGETAL	7
3.2. TRATAMENTO E DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	8
3.3. AVALIAÇÕES	9
3.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA	10
4. RESULTADOS	11
4.1. VARIÁVEIS FISIOLÓGICAS	11
4.2. VARIÁVEIS NUTRICIONAIS	15
4.3. VARIÁVEIS METÁBOLICAS	15
5. DISCUSSÃO	19
6. CONCLUSÃO	22
7. REFERÊNCIAS	22

TRATAMENTO COM SILÍCIO EM PLANTAS DE SORGO (*Sorghum bicolor*) EXPOSTAS A GLYPHOSATE

RESUMO – Quando o glyphosate é aplicado, parte de herbicida pode atingir a vegetação adjacente e afetar a estrutura e a diversidade vegetal vizinha pela deriva. O silício pode melhorar a nutrição das plantas em diferentes estresses bióticos e abióticos, melhorando a estrutura das plantas antes da reação de um estresse. Desta forma, o objetivo deste estudo foi investigar os efeitos horméticos do glyphosate e avaliar o papel do fornecimento foliar de silício na regulação da nutrição mineral das plantas de sorgo expostas a subdoses de glyphosate. O delineamento experimental foi em blocos inteiramente casualizados com oito tratamentos dispostos em esquema factorial 4x2 e cinco repetições. Quatro subdoses de herbicida glyphosate combinaram-se (0, 36,72 e 180 e.a. ha⁻¹), com ausência e presença de silício (3,0 mmol L⁻¹) aplicado via foliar. Os resultados mostraram que as subdoses de de glyphosate 36 e.a. ha⁻¹ e 72 e.a. ha⁻¹ causaram um efeito de hormese na altura e nutrição das plantas de sorgo, na 180 e.a. ha⁻¹ se obteve resultados desfavoráveis como redução nos teores de clorofila . O fornecimento foliar de silício neste caso promoveu efeito hormético do herbicida pela regulação da nutrição mineral e o crescimento do sorgo. Os resultados deste estudo indicam que subdoses de glyphosate regulam a nutrição e altura das plantas de sorgo e o silício é uma alternativa para melhorar os efeitos horméticos do herbicida nesta cultura. A aplicação do silício teve efeito no metabolismo em condições de estresse que podem ser específicas como aumento nos teores de fenilalanina , neste caso pela aplicação do glifosato, incentivando a realização de trabalhos futuros sobre a aplicação do silício e as respostas metabólicas das plantas.

PALAVRAS-CHAVE: Fisiologia vegetal, Nutrição mineral, N-(fosfonometil)glicina, Silício, *Sorghum bicolor*, Crescimento vegetal, Efeito hormético, Resposta ao estresse.

SILICON TREATMENT IN SORGHUM PLANTS (*Sorghum bicolor*) EXPOSED TO GLYPHOSATE

ABSTRACT – When glyphosate is applied, part of the herbicide can reach adjacent vegetation and affect neighboring plant structure and diversity through drift. Silicon can improve plant nutrition under different biotic and abiotic stresses, improving plant structure before a stress reaction. Thus, the objective of this study was to investigate the hormetic effects of glyphosate and evaluate the roles of foliar silicon supply in the regulation of mineral nutrition of sorghum plants exposed to subdoses of glyphosate. The experimental design was in completely randomized blocks with eight treatments arranged in a 4x2 factorial scheme and five replications. Four subdoses of glyphosate herbicide were combined (0, 36, 72 and 180 e.a. ha⁻¹) with the absence and presence of silicon (3.0 mmol L⁻¹) sprayed in foliar. The results showed that subdoses of glyphosate 36 e.a. ha⁻¹ and 72 e.a. ha⁻¹ caused a hormesis effect on the height and nutrition of sorghum plants, from the dose 180 a.e. ha⁻¹ unfavorable results were obtained. The foliar supply of silicon in this case improved the hormetic effects of the herbicide by regulating mineral nutrition and sorghum growth. The results of this study indicate that subdoses of glyphosate regulate plant nutrition and height of sorghum and silicon is an alternative to improve the hormetic effects of the herbicide in this crop. The application of silicon has an effect on metabolism in stress conditions that can be specific as an increase in phenylalanine theories, in this case for the application of glyphosate, encouraging future work on the application of silicon and the metabolic responses of plants.

KEYWORDS: Plant physiology, Mineral nutrition, N–(phosphosnomethyl)glycine, Silicon, *Sorghum bicolor*, Plant growth, Hormetic effect, Respond to stress.

1. INTRODUÇÃO

Sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench.) é um importante cereal cultivado em regiões áridas e semiáridas da África, Ásia, Oriente Médio, América e Austrália (KHODDAMI et al., 2023). O grão de sorgo é um alimento básico em partes da África, Ásia e outras regiões de baixa renda, mas a cultura também é utilizada como forragem para alimentação animal (PROIETTI et al., 2015). Com tolerância a vários estresses bióticos e abióticos e capacidade de crescer em ambientes com limitação de água (KRESOVICH et al. 2005), o sorgo torna-se, ainda, uma alternativa para cultivo de grãos para etanol e ração, particularmente em áreas geográficas suscetíveis a condições de solo seco (MACE et al., 2009).

A projeção da produção mundial de sorgo, na safra 2023/2024, é de 60,01 milhões de toneladas, com produção brasileira de 3,6 milhões de toneladas (USDA, 2024). No entanto, o cultivo de sorgo enfrenta desafios decorrentes do crescimento substancial de plantas daninhas (BAJWA et al. 2023), sendo a vegetação infestante um dos principais fatores que limitam o aumento da produtividade do sorgo (FREITAS et al., 2023; TKALICH et al., 2023). Para manejo das plantas daninhas, em geral, o uso de herbicidas tem sido o principal método de controle (FREITAS et al., 2023). Porém, alguns herbicidas podem afetar negativamente as culturas de interesse agrícola (WERLE et al., 2017; METLINA e VASILCHENKO, 2021), especialmente herbicidas não seletivos.

A aplicação de herbicidas não seletivos em pós-emergência, como o glyphosate, requer cuidados, a fim de evitar deriva, definida, segundo ANDEF (2010), como processo de transporte do produto aplicado para fora do alvo. Com isso, busca-se diminuir as perdas do produto e, especialmente, os riscos de intoxicação de culturas suscetíveis (CUNHA et al., 2003) relativos tanto da endoderiva (oriunda de aplicações em jato-dirigido na própria cultura) quanto da exoderiva (oriunda de aplicações em áreas adjacentes). No caso do sorgo, não há recomendação de aplicação de glyphosate em pós-emergência da cultura (MAPA, 2024), por isso o risco da exoderiva torna-se preocupante quando a cultura é semeada próximo a áreas em que se fará aplicação do glyphosate em área total (por exemplo, dessecação para plantio direto).

Estudos sobre efeitos da deriva de herbicidas sobre plantas cultivadas têm sido realizados por meio de experimentos de dose-resposta, aplicando-se subdoses

dos produtos para simular deriva (REIS et al., 2018; ANDRADE et al., 2022; NUNES et al., 2023; ZAMPIROLI et al., 2023). As subdoses utilizadas variam, mas consideram uma porcentagem das doses recomendadas para aplicação no campo que, em geral, representam até 50% da dose recomendada (CEDERLUND, 2017). No caso do glyphosate, a dose mínima recomendada corresponde a 720 gramas de equivalente ácido por hectare (MAPA, 2024).

Invariavelmente, glyphosate é aplicado em pós-emergência, podendo ser absorvido pelas folhas ou raízes (GAO et al., 2023). Pode ser degradado em ácido aminometilfosfórico (AMPA) por plantas ou microrganismos (VAN EERD et al., 2003, REDDY et al., 2004), um metabólito que ainda é fitotóxico (GOMES et al., 2014, GUILHERME et al., 2014). A fitotoxicidade do glyphosate está relacionada à inibição da atividade da enzima 5-enol piruvil chiquimato 3-fosfato sintase (EPSPS), que faz parte da via do chiquimato (YANNICCARI et al., 2012). A inibição da EPSPS pode acarretar acúmulo de ácido chiquímico, usado como marcador de plantas suscetíveis a glyphosate (ZULET-GONZÁLEZ et al., 2020). A via do chiquimato é responsável pela biossíntese de aminoácidos aromáticos essenciais (fenilalanina, triptofano e tirosina) (HERRMANN e WEAVER, 1999). Além da função na síntese proteica, esses aminoácidos são precursores de produtos que desempenham papéis cruciais em sinalização, crescimento e desenvolvimento de plantas, incluindo respostas a estresses bióticos e abióticos (ZEIER, 2013; HÄUSLER et al., 2014).

O silício é um elemento mineral de importância para diversas plantas cultivadas (TRIPTHI et al., 2020). A aplicação de silício apresenta muitos efeitos benéficos em gramíneas (MARSCHNER, 1995), melhorando o crescimento e a produtividade por aumentar a fotossíntese, a absorção de minerais e a capacidade contra restrições ambientais (MOUSSA et al., 2006; ALI et al., 2013; TRIPTHI et al., 2016; MOSTOFA et al., 2021). O silício também tem sido estudado como atenuador de estresses causados por herbicidas (TRIPTHI et al., 2020; JAIN et al., 2021; SOARES et al., 2021; BARBOSA, 2022). No entanto, o papel do silício na mitigação da toxicidade dos herbicidas ainda não está bem elucidado (TRIPTHI et al., 2020; SOARES et al., 2021), tampouco estão compreendidos os possíveis efeitos atenuadores da aplicação de silício em plantas expostas a herbicidas.

Neste trabalho, avaliou-se respostas fisiológicas, nutricionais e metabólicas de plantas de sorgo (*S. bicolor*) expostas à deriva simulada de glyphosate, testando o possível efeito atenuador do tratamento prévio com silício.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. SORGO

A moderna planta de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) é um produto da intervenção do homem, que domesticou a espécie e, ao longo de gerações, vem transformando-a para satisfazer as necessidades humanas. Sorgo é uma extraordinária fábrica de energia, de enorme utilidade em regiões muito quentes e muito secas, onde o homem não consegue boas produtividades de grãos ou de forragem cultivando outras espécies, como o milho (Embrapa versão eletrônica set. 2007). Relatos arqueológicos mostraram presença dessa planta há cerca de 5.000 anos no nordeste da África e há 8.000 anos no sudoeste na Ásia, mais precisamente no Egito (WENDORF et al., 1992; WINCHELL et al., 2018; SMITH et al., 2019).

O sorgo é uma cultura importante que garante a segurança alimentar na África Subsariana e em alguns países, regiões da Ásia e da América Latina (BELLMER et al. 2010, MOTLHAODI et al., 2018). Ao contrário de outras culturas cerealíferas (por exemplo, milho, trigo e cevada), o sorgo está adaptado a uma vasta gama climática e é cultivado em áreas marginais áridas e semiáridas (PATERSON et al. 2009). Assim, quatro grupos principais, incluindo sorgos granífero, sacarino, forrageiro e vassoura, estão em cultivo em todo o mundo e a utilização de diferentes tipos do sorgo varia consideravelmente em diferentes regiões (BATEY, 2017).

No Brasil, grande parte do sorgo produzido é destinado à alimentação animal. É um grão que apresenta antocianinas e outros compostos fenólicos, que aliado à tendência atual de consumo de dietas mais saudáveis ricas em pigmentos naturais com alta atividade antioxidante e alto teor de fibras, o sorgo torna-se uma alternativa promissora para a alimentação humana (CARVALHO et al., 2014). No país, o sorgo é pouco utilizado na alimentação humana, o que é produzido, é destinado principalmente à alimentação animal, mas este interesse pelo grão tem crescido, pois é um alimento com forte potencial nutracêutico e livre de glúten, tornando-o uma opção para a produção de alimentos destinados a celíacos (CARVALHO et al., 2014). Todo o território do Brasil, por estar a menos de 40° de latitude sul, possui condições excelentes para a cultura do sorgo, podendo, essa cultura ser de grande valia para regiões que são assoladas pelas secas, como o Nordeste e o Cerrado, pois o sorgo é uma planta que resiste muito bem às deficiências hídricas

(FORNAZIERI JUNIOR et al., 1999). A produção brasileira de sorgo granífero está concentrada principalmente no Rio Grande do Sul e em São Paulo. No Rio Grande do Sul é um produto com relativa tradição e substitui a soja no binômio soja-trigo, quando o agricultor faz rotação da cultura. Em São Paulo, a produção é incentivada principalmente por indústrias de rações, que adquirem o produto (GUILLERME et al., 1999). A cultura do sorgo granífero é totalmente mecanizável, podendo por isto mesmo ser realizada em grandes plantios. Atualmente o sorgo forrageiro já dispõe de certa tradição entre os agricultores e é bastante plantado, principalmente no sul de Minas Gerais e Vale do Paraíba (SP e RJ). Com o uso de híbridos de elevada qualidade e produtividade, o sorgo forrageiro pode transformar-se numa cultura de grande expressão para a produção animal devido ao elevado potencial de produção, boa adequação à mecanização, reconhecida qualificação como fonte de energia para arração animal; grande versatilidade (DAVI GUILHERME et al., 1999).

2.2. SILÍCIO

O silício (Si) é o segundo elemento mais abundante do planeta, estando presente em 27% da crosta terrestre, mas não é considerado elemento essencial para as plantas EPSTEIN (1999), o silício é um elemento benéfico que incrementa o crescimento da planta em condições de estresse sob alta temperatura, pois segundo MARSCHNER (1995). A aplicação de silício (Si) tem sido benéfica a diversas culturas, principalmente as consideradas acumuladoras de Si, como sorgo, arroz, cana-de-açúcar, cevada, milho e trigo (GUNES et al., 2007; HATTORI et al., 2005; LIMA et al., 2011). Silício tem-se destacado no controle de doenças de plantas (DATNOFF et al., 2007). Aumenta a resistência de várias espécies vegetais, na sua maioria monocotile-dônea, às pragas e às doenças (MARSCHNER, 1995; RODRIGUES et al., 2004). Pesquisas têm demonstrado que o fornecimento de Si via foliar, com o uso de pequenas quantidades do elemento, pode ser alternativa viável para seu fornecimento às plantas, suprimindo a necessidade e/ou estimulando a absorção de Si e outros nutrientes, culminando em efeitos benéficos às culturas (FIGUEIREDO et al., 2010). Vários trabalhos têm mostrado o efeito da aplicação foliar de silicato de potássio (SP) na redução da severidade de doenças em diversas culturas. Em soja, foi verificada redução da severidade da ferrugem-asiática, com a pulverização de silicato de potássio por via foliar (RODRIGUES et al., 2010). Na

literatura há trabalhos onde se utiliza ácido silícico, apesar de não ser a fonte mais utilizada, silicato de potássio que é muito solúvel em água é uma das fontes mais utilizadas. Para atender às necessidades de Si pelas plantas, existem várias fontes do elemento, como o silicato de potássio, silicato de sódio, ácido monossilícico, silicato de cálcio e silicato de magnésio (CURRIE e PERRY, 2007). No entanto, a fonte solúvel de Si mais utilizada na nutrição foliar é o silicato de potássio (K_2SiO_3).

São descritos benefícios no crescimento de algumas espécies, entre elas sorgo (*Sorghum bicolor* L.'Moench' Dekalb 540) e girassol (*Helianthus annuus* L. 'Double Sungold'), observados por Calero Hurtado et al. (2020). Em condições de estresse salino, o silício age na redução da concentração de Na^+ em raízes (LIANG et al, 1999), no aumento da absorção de K^+ e na redução do transporte de sódio para a parte aérea (LIANG et al., 2007) e aumenta a concentração foliar e radicular das enzimas do estresse oxidativo (ZHU et al., 2004; AL-AGHABARY et al., 2004; LIANG et al., 2006).

2.3. GLYPHOSATE

O glyphosate (N-fosfonometil)glicina) é uma ferramenta importante no controle de plantas daninhas na agricultura, especialmente em culturas como sorgo, soja, milho e algodão, que são altamente dependentes desse herbicida. O seu uso ajuda a garantir a produtividade das lavouras e a reduzir os custos de produção, já que o controle químico é mais eficiente e barato do que o controle mecânico (VILAR, 2023). O glyphosate é um herbicida sistêmico, aplicado em pós-emergência, e sua eficácia depende de processos como a retenção da molécula na superfície foliar, a penetração foliar, a translocação na planta até o sítio de ação e o bloqueio da enzima-alvo (EPSPs) (KIRKWOOD e MCKAY, 1994)

A absorção do glyphosate é um processo bifásico que envolve uma rápida penetração inicial através da cutícula, seguida por uma absorção simplástica lenta. A duração desse processo é dependente de vários fatores, como espécie e idade da planta, condições ambientais e concentração do herbicida na calda e do surfatante. Uma vez que o glyphosate penetra na planta através da cutícula e membrana plasmática dos tecidos fotossintetizantes, é necessário que ocorra a translocação simplástica, através de tecidos vasculares, para os sítios-alvo do herbicida (SATICHIVI et al., 2000). Na planta, o glyphosate atua inibindo a atividade da

enzima 5-enolpiruvilchiquimato-3-fosfato-sintase (EPSPS), levando, assim, ao acúmulo do ácido chiquímico (CRUZ et al., 2020). afetando negativamente a biossíntese dos aminoácidos aromáticos (fenilalanina, tirosina e triptofano) bem como de compostos secundários que são sintetizados através da via bloqueada pela ação do herbicida (GRAVENA et al., 2012; SOARES et al., 2020).

Duas rotas de degradação do glyphosate foram descritas no solo: uma relacionada à atividade enzimática da liase em ligantes CP que libera sarcosina e fosfato (HOVE-JENSEN et al. 2014, SUN et al. 2019); e outra que consiste em um processo de oxidação através de uma enzima glifosato redutase (GOX) que quebra a ligação C-N, formando o metabólito ácido aminometilfosfônico (AMPA), que é mais persistente que o próprio glyphosate. As bactérias oxidam ou hidrolisam até 98% do glifosato e apenas 9% do AMPA (DUKE 2011; PRIMOST et al. 2017; SUN et al. 2019; LA CECILIA e MAGGI, 2020). O AMPA é produzido principalmente a partir da metabolização do glyphosate por microrganismos do solo e saprófitos e pela segunda geração de plantas GE-HT, mas também por outras atividades humanas (VAN BRUGGEN et al., 2018; SVIRIDOV AV et al., 2015). Degradação de glyphosate também foi descrita em plantas como mecanismo de resistência ao herbicida (CARVALHO et al., 2012; TONG et al., 2017).

Outro aspecto importante é que o glyphosate, uma vez aplicado, bloqueia a via do ácido chiquímico, rota de biossíntese de compostos fundamentais para o desenvolvimento vegetal, constituindo uma parte do metabolismo somente de plantas e microorganismos, não sendo encontrada em animais (HERRMANN e WEAVER, 1999). Em plantas, acredita-se que tal rota está confinada nos plastídeos (HERRMANN, 1995; SCHMID e AMRHEIN, 1995; MUSTAFA e VERPOORTE, 2005; WEBER et al., 2005). A disrupção da biossíntese dos aminoácidos aromáticos de plantas é uma estratégia atrativa para o desenvolvimento de herbicida com características ambientais favoráveis. Isto porque, apesar da rota do chiquimato estar presente em plantas e em muitos microrganismos, ela é completamente ausente em mamíferos, peixes, pássaros, répteis e insetos. Estas formas de vida não dependem da rota do chiquimato porque retiram da dieta os produtos aromáticos que necessitam. Já as plantas são obrigadas a produzir estes aminoácidos para sobreviver e se multiplicar (GRUYS e SIKORSKI, 1999).

A área plantada da cultura do sorgo no país vem se expandindo, seja para produção de grãos ou para silagem, e esta cultura pode ser alvo da deriva de

herbicidas provenientes de aplicações vizinhas. Mesmo nas aplicações consideradas tecnicamente corretas, há grande quantidade de gotas pequenas que, potencialmente, podem atingir culturas sensíveis e causar diversos efeitos. A presença de gotas pequenas é a maior fonte de contaminação ambiental em prática de pulverização de herbicidas (DURIGAN, 1988). Há muitos questionamentos sobre como e quanto a deriva de herbicidas pode afetar a cultura do sorgo, porém existe pequena disponibilidade de dados, na literatura, acerca da quantificação de possíveis perdas em rendimento de grãos.

A deriva do glyphosate em baixas doses (2 a 4% da recomendada) não afeta o rendimento de grãos, no entanto, derivas de glyphosate a partir de 8% podem influir no desenvolvimento das plantas, causando necroses e comprometendo a produtividade de grãos (MAGALHÃES et al., 2001). Dentre os fatores que afetam a deriva, podem ser mencionados: características do herbicida, tipo de equipamento, calibração, tipo de pontas de pulverização, técnicas de aplicação, condições meteorológicas e habilidade do operador (COSTA et al., 2007; CUNHA et al. 2003). Estudos demonstram que em pulverizações com ventos de 2 m s^{-1} , a deriva pode atingir até 160 m além do local considerado alvo (SCHRODER et al., 2000).

Atualmente estão disponíveis no mercado diversas formulações de glyphosate, porém todas apresentam o mesmo mecanismo de ação, independentemente dos sais utilizados (destacando-se sal de isopropilamina, sal de +

amônio e sal potássico (RODRIGUES & ALMEIDA, 2005). Diferentes formulações podem alterar a absorção e a translocação do herbicida, influenciando a eficiência de controle (SILVA et al., 2006) e seu comportamento no ambiente (MALKONES, 2000; SANTOS et al., 2005, 2006). O glyphosate é encontrado em várias formulações sob a forma de um sal, mais precisamente pode formar cinco sais (sal de sódio, de amônio, de isopropilamina, de potássio e de trimetilsulfóxido).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. CONDIÇÕES DE CRESCIMENTO E MATERIAL VEGETAL

O experimento foi conduzido de novembro a janeiro de 2023, em casa de vegetação localizada a 21°14'47.4"S e 48°18'06.2"WGr, em Jaboticabal, SP.

Foram utilizados vasos de polietileno com capacidade de 6 dm³, preenchidos com 5 dm³ de substrato oriundo de Argissolo Vermelho distrófico, com as seguintes características físico-químicas: 59% de argila, 18% de silte e 23% de areia, 5,6 de pH(CaCl₂); 17 g dm⁻³ de matéria orgânica; 34 mg dm⁻³ de P; 7 mg dm⁻³ de S; 23 mmol_c dm⁻³ de Ca; 12 mmol_c dm⁻³ de Mg; 3,6 mmol_c dm⁻³ de K; 0 mmol_c dm⁻³ de Al; 20 mmol_c dm⁻³ de H+Al; 38,3 mmol_c dm⁻³ de soma de bases; 58,1 de capacidade de troca de cátions; V de 66%; e 6,1 mg dm⁻³ de Si. Por ocasião da semeadura, foram aplicados 3 g da formulação 8-28-16 para fornecimento de nitrogênio, fósforo e potássio como adubação de plantio.

A cultura do sorgo (*S. bicolor*), cultivar FS57PWV, foi semeada na densidade de cinco sementes por vaso. Dez dias após a emergência (DAE), procedeu-se o desbaste, mantendo a população de três plantas por vaso. Realizou-se irrigação diariamente para manutenção do status hídrico de cada vaso em 70% da capacidade de retenção de água do solo, utilizando água deionizada.

3.2. TRATAMENTOS E DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Os tratamentos experimentais foram dispostos em dois fatores: tratamento prévio com silício (fator 1) e posterior exposição a glyphosate (fator 2). O fator 1 apresentou dois níveis, consistindo no tratamento prévio à base de silício (com ou sem tratamento), enquanto o fator 2 apresentou quatro níveis, consistindo na exposição a subdoses de glyphosate (sem exposição ou com exposição a três subdoses do herbicida). Portanto, utilizou-se do esquema fatorial 2x4, com os tratamentos em delineamento inteiramente casualizado, e cinco repetições.

O tratamento com silício foi realizado por meio de aplicações foliares de uma solução de silicato de potássio (K₂SiO₃, 128 g L⁻¹ de Si e 126,5 g L⁻¹ de K₂O) em uma concentração de 3 mmol L⁻¹ de Si, adaptado da metodologia utilizada por Barbosa (2022). A solução de silício foi preparada no momento da aplicação. A solução foi estabilizada com sorbitol (90% de silicato de potássio e 10% de sorbitol) e o pH ajustado para 6,8±0,1 com ácido clorídrico (HCl) a 1 N. Nas plantas não tratadas com silício, foi feito o balanceamento de potássio com a aplicação de uma solução de cloreto de potássio (KCl) para equilíbrio iônico.

As aplicações de silício foram realizadas com borrifador manual, empregando-se um volume de aproximadamente 50 mL da solução por vaso (baseado em BARBOSA, 2022). O tratamento iniciou-se aos 15 DAE, sendo complementado com mais quatro aplicações semanais de silício anteriores à exposição ao glyphosate. Previamente às aplicações de silício, a superfície dos vasos foi coberta com papel alumínio para que não houvesse deposição do silício no solo e o piso da casa de vegetação foi molhado para obtenção de umidade relativa superior a 70%. As aplicações ocorreram no final da tarde, com temperatura média de 27 °C.

O herbicida glyphosate (formulação comercial Roundup WG®, sal de amônio de *N*-(phosphonomethyl)glycine, 720 g kg⁻¹ de equivalente ácido – g ha⁻¹), foi aplicado aos 40 DAE (correspondendo a 19 dias após o encerramento do tratamento com silício – DATS), utilizando quatro doses (36, 72 e 180 g ha⁻¹, além de 0 g ha⁻¹ – considerada ausência do herbicida), simulando deriva de 5%, 10% e 25% da dose mínima recomendada (720 g ha⁻¹) (baseado em CERVEIRA JÚNIOR et al., 2020).

A aplicação de glyphosate foi realizada com pulverizador costal pressurizado a CO₂, equipado com pontas Teejet XR110.02, pressão de 2,0 bar e calibrado para vazão de 200 L ha⁻¹. As caldas herbicidas foram preparadas e imediatamente aplicadas diretamente sobre as plantas, a uma altura de 50 cm do dossel. As plantas foram retiradas da casa de vegetação, e a aplicação ocorreu no início da manhã, a céu aberto com temperatura de 20 °C, umidade relativa do ar de 74%, com poucas nuvens e vento mínimo (<3 km h⁻¹). Uma hora após a aplicação, as plantas foram novamente alocadas dentro da casa-de-vegetação.

3.3. AVALIAÇÕES

Altura de plantas (cm), diâmetro do caule (mm), número de folhas (unidades) e teor relativo de clorofila (SPAD) foram avaliados aos 49 e 68 DAE (correspondendo a 28 e 47 DATS). A massa seca da parte aérea (g planta⁻¹) e os teores foliares de macronutrientes – N, P, K, Ca, Mg e S (g kg⁻¹), micronutrientes – B, Cu, Fe, Mn e Zn (mg kg⁻¹), silício – Si (mg kg⁻¹), glyphosate, AMPA (ng g⁻¹ de massa seca), ácido chiquímico, fenilalanina, tirosina e triptofano (μg g⁻¹ de massa seca) foram determinados aos 68 DAE (47 DATS).

A altura da planta foi determinada com auxílio de régua graduada em milímetros, da base do caule até a inserção da última folha. O diâmetro do caule foi

determinado com auxílio de paquímetro digital, a três centímetros do solo. A contagem direta das folhas verdes não senescentes foi realizada para determinação do número de folhas. O teor relativo de clorofila foi determinado com auxílio de clorofilômetro portátil (Opti-Science – OS30P), entre as 9:00 e 10:00 h do amanhã).

Após concluídas as avaliações das variáveis anteriores, a parte aérea das plantas foi coletada, separada em caules e folhas, e lavada na seguinte sequência: água destilada, solução de detergente neutro (0,2%), solução de HCl (0,1%) e jogadas duas vezes com água deionizada para retirar os restos de partículas e outros contaminantes (PRADO, 2021). Após lavagem, a parte aérea foi armazenada em sacos de papel e secadas em estufa com circulação forçada de ar a 60 °C até massa constante. O material seco foi pesado em balança de precisão (0,001 g) para determinação da massa seca.

O material seco das folhas foi moído em micro-moinho tipo Wiley (Marconi, TE-840, Brasil), com peneira malha 20 micrometros. Parte do material moído (~1 g) foi enviado a laboratório particular certificado para extração e quantificação dos elementos minerais, utilizando: digestão sulfúrica e titulometria (N); digestão nítrico-perclórica e espectrofotometria (P e S); digestão nítrico-perclórica e espectrometria de absorção atômica (K, Ca, Mg, Fe, Cu, Mn e Zn); e incineração e espectrofotometria (B e Si). Outra parte do material moído (~0,5 g) foi enviado a laboratório de pesquisa na Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP, Câmpus de Botucatu, para extração e quantificação de glyphosate, AMPA, ácido chiquímico, fenilalanina, tirosina e triptofano, utilizando método adaptado de Gomes et al. (2015), por meio de cromatografia líquida de alta performance e espectrometria de massa, utilizando um sistema de cromatógrafo (HPLC, Shimadzu, Kyoto, Japão) acoplado a espectrômetro de massa triplo quadrupolo (LS-MS/MS AB Sciex API 4500, Applied Biosystems, Foster City, CA, EUA).

3.4. ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados foram previamente submetidos aos testes de Shapiro-Wilk, para testar a normalidade dos resíduos, e de Bartlett, para testar a homogeneidade das variâncias. Quando ambos os testes não foram significativos, ou seja, com a distribuição normal dos resíduos e a homogeneidade das variâncias, procedeu-se com a análise paramétrica dos dados, utilizando-se do teste de Tukey HSD para

comparação múltipla entre os tratamentos. Quando não observada a distribuição normal dos resíduos e/ou a homogeneidade das variâncias, procedeu-se com a análise não paramétrica dos dados, utilizando-se do teste de Kruskal-Wallis para comparação múltipla entre os tratamentos. Para a aplicação dos testes estatísticos, utilizou-se o programa estatístico Statística® (Statsoft Inc., versão 8.0, EUA), considerando o nível de 5% de probabilidade de erro.

4. RESULTADOS

O resultado das análises estatísticas preliminares permitiu verificar normalidade de distribuição dos resíduos ($P_{\text{Shapiro-Wilk}} > 0,05$) e homogeneidade das variâncias ($P_{\text{Bartlett}} > 0,05$) para as variáveis altura de plantas, diâmetro do caule, teor de clorofila e massa seca (49 e 68 DAE) e teor de ácido chiquímico (68 DAE), com coeficiente de variação entre 4,8 e 28,2% (Tabela 1). Para essas variáveis, procedeu-se com análise paramétrica a fim de verificar diferenças entre os tratamentos, utilizando o teste de comparação múltipla Tukey HSD, a 5% de probabilidade. Por outro lado, não se verificou normalidade de distribuição dos resíduos ($P_{\text{Shapiro-Wilk}} < 0,05$) e/ou homogeneidade das variâncias ($P_{\text{Bartlett}} < 0,05$) para as variáveis número de folhas (49 e 68 DAE) e teores foliares de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S), micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn e Zn), silício, glyphosate e aminoácidos aromáticos (fenilalanina, tirosina e triptofano) (68 DAE), com coeficiente de variação entre 6,7 e 47,8% (Tabela 1). Para essas variáveis, procedeu-se com análise estatística não paramétrica a fim de verificar diferenças entre os tratamentos, utilizando o teste de comparação múltipla Kruskal-Wallis, a 5% de probabilidade.

4.1. VARIÁVEIS FISIOLÓGICAS

Altura da planta. Na avaliação aos 49 DAE (28 DATS), plantas tratadas com silício e expostas a 36, 72 e 180 g ha⁻¹ de glyphosate apresentaram maior altura (30,3 cm, 30,0 cm e 30,7 cm, respectivamente) que plantas não tratadas com silício e sem exposição ao herbicida (25,3 cm) (Figura 1-A). Na avaliação aos 68 DAE (47 DATS), plantas tratadas com silício e expostas a 72 g ha⁻¹ de glyphosate apresentaram maior altura (49,3 cm) que plantas tratadas com silício e sem exposição ao herbicida

(39,3 cm) e que as plantas não tratadas com silício e expostas a 180 g ha⁻¹ de glyphosate (40,5 cm) (Figura 1-B).

Tabela 1. Resumo dos resultados das análises estatísticas aplicadas sobre os dados de altura de plantas (ALT), diâmetro do caule (DIAM), número de folhas (FOL), teor relativo de clorofila (SPAD) e massa seca (MS), aos 49 (_1) e 68 (_2) dias após a emergência, e os dados de teor de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S), micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn e Zn), silício (Si), glyphosate, ácido aminometilfosfônico (AMPA), ácido chiquímico e aminoácidos aromáticos (fenilalanina, tirosina e triptofano) em tecidos foliares, aos 68 dias após a emergência das plantas de *Sorghum bicolor* submetidas ou não a tratamento foliar com silício (3,0 mmol L⁻¹) e posterior exposição ou não a glyphosate (0, 36, 72 e 180 g ha⁻¹ de equivalente ácido).

Variável	CV (%)	Testes Preliminares		Testes Post-Hoc	
		P _{Shapiro-Wilk}	P _{Bartlett}	P _{Tukey-HSD}	P _{Kruskal-Wallis}
ALT_1	7,7	0,124	0,438	0,034	-
ALT_2	5,8	0,513	0,214	0,049	-
DIAM_1	5,6	0,052	0,496	0,063	-
DIAM_2	4,9	0,671	0,221	0,082	-
FOL_1	6,7	<0,001	<0,001	-	0,056
FOL_2	7,1	<0,001	<0,001	-	0,118
SPAD_1	7,3	0,301	0,147	<0,001	-
SPAD_2	9,5	0,062	0,059	0,043	-
MS_2	4,8	0,125	0,273	<0,001	-
N	11,1	0,764	<0,001	-	0,056
P	10,8	0,230	<0,001	-	0,152
K	8,3	0,524	<0,001	-	0,138
Ca	6,0	0,428	<0,001	-	0,005
Mg	7,5	0,295	<0,001	-	0,027
S	10,3	0,767	<0,001	-	0,081
B	11,1	0,328	<0,001	-	0,035
Cu	10,2	0,955	<0,001	-	0,335
Fe	22,3	0,030	<0,001	-	0,756
Mn	15,6	0,004	<0,001	-	0,042
Zn	11,1	0,605	<0,001	-	0,259
Si	6,6	0,648	<0,001	-	0,007
Glyphosate	47,8	<0,001	<0,001	-	<0,001
AMPA ^{/1}	-	-	-	-	-
Ácido chiquímico	28,2	0,058	0,232	0,029	-
Fenilalanina	36,3	0,004	0,010	-	0,031
Tirosina	37,4	0,006	0,168	-	0,035
Triptofano	28,5	0,012	0,128	-	0,546

^{/1} AMPA não foi detectado.

Diâmetro do caule. Na avaliação aos 49 DAE (28 DATS), o diâmetro do caule variou de 8,8 a 9,9 mm (Figura 1-C), enquanto na avaliação aos 68 DAE (47 DATS)

o diâmetro do caule variou de 8,8 a 10,1 mm (Figura 1-D), não havendo diferença significativa entre os tratamentos testados (Tabela 1).

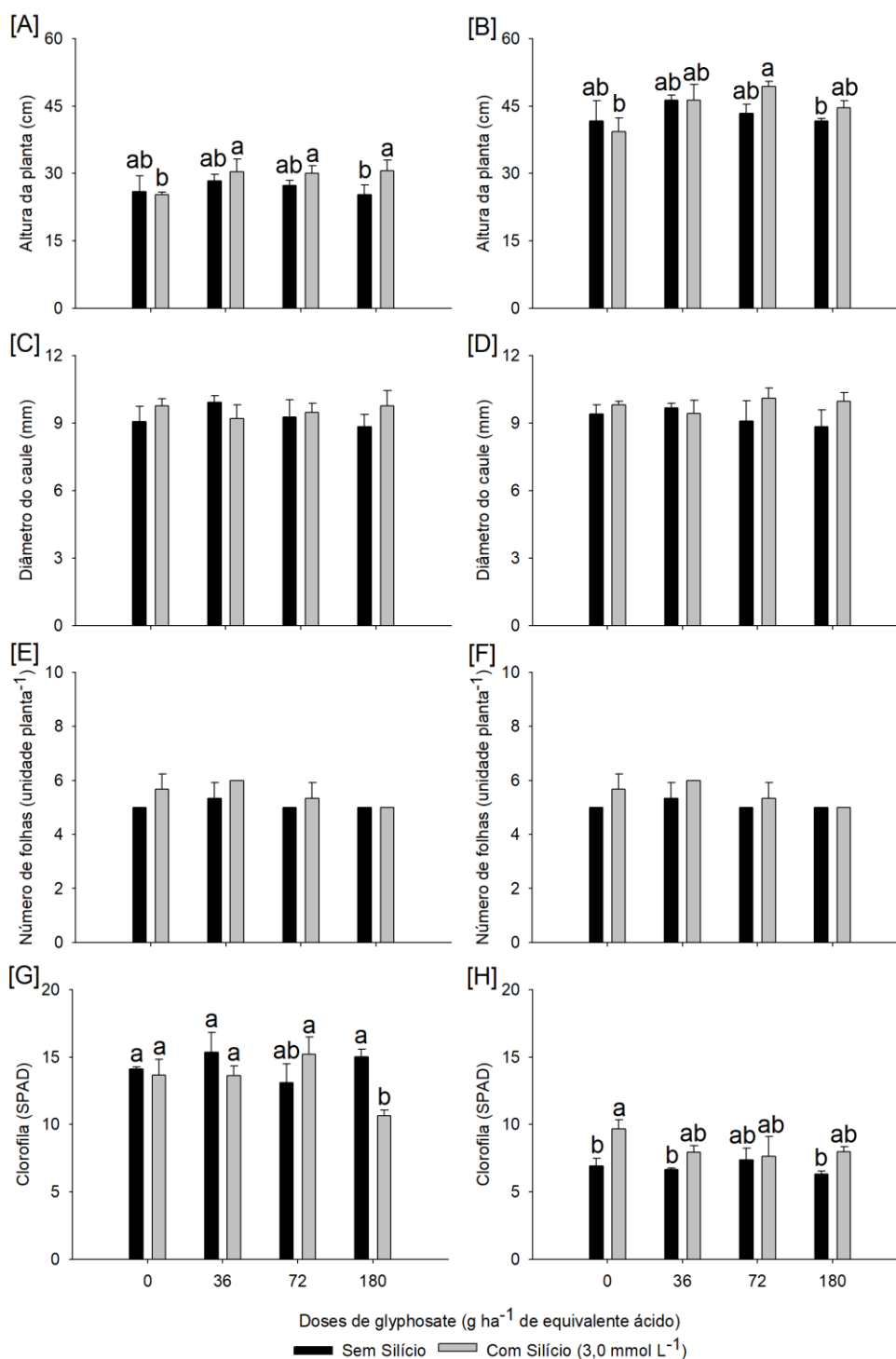


Figura 1. Altura da planta (A-B), diâmetro do caule (C-D), número de folhas (E-F) e teor relativo de clorofila (G-H) de plantas de *Sorghum bicolor* submetidas ou não a tratamento foliar com silício e posterior exposição ou não a subdoses de glyphosate, aos 49 (A, C, E e G) e 68 (B, D, F e H) dias após a emergência. Linhas verticais representam o desvio padrão da média. Letras minúsculas distintas representam diferenças significativas pelo teste de Tukey HSD (P<0,05).

Número de folhas. Na avaliação aos 49 DAE (28 DATS), o número de folhas variou de 5 a 6 unidades (Figura 1-E), enquanto na avaliação aos 68 DAE (47 DATS) o número de folhas variou de 6 a 8 unidades (Figura 1-F), não havendo diferença significativa entre os tratamentos testados (Tabela 1).

Teor de clorofila. Na avaliação aos 49 DAE (28 DATS), plantas não tratadas com silício e expostas a 36 e 180 g ha⁻¹ de glyphosate, assim como plantas tratadas com silício e expostas a 36 e 72 g ha⁻¹ de glyphosate e plantas não expostas ao herbicida, com ou sem tratamento foliar com silício, apresentaram maior teor de clorofila (15,4 e 15,0 SPAD; 13,6 e 15,2 SPAD; 14,1 e 13,7 SPAD, respectivamente) que plantas tratadas com silício e expostas a 180 g ha⁻¹ de glyphosate (10,7 SPAD) (Figura 1-G). Na avaliação aos 68 DAE (47 DATS), plantas tratadas com silício e sem exposição ao herbicida apresentaram maior teor de clorofila (9,7 SPAD) que plantas não tratadas com silício e sem exposição (6,9 SPAD) ou com exposição a 36 e 180 g ha⁻¹ de glyphosate (6,7 SPAD e 6,3 SPAD, respectivamente) (Figura 1-H).

Massa seca. Na avaliação aos 68 DAE (47 DATS), plantas tratadas com silício e expostas a 72 g ha⁻¹ de glyphosate apresentaram maior acúmulo de massa seca (12,9 g planta⁻¹) que plantas não tratadas com silício e sem exposição ao glyphosate (10,1 g planta⁻¹) ou com exposição a 72 e 180 g ha⁻¹ do herbicida (10,1 e 9,8 g planta⁻¹, respectivamente) (Figura 2).

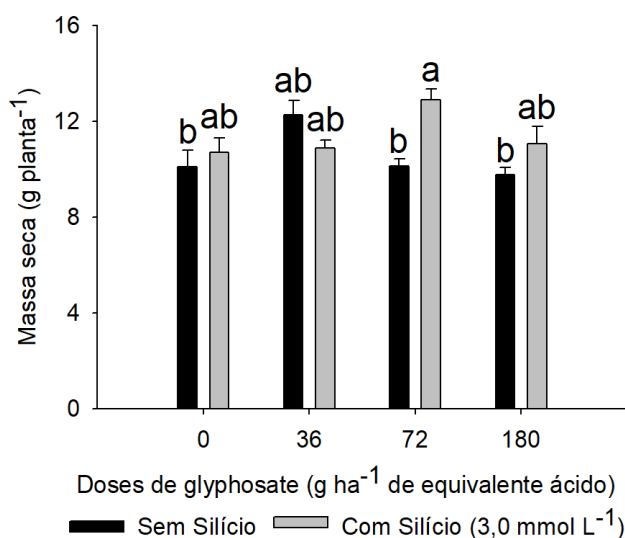


Figura 2. Massa seca de plantas de *Sorghum bicolor* submetidas ou não a tratamento foliar com silício e posterior exposição ou não a subdoses de glyphosate, aos 68 dias após a emergência. Linhas verticais representam o desvio padrão da média. Letras minúsculas distintas representam diferenças significativas pelo teste de Tukey HSD ($P < 0,05$).

4.2. VARIÁVEIS NUTRICIONAIS

Teores de macronutrientes. Na avaliação aos 68 DAE (47 DATS), os teores de N, P, K e S variaram, respectivamente, de 6,0 a 8,2 g kg⁻¹ (Figura 3-A), 1,9 a 2,3 g kg⁻¹ (Figura 3-B), 19,8 a 24,2 g kg⁻¹ (Figura 3-C) e 0,6 a 0,8 g kg⁻¹ (Figura 3-F), não havendo diferença significativa entre os tratamentos testados (Tabela 1). Por outro lado, plantas expostas a 72 e 180 g ha⁻¹ de glyphosate previamente tratadas com silício apresentaram menor teor de cálcio (2,1 e 2,0 g kg⁻¹, respectivamente) que plantas não expostas ao herbicida sem prévio tratamento com silício (3,2 g kg⁻¹) (Figura 3-D); e plantas expostas a 180 g ha⁻¹ de glyphosate previamente tratadas com silício apresentaram menor teor de magnésio (1,3 g kg⁻¹) que plantas expostas à mesma dose sem prévio tratamento com silício (1,8 g kg⁻¹) (Figura 3-E).

Teores de micronutrientes. Na avaliação aos 68 DAE (47 DATS), os teores de Cu, Fe e Zn variaram, respectivamente, de 2,5 a 3,0 mg kg⁻¹ (Figura 4-B), 67,7 a 83,0 mg kg⁻¹ (Figura 4-C) e 14,1 a 17,5 mg kg⁻¹ (Figura 4-E), não havendo diferença entre os tratamentos testados (Tabela 1). Por outro lado, plantas tratadas com silício apresentaram maior teor de boro (9,3 mg kg⁻¹) que plantas não tratadas com silício (6,8 mg kg⁻¹) quando expostas a 72 g ha⁻¹ de glyphosate (Figura 4-A). Plantas tratadas com silício, expostas ou não ao glyphosate, apresentaram menor teor de manganês (35,8 e 33,3 mg kg⁻¹; 35,3 e 36,5 mg kg⁻¹, respectivamente) que plantas não tratadas com silício e sem exposição ao herbicida (51,9 mg kg⁻¹) (Figura 4-D).

Teor de silício. Plantas tratadas com silício e expostas a 72 g ha⁻¹ de glyphosate apresentaram maior teor de silício (555,2 mg kg⁻¹) que plantas não tratadas com silício, com (404,1 mg kg⁻¹) ou sem (391,3 mg kg⁻¹) exposição à mesma dose do herbicida (Figura 4-F).

4.3. VARIÁVEIS METABÓLICAS

Teores de glyphosate e AMPA. Na avaliação aos 68 DAE (47 DATS), glyphosate foi detectado em plantas expostas ao herbicida, tratadas ou não com silício (Figura 5-A). Os teores de glyphosate variaram de 11,0 a 53,3 ng g⁻¹, sendo maiores em plantas expostas a 72 e 180 g ha⁻¹ (média aproximada de 41,6 e 52,6 ng g⁻¹, respectivamente) que em plantas expostas a 36 g ha⁻¹ (média aproximada de 13,2 ng g⁻¹) do herbicida, independentemente do tratamento com silício. AMPA não foi detectado (Figura 5-C).

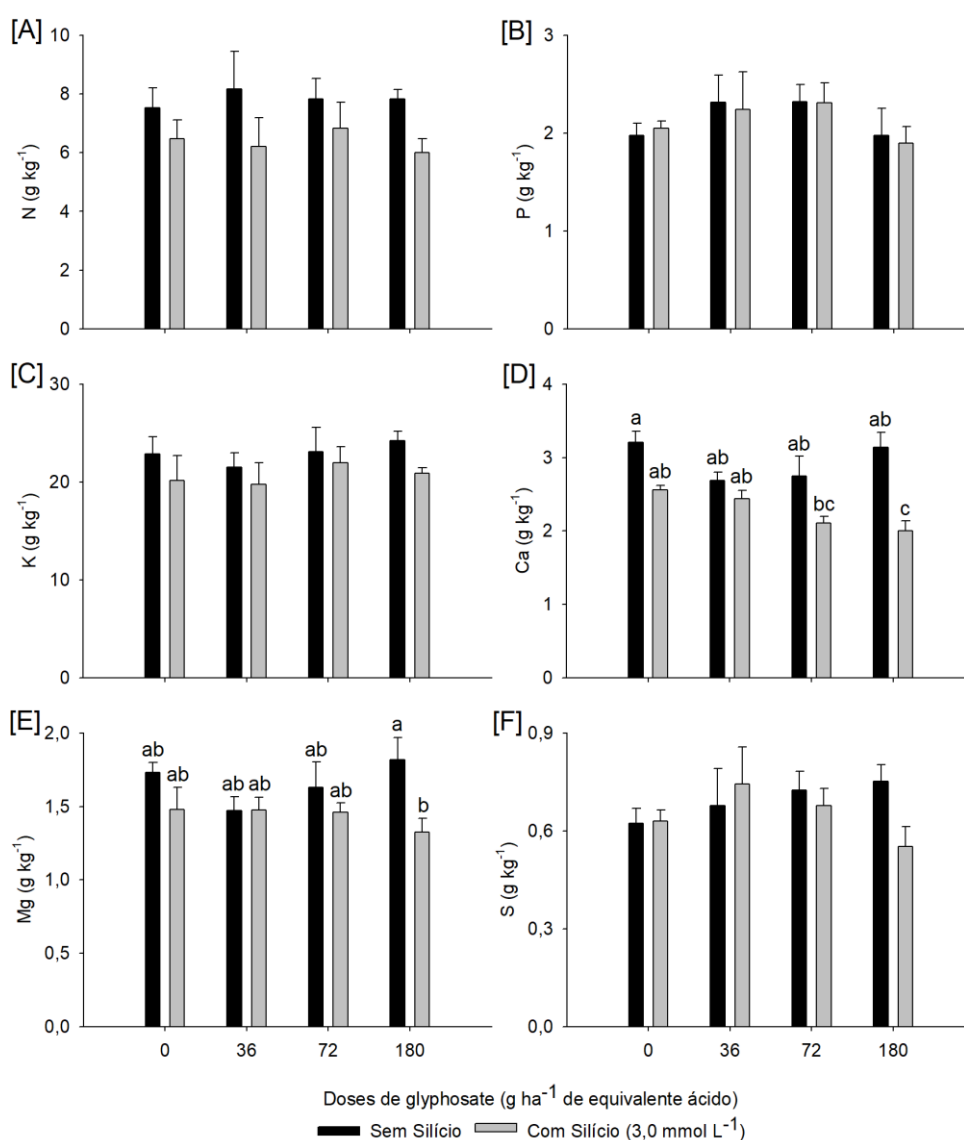


Figura 3. Teor de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S, respectivamente A-F) em tecidos foliares de plantas de *Sorghum bicolor* submetidas ou não a tratamento foliar com silício e posterior exposição ou não a subdoses de glyphosate, aos 68 dias após a emergência. Linhas verticais representam o desvio padrão da média. Letras minúsculas distintas representam diferenças significativas pelo teste de Kruskal-Wallis ($P < 0,05$).

Teor de ácido chiquímico. Na avaliação aos 68 DAE (47 DATS), plantas expostas a 180 g ha⁻¹ de glyphosate apresentaram maiores teores de ácido chiquímico que plantas não expostas ao herbicida, independentemente do tratamento com silício (Figura 5-E), com média aproximada de 22,1 e 12,4 µg g⁻¹, respectivamente.

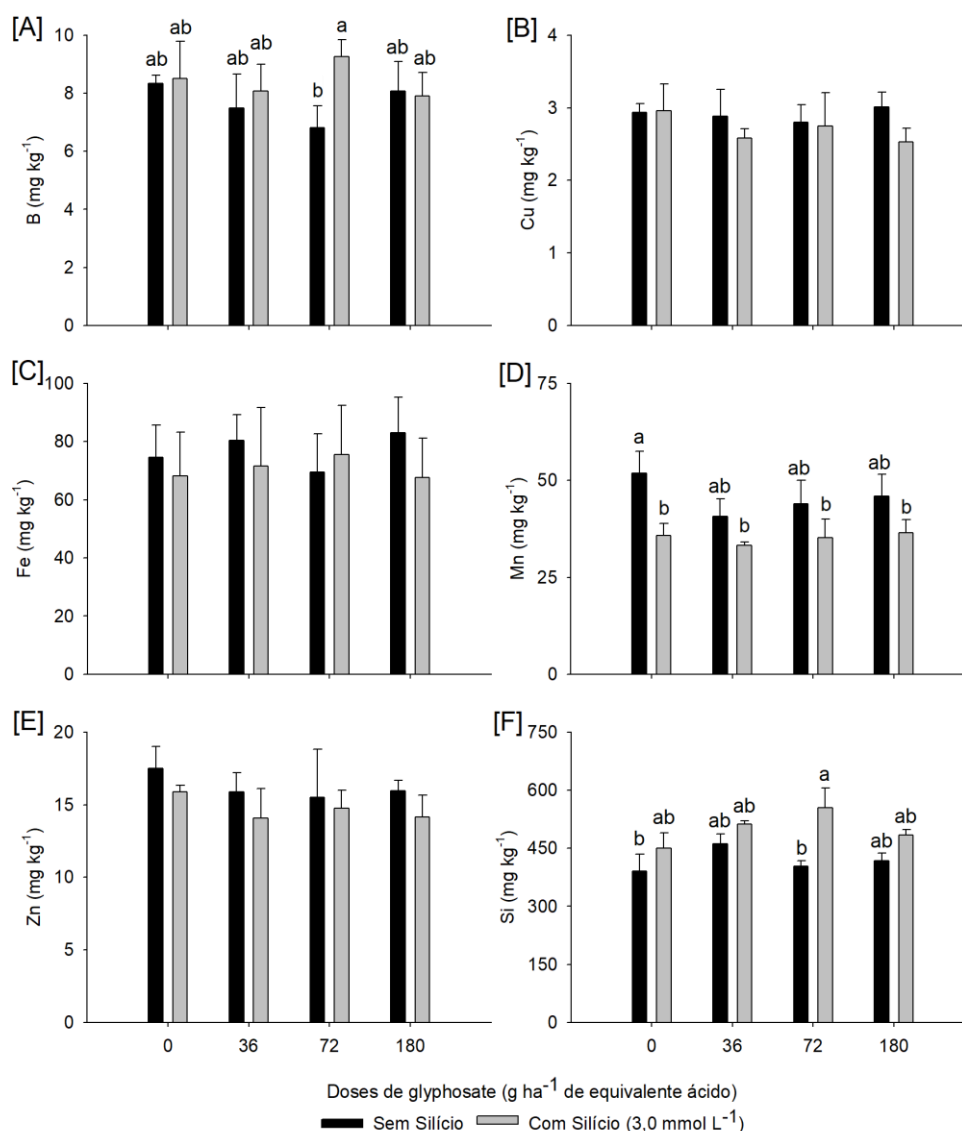


Figura 4. Teor de micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn e Zn, respectivamente A-E) e de silício (F) em tecidos foliares de plantas de *Sorghum bicolor* submetidas ou não a tratamento com silício e posterior exposição ou não a subdoses de glyphosate, aos 68 dias após a emergência. Linhas verticais representam o desvio padrão da média. Letras minúsculas distintas representam diferenças significativas pelo teste de Kruskal-Wallis ($P < 0,05$).

Teores de aminoácidos aromáticos. Na avaliação aos 68 DAE (47 DATS), o teor de triptofano variou de 69,0 a 106,6 µg g⁻¹ (Figura 5-F), não havendo diferença significativa entre os tratamentos testados (Tabela 1). Por outro lado, plantas expostas a 36 e 180 g ha⁻¹ de glyphosate, independentemente do tratamento com

silício, e plantas tratadas com silício e expostas a 72 g ha⁻¹ do herbicida apresentaram maiores teores de fenilalanina (215,1 e 165,0 µg g⁻¹; 165,2 e 145,2 µg g⁻¹; e 127,2 µg g⁻¹, respectivamente) que plantas expostas a 72 g ha⁻¹ de glyphosate sem tratamento prévio com silício (97,9 µg g⁻¹) e plantas não expostas ao herbicida, tratadas ou não com silício (94,4 e 67,8 µg g⁻¹, respectivamente) (Figura 5-B). Além disso, plantas não tratadas com silício e expostas a 36 e 180 g ha⁻¹ de glyphosate apresentaram maiores teores de tirosina (158,7 e 152,8 µg g⁻¹, respectivamente) que plantas tratadas com silício e expostas a 36 g ha⁻¹ de glyphosate (88,8 µg g⁻¹) e, independentemente do tratamento com silício, quando não expostas (72,3 e 74,9 µg g⁻¹, respectivamente) ou expostas a 72 g ha⁻¹ de glyphosate (88,4 e 97,1 µg g⁻¹, respectivamente) (Figura 5-D).

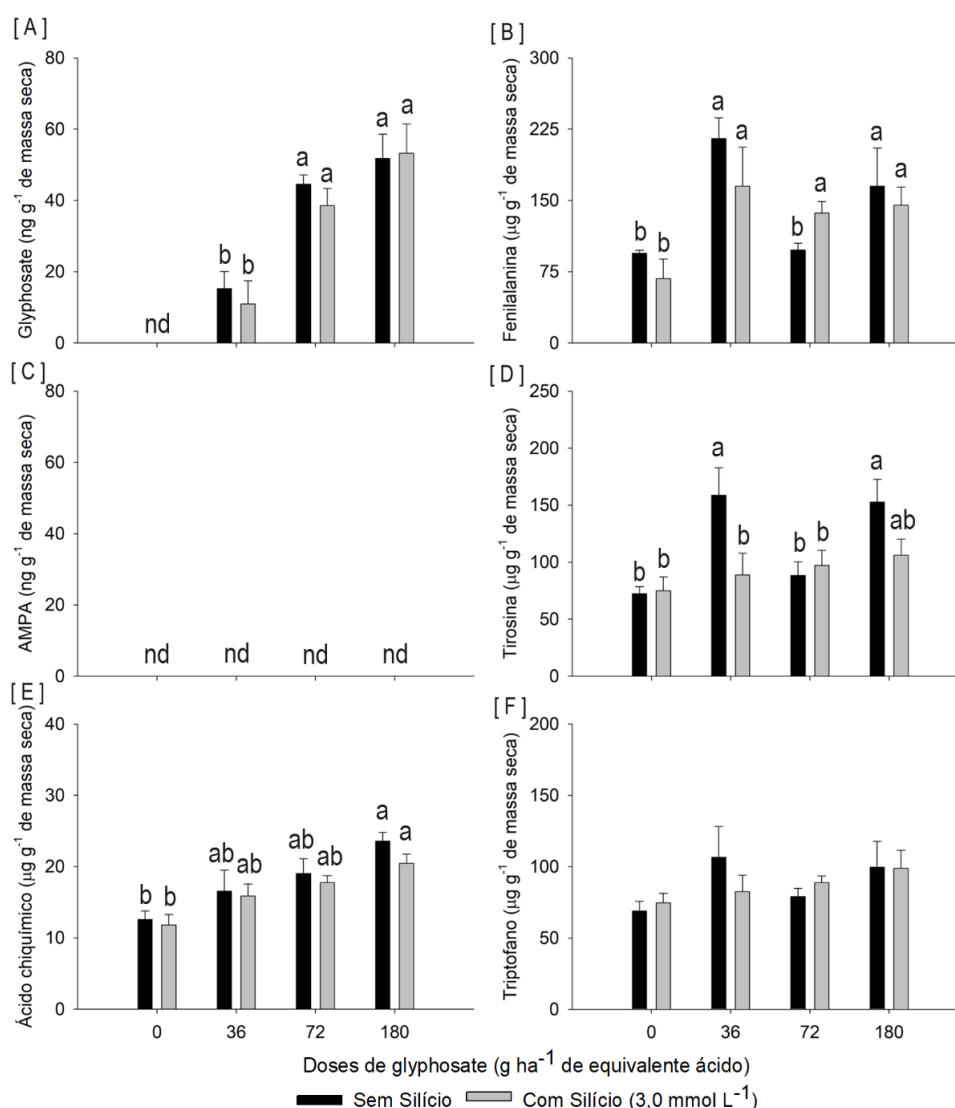


Figura 5. Teor de glyphosate, ácido aminometilfosfônico, ácido chiquímico e aminoácidos aromáticos (fenilalanina, tirosina e triptofano) em tecidos foliares de plantas de *Sorghum*

bicolor submetidas ou não a tratamento foliar com silício e posterior exposição ou não a subdoses de glyphosate, aos 68 dias após a emergência. Linhas verticais representam o desvio padrão da média. Letras minúsculas distintas representam diferenças significativas pelo teste de Kruskal-Wallis (A, B e D) ($P < 0,05$) ou pelo teste de Tukey HSD (E) ($P < 0,05$). nd indica não detectado.

5. DISCUSSÃO

Nos sistemas agrícolas, as plantas são expostas a diferentes estresses, que limitam o crescimento e produtividade das culturas. O Si desempenha um papel importante no desenvolvimento das plantas devido a suas influências benéficas no fortalecimento dos mecanismos moleculares, fisiológicos e bioquímicos das plantas, que levam a aumentar a tolerância das plantas aos estresses abióticos (SOUSA JUNIOR et al., 2022). Os muitos mecanismos potenciais do Si na estimulação da tolerância das plantas aos efeitos adversos dos estresses abióticos foram relatados anteriormente (HURTADO et al., 2021; PEÑA CALZADA et al., 2023; SOURI et al., 2021; SOUSA JUNIOR et al., 2022). Este é um dos primeiros trabalhos realizados onde foi aplicado silício para mitigar os efeitos adversos do glyphosate anteriormente, foram realizados trabalhos em tomates aplicando nanopartículas e silicato de sódio para atenuar os efeitos adversos de glyphosate (SOARES, Cristiano et al. 2021).

O incremento da aplicação de subdoses de glyphosate em plantas de sorgo afeita o crescimento e a absorção dos macros e micronutrientes, mas as baixas subdoses do herbicida estimulasse o crescimento e a absorção dos macros e micronutrientes. Este efeito é conhecido como hormese. De forma geral, os resultados deste estudo demonstram que subdoses de 36 e 72 g e.a. ha⁻¹ de glyphosate estimulam o crescimento, porém a exposição a subdoses de 180 g e.a. ha⁻¹ do herbicida afeita o crescimento e a nutrição das plantas de sorgo. Estudos similares com o glyphosate apresentou efeito de hormese foram reportados anteriormente em diversas culturas como no sorgo (HALE et al., 2019), arroz (CÓRDOVA et al., 2020) e milho (BIDÓIA et al., 2023).

Neste estudo, o fornecimento foliar de Si melhora parcialmente o crescimento das plantas de sorgo sob diferentes subdoses do herbicida, mas a interação entre Si y o glyphosate é, aparentemente, pontual e pouco significativa. Este é o primeiro reporte onde à aplicação foliar o Si melhora o crescimento das plantas de sorgo sob subdoses de glyphosate y nossos dados apoiam diretamente a

hipótese inicial. Eles demonstram que de maneira geral houve maior crescimento das plantas de sorgo sob subdoses de glyphosate com a pulverização foliar de Si em comparação às não tratadas, especialmente quando expostas a 72 e 180 g ha⁻¹ do herbicida (Figura 2), indicando que o Si é uma estratégia econômica para estimular o crescimento das plantas expostas ao herbicida. Conforme discutido anteriormente, assumimos a hipótese que a incorporação de Si representa uma estratégia econômica para as plantas enfrentar uma série de estresses ambientais.

Por outro lado, os teores dos macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (Fe, Mn, Zn e Cu) de maneira geral foi menor em plantas tratadas com Si em comparação às não tratadas (Figura 3) indicando que concentrações de silício podem fazer com que esses nutrientes fiquem mais dissolvidos em plantas com maior crescimento, esse fenômeno pode ser explicado pelo efeito de diluição, onde a presença de silício nessas plantas pode diluir os demais nutrientes, ou seja, quando as concentrações de Si aumentam, as concentrações de outros elementos necessariamente diminuem (DA SILVEIRA SOUSA JUNIOR et al., 2022; KLOTZBÜCHER et al., 2018).

Além disso, os teores de B na parte aérea das plantas de sorgo aumentaram com o fornecimento foliar de Si. Assim, deduziu-se que o Si desempenha um papel importante no aumento dos teores de B em planta acumuladora de Si expostas a subdoses de glyphosate. conforme estudado por (Sousa Junior et al 2021) na cultura do algodoeiro indicando que a aplicação isolada de B e associado ao silício pode ser atribuída à eficiência da aplicação foliar em incrementar o teor foliar deste micronutriente. Até onde sabemos, este é o primeiro estudo descrevendo evidências experimentais do papel benéfico do Si na nutrição das plantas de sorgo cultivadas sob subdoses de glyphosate.

Cabe ressaltar, ainda, que o tratamento foliar com Si, na dose utilizada, pode não ter sido significativamente eficaz na absorção do elemento benéfico pelas plantas de sorgo, mesmo sendo uma planta acumuladora, não houve diferença altamente significativa entre o teor de Si em plantas submetidas ao tratamento com este elemento em comparação às plantas que não foram tratadas com o elemento (Figura 4-F). Essas observações estão de acordo com os achados anteriores reportados em espécies acumuladoras como o sorgo, as quais apresentam mecanismos ativos e passivos que operam na absorção e transporte de Si (DESHMUKH; SONAH; BELANGER, 2020). Neste estudo, os maiores teores de Si

foram observados nas doses de 72 g e.a. ha⁻¹ de glyphosate, o que coincide com os critérios de diversos autores que demonstraram que quantidades significativamente aumentadas de Si melhora a tolerância das plantas sob vários estresses abióticos (CALERO HURTADO et al., 2020; SILVA, Bruna Santos et al., 2020; SOUSA JUNIOR et al., 2022). Portanto, este estudo constitui a primeira evidência benéfica mediado pelo Si no aumento na resistência das plantas do sorgo expostas a subdoses de glyphosate.

Resíduos de glyphosate foram detectados em tecidos foliares das plantas expostas ao herbicida, sendo as maiores concentrações observadas nas doses 72 e 180 g ha⁻¹ (Figura 5-A). Por sua vez, AMPA não foi detectado (Figura 5-C), indicando que não houve degradação do herbicida pelas plantas de sorgo (CERVEIRA JUNIOR et al., 2020). Houve acúmulo de ácido chiquímico em plantas expostas a 180 g ha⁻¹ de glyphosate, em comparação à testemunha (Figura 1-E), indicando bloqueio da rota metabólica do chiquimato (CARVALHO et al., 2012). Aparentemente, o referido bloqueio foi parcial, uma vez que os teores de fenilalanina, tirosina e triptofano não foram reduzidos com a aplicação do glyphosate, mas aumentado em alguns casos (Figura 5-B,D,F), como observado por Picoli et al. (2014), quando doses não letais de glyphosate foram aplicadas sobre plantas de azevém (*Lolium multiflorum*).

O tratamento com silício não teve efeito sobre os teores de glyphosate, ácido chiquímico e triptofano (Figura 5-A,E,F), porém apresentou efeito pontual, aumentando o teor de fenilalanina em plantas expostas a 72 g ha⁻¹ e reduzindo o teor de tirosina em plantas expostas a 36 g ha⁻¹ de glyphosate. A aplicação de silício pode ter efeito sobre o metabolismo primário das plantas, incluindo a biossíntese de aminoácidos aromáticos, especialmente em condições de estresse abiótico, conforme observado por Réthoré et al. (2020) em plantas de arroz. Para se beneficiar da aplicação de silício, algumas gramíneas usam dois transportadores diferentes (CHIBA et al., 2009; MITANI et al., 2009; MONTPETIT et al., 2012; MA et al., 2015) que desempenham um papel específico na absorção e na translocação do silício (RÉTHORÉ et al., 2020). Estes aumentos nos níveis de fenilalanina podem dever-se ao facto de o silício em algumas plantas, como as gramíneas, pode substituir compostos de C nas paredes celulares, influenciando assim os padrões de alocação de C e a produção de biomassa coincidindo com o estudado por (Schaller et al. 2011) em (*Pragmites Australis*). Dessa maneira, a atividade desses

transportadores podem afetar a resposta das plantas também sob exposição ao herbicida.

Por fim, as hipóteses deste estudo foram verificadas, indicando-se que as subdoses do herbicida provocam um efeito de hormese nas plantas de sorgo e que o fornecimento foliar com silício influencia positivamente na nutrição mineral e no crescimento de plantas de sorgo expostas ao glyphosate, com efeitos pontuais sobre o metabolismo e a biossíntese de aminoácidos aromáticos. Dessa maneira, outros estudos mais específicos necessitam ser realizados para elucidar qual o papel do silício na mitigação do estresse causado por herbicidas em plantas e os mecanismos envolvidos neste processo.

6. CONCLUSÃO

Concluiu-se que o uso do glyphosate em diferentes subdoses causa um efeito de hormese subdoses de 36 g e a.ha⁻¹ e 72 g e a.ha⁻¹ e em subdoses de 72 g e a.ha⁻¹ pode utilizar-se propositalmente para estimular o crescimento do sorgo. Adicionalmente, o fornecimento foliar de Si melhora a nutrição e o desenvolvimento do sorgo expostas ao herbicida glyphosate. De acordo com nossos achados, o uso de subdoses de glyphosate induze efeito de hormese e o Si desempenha um rol importante na melhoria da nutrição mineral o que representa um mecanismo-chave para sobrevivência das plantas expostas ao herbicida glyphosate. O glyphosate tem sobre uma resposta sobre o metabolismo da planta nas maiores concentrações ,mas ao combinar-se com o silicio pode ter diferentes respostas sobre teor de aminoacidos em plantas de sorgo.

7. REFERÊNCIAS

- Ali, S. et al 2013. The influence of silicon on barley growth, photosynthesis and ultra-structure under chromium stress. **Ecotoxicol. Environ. Saf.** pp 89,pp 66–72 .
- ANDEF – ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE DEFESA VEGETAL(2004).**Manual de Tecnologia de Aplicação de Produtos Fitossanitários**. Campinas. São Paulo: Linea Creativa, p 50.

Andrade, Gomes Ribeiro TC ; Bacha, Allam Lopes ; De Camargo, Bueno M ; De Carvalho, LB (2022) . **Influence of phosphorus fertilization on the response of pinus genotypes to glyphosate subdoses.** NEW FORESTS, v. 53, p. 143-160.

Bajwa AA, Nawaz A, Farooq M, Chauhan BS, Adkins S(2023). Herbicide Program to Control *Parthenium hysterophorus* in Grain Sorghum in an Arid Environment. **Crops**. 3(4):292-301. <https://doi.org/10.3390/crops3040026>

Barbosa, I. J.(2022) **Silício como atenuador de estresse causado por glifosato em mudas de laranja valência.** 55 p. Dissertação. Programa de Pós-graduação em Agronomia (Produção Vegetal), FCAV/UNESP, Câmpus de Jaboticabal.

Batey I (2017) **The diversity of uses for cereal grains.** In: Wrigley C,Batey I, Miskelly D (eds) Cereal grains. Elsevier, Amsterdam,Netherlands, pp 41–53

Bellmer D, Huhnke R, Whiteley R et al (2010). **The untapped potential of sweet sorghum as a bioenergy feedstock.** Biofuels 1:563–73.

Benbrook CM(2016). Tendências no uso do herbicida glifosato nos Estados Unidos e no mundo. **Environ Sci Eur**. 28:3.pmid:27752438

Bradberry S, Proudfoot A, Vale J (2004) Glyphosate Poisoning. **Toxicological Reviews** 23: 159-167.

Bonansea, R.I.; Filippi, I.; Wunderlin, D.A.; Marino, D.J.G.; Amé, M.V (2018) **The Fate of Glyphosate and AMPA in a Freshwater Endorheic Basin: An Ecotoxicological Risk Assessment.** Toxics, 6, 3, doi:10.3390/toxics6010003

Calero A, Chiconato D. A, Prado R.M, Sousa J, Gilmar da Silveira; Olivera Viciado D, Piccolo M.C(2020). Silicon application induces changes C:N:P stoichiometry and enhances stoichiometric homeostasis of sorghum and sunflower plants under salt stress. **Saudi Journal of Biological Sciences**, . DOI: 10.1016/j.sjbs.2020.08.017. Disponível em:<https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2020.08.017>..

Carvalho, W. P. et al(2014). Elaboração de Farinhas Instantâneas à Base de Sorgo Integral Cultivar BRS310. **Comunicado técnico 203.** Embrapa. Rio de Janeiro, RJ,

2014. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca> Acesso em: 02 maio 2021.

Cederlund, H (2017), Effects of spray drift of glyphosate on nontarget terrestrial plants—**A critical review. Environ Toxicol Chem**, 36: 2879-2886. <https://doi.org/10.1002/etc.3925>

Cerveira JU, Wilson R , Santos da Costa YK , Carboni CA , Duke Stephen O, da Costa Aguiar PA , De Carvalho LB(2020) . Growth. Morphological, metabolic and photosynthetic responses of clones of eucalyptus to glyphosate. **Forest ecology and management**, v 118218, p 470-471.

Costa AGF et al. (2007) www.scielo.br/pdf/pd/v25n1/a23v25n1

Cunha J, Teixeira MM, Coury JR, Ferreira LR (2003). **Avaliação de estratégias para redução da deriva de agrotóxicos em pulverizações hidráulicas**. Planta daninha [Internet].21(2):325–32. Available from: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582003000200019>.

Cunha JPAR et al. (2003) www.scielo.br/pdf/pd/v21n2/a19v21n2

Currie H. A, Perry C. C(2007). Silica in plants: biological, biochemical and Chemical studies. **Annals of Botany**, Oxford, v. 100, n. 7, p. 1383–1389. Disponível em:<<https://doi.org/10.1093/aob/mcm247>>

Cruz RA, Amaral GS, Oliveira GM, Rufino LR, Azevedo FA, Carvalho LB, Silva MFGF(2020) Glyphosate Resistance in Amaranthus viridis in Brazilian Citrus Orchards. **Agriculture** 10:1-10.

Daniel Vilar (2023). Artigo Tudo o que você precisa saber sobre o glifosato na agricultura.

Davi Guilherme, Gaspar Ruas, João Carlos, Garcia Nibio, Milagres Teixeira (199) ORIGEM E IMPORTÂNCIA DO SORGO PARA O BRASIL

Durigan J.C(1988). Comportamento de herbicidas no ambiente. In: SEMINÁRIO TÉCNICO SOBRE PLANTAS DANINHAS E O USO DE HERBICIDAS EM

REFLORESTAMENTO, 1988, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: SBS/ABRACAVE/SIF, paginação irregular.

Duke S.O. (2011). Glyphosate degradation in glypho-sate-resistant and -susceptible crops and weeds. **J. Agric. Food. Chem.** 59 (11), 5835-5841. <https://doi.org/10.1021/jf102704x>.

Emerson Borghi¹. et .al 2016 SSN 1518-4277 Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Embrapa Milho e Sorgo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento Importância Econômica, **Análise Conjuntural, Estratégias de Manejo e Recomendações Técnicas para o Cultivo de Sorgo Granífero no Estado de Goiás.**

EMBRAPA. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** 3rd ed. Brasília: [s. n.], 2013. Available at: www.embrapa.br/liv. Accessed on: 10 May 2019.

Elise Réthoré, Nusrat Ali, Jean-Claude Yvin, and Seyed Abdollah Hosseini. Silicon Regulates Source to Sink Metabolic Homeostasis and Promotes Growth of Rice Plants under Sulfur Deficiency. *Int J Mol Sci.* 2020 May; 21(10): 3677. Figueiredo F. C. et al(2010). Pulverização foliar e fertirrigação com silício nos atributos físico-químicos de qualidade e índices de coloração do morango. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, n. 5, p. 1306-1311.

Freitas H. C, Rezende Corrêa F, Furtado da Silva N, Soares da Silva W, Cavalcante,D, Ferreira Ribeiro, Rodrigues E(2023). Efeitos fitotécnicos do manejo de herbicidas aplicados em pré e pós emergência na cultura do sorgo. **Brazilian Journal of Science**, 2(4),64-75

Fornazieri Junior, A.; Kassab, A. L.; Barrera, P. et al(1999). Manual Brasil Agrícola: principais produtos agrícolas. São Paulo.

Gao W.; Yongzhi Zhang, Mengling Lin, Junlin Mao, Baoshan Xing, Yeyun Li, Ruyan Hou (2023). Capability of phytoremediation of glyphosate in environment by *Vulpia myuros*. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, Volume 265, 115511

Gomes, G. L, Carboni CA, Velini E. D, Trindade MLB, Silva JRM (2015). Extraction and Simultaneous Determination of Glyphosate, AMPA and Compounds of the

Shikimic Acid Pathway in Plants. **Planta Daninha**, 33(2), 295–304.
<https://doi.org/10.1590/0100-83582015000200015>

Gomes MP, Smedbol A, Chalifour L, Hénault-Ethier M. Labrecque, Lepage L, Lucotte M, Juneau P (2014). **Alteration of plant physiology by glyphosate and its by-product aminomethylphosphonic acid**: an overview. *J. Exp. Bot.*, 65), pp. 4691-4703

Gunes A. et al.(2007) Silicon-mediated changes on some physiological and enzymatic parameters symptomatic of oxidative stress in barley grown in sodic-B toxic soil. **Journal of Plant Physiology**, v. 164, n. 6, p. 807-811.

Guilherme S, Santos M, Gaivão I, Pacheco M(2014). DNA and chromosomal damage induced in fish (*Anguilla anguilla* L.) by aminomethylphosphonic acid (AMPA)—the major environmental breakdown product of glyphosate. **Environ. Sci. Pollut. Res.**, 21 pp. 8730-8739

Gravena R, Victoria Filho R, Alves PLCA, Mazzafera P, Gravena AR (2012) Glyphosate has low toxicity to citrus plants growing in the field. **Canadian Journal of Plant Science** 92:119-127.

Gruys K. J, Sikorski J. A (1999). Inhibitors of tryptophan, phenylalanine and tyrosine biosynthesis as herbicides. In: **Singh, B. K. Plant amino acids: biochemistry and biotechnology**. New York:Marcel Dekker. p. 357-384.

Hausler RE, Ludewig F., Krueger S (2014). Amino acids - A life between metabolism and signaling. **Plant Sci.** 229 225–237. 10.1016/j.plantsci.2014.09.011

Hattory T.et al.(2005) Application of silicon enhanced drought tolerance in *Sorghum bicolor*. **Physiologia Plantarum**, v. 123, n. 4, p. 459-466.

Herrmann KM, Weaver LM (1999) The shikimate pathway. **Ann Rev Plant Physiol Plant Mol Biol** 50:473–503. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.50.1.473>

Khoddami, A.; Messina V, Komala V, Asgar Faranhaky, Christopher L. Blanchard & Thomas H. Roberts (2023) Sorghum in foods: Functionality and potential in innovative products, **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, 63:9, 1170-1186, DOI: 10.1080/10408398.2021.1960793

Kirkwood R. C, McKay I (1994). Accumulation and elimination of herbicides in select crop and weed species. **Pestic. Sci.**, v. 42, p. 241-249.

Kresovich S, Barbazuk B, Bedell JA, Borrell A, Buell CR, Burke J (2005). Toward sequencing the sorghum genome. **A US National Science Foundation-sponsored Workshop Report. J Plant Physiol.** 138:1898–1902.

Liang Y.C, Sun W, Zhu Y.G, Christie P (2007). Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: a review. **Environmental Pollution, London**, v. 147, p.422-428. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2006.06.008>

Liang Y, Ding R, Liu Q (1999). Effect of silicon on salt tolerance of barley and its mechanism **Scientia Agricultura Sinica**, v. 32, p.75-83.

LIMA, M. A. et al (2011). Aplicação de silício em milho e feijão-de-corda sob estresse salino. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, n. 2, p. 398-403.

Mace ES, Rami JF, Bouchet S (2009) **A consensus genetic map of sorghum that integrates multiple component maps and high-throughput Diversity Array Technology (DArT) markers.** BMC Plant Biol. pp 9 -13.

Magalhães P.C.I, Silva J.B.II, Durães F.O.M.I, Karam D.I, Ribeiro L.S (2001) **Effect of reduced rates of glyphosate and paraquat simulating drift in corn crop** <https://doi.org/10.1590/S0100-83582001000200013>.

MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Agrofit – Sistema de Agrotóxicos Fitossanitários.** Disponível em: > https://agrofit.agricultura.gov.br/agrofit_cons/principal_agrofit_cons

Malkones, H P (2000). Comparation of the effects of differently formulated herbicides on soil microbial activities a review. **J. Plant Disease Protec.**, v. 8, p. 781-789.

Marschner, H (1995). **Mineral Nutrition of Higher Plants.** Academic Press, London.

Metlinga G.V. & Vasilchenko S.A (2021). Efficacy of Ballerina herbicide on grain sorghum. **Grain Economy of Russia**1(73): 68–72. doi: 10.31367/2079-8725-2021-73-1-68-72.

Mitani N., Chiba Y., Yamaji N., Ma J.F. Identification and Characterization of Maize and Barley Lsi2-Like Silicon Efflux Transporters Reveals a Distinct Silicon Uptake System from That in Rice. *Plant Cell*. 2009;21:2133–2142.

Montpetit J., Vivancos J., Mitani-Ueno N., Yamaji N., Rémus-Borel W., Belzile F., Ma J.F., Bélanger R.R(2012) Cloning, functional characterization and heterologous expression of TaLsi1, a wheat silicon transporter gene. *Plant Mol. Biol.*79:35–46.

Mostafa, M.G.; Rahman, M.M.; Ansary, M.M.U.; Keya, S.S.; Abdelrahman, M.; Miah, M.G.; Phan Tran, L.S (2021). **Silicon in mitigation of abiotic stress-induced oxidative damage in plants**. *Crit. Rev. Biotechnol.* pp 41,pp 918–934.

Motlhaodi T, Bryngelsson T, Chite S et al(2018). Nutritional variation in sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] accessions from Southern Africa revealed by protein and mineral composition. **J Cereal Sci**;83:123–9

Moussa, H. R (2006) .**Influence of exogenous application of silicon on physiological response of salt-stressed maize (Zea mays L.)**. *Int. J. Agric. Biol.* 8, pp 293–297).

Nunes, R. T.; Alfredo Junior P. Albrecht, Leandro P. , Juliano B. Lorenzety M .T.Danilussi , Da Silva R M, Andre Felipe M. Silva & Arthur A. M. Barroso (2023) Soybean injury caused by the application of subdoses of 2,4-D or dicamba, in simulated drift, **Journal of Environmental Science and Health**, Part B, 58:4, 327-333, DOI: 10.1080/03601234.2023.2173927

Paterson AH, Bowers JE, Bruggmann R et al (2009) The *Sorghum bicolor* genome and the diversification of grasses. **Nature**;457:551–6.

Prado , R. M (2021) **Introduction to Plant Nutrition**. 1st ed. Switzerland: Springer, Cham,.DOI 10.1007/978-3-030-71262-4_1. Available at: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-71262-4_1.

Primost J.E., Marino D.J.G., Aparicio V.C., Costa J.L. y Carriquiriborde P (2017) Glyphosate and AMPA, “pseudo-persistent” pollutants under real-world agricultural management practices in the Mesopotamic Pampas agroecosystem, **Argentina. Environ. Pollut.** 229, 771-779. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.06.006>

Proietti, I., C. Frazzoli, Mantovani A (2015) **Exploiting nutritional value of staple foods in the world's semi-arid areas: risks, benefits, challenges and opportunities of sorghum.** Healthcare 3 (2):172–93. doi: 10.3390/healthcare3020172

Pstein E(1999) Silicon. Annual Review of Plant Physiology and Molecular Biology, Palo Alto, v,50,p.641-664 Disponível em:<<https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.50.1.641>>

Reddy, K. N.; A.M. Rimando, S.O. Duke (2004) Aminomethylphosphonic acid, a metabolite of glyphosate, causes injury in glyphosate-treated, glyphosate-resistant soybean. **J. Agric. Food Chem**, pp. 5139-5143

Reis, L.A.C.; Carvalho, F.P.; França, A.C.; Francino, D.M.T.; Pinto, N.A.V.D.; Freitas, A.F (2018) Leaf morphoanatomy and biochemical variation on coffee cultivars under drift simulation of glyphosate. **Planta Daninha** , 36, e018143560.

Rodrigues FA, Duarte HSS, Rezende DC, Filho JAW, Korndörfer G H & Zambolim L (2010) Foliar spray of potassium silicate on the control of angular leaf spot on beans. **Journal of Plant Nutrition**, 33:2082-20

Rodrigues , B. N, Almeida F. S (2005) **Guia de herbicidas** 5. ed. Londrina: Grafmarke,. 591 p.

Rodrigues FA, McNally DJ, Datnoff LE, Jones JB, Labbé C, Benhamou N, Menzies JG & Bélanger RR (2004) Silicon enhances the accumulation of diterpenoid phytoalexins in rice: a potential mechanism for blast resistance. **Phytopathology**, 94:177-183.

Santos, J. B. et al.(2006) Action of two herbicides on the microbial activity of soil cultivated with common bean (*Phaseolus vulgaris*) in conventional-till and no-till systems. **Weed Res.**, v. 46, p. 284-289.

Sativichi, N. M. et al.(2000) Absorption and translocation of glyphosate isopropylamine and trimethylsulfonium salts in *Abutilon theophrasti* and *-Setaria faberi* **Weed Sci.**, v. 48, p. 675-679.

Santos, J. B. et al.(2005) Atividade microbiana do solo após aplicação de herbicidas em sistemas de plantio direto e convencional. **Planta Daninha**, v. 23, p. 683-691.

Schroder E. P,Pinto, J O, Silva J. B(2000) Avaliação de pulverizações aéreas dos herbicidas sulfosate e glyphosate. In: CONGRESSO BRASILEIRO DA CIÊNCIA DAS PLANTAS DANINHAS, 22., 2000, Foz do Iguaçu. **Resumos....** Foz do Iguaçu: Sociedade Brasileira da Ciência das Plantas daninhas,. p. 478.

Shutry J, Padmaja R, Jaspreet Singh, VI Pratap Singh, Rajendra Prasab, Shweta Rana, Rupesh. D, Durgesh K T, Shivesh Sharma(2021). Exogenous addition of silicon alleviates metsulfuron methyl induced stress in wheat seedlings. **Plant Physiology and Biochemistry**, Volume 167, Pages 705-712, ISSN 0981-9428, <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2021.07.031>.2021

Smith O, Nicholson W. V, Kistrel L, Mace E, Clapham A, Rose P,Stevens C, Ware,Samavedam S, Barker G, Jordan D, Fuller D Q, Allaby R.G(2019). A domestication history of dynamic adaptation and genomic deterioration in Sorghum. **Nature Plants**, v. 5, p. 369-379.

Soares C, Nadais P, Sousa B, Pinto E, Ferreira I, Pereira R, Fidalgo F. Silicon (2021).Improves the Redox Homeostasis to Alleviate Glyphosate Toxicity in Tomato Plants—Are Nanomaterials Relevant? **Antioxidants** 10(8):1320. <https://doi.org/10.3390/antiox10081320>

Sviridov AV, Shushkova TV, Ermakova IT, Ivanova EV, Epiktetov DO, Leontievsky AA. Degradação microbiana de herbicidas de glifosato. **Appl Biochem Microbiol**. 2015;51: pp188–195.

Tkalich, Y.; Oleksandr Tsyliuryk, Oleksandr Havryushenko, Oleksandr Mytsyk, Volodymyr Kozechko, Yuriy Rudakov(2023). Weed chemical control in grain sorghum at the steppe zone of Ukraine. **Ecological Questions** 34:109–115. <http://dx.doi.org/10.12775/EQ.2023.023>

Tripathi, D. K. et al(2016). **Silicon nanoparticles more efficiently alleviate arsenate toxicity than silicon in maize cultivar and hybrid differing in arsenate tolerance**. Front. Environ. Sci.p 4, p46 .

Tripathy, D.K., Varma, R.K., Singh, S. et al(2020). Silicon tackles butachlor toxicity in rice seedlings by regulating anatomical characteristics, ascorbate-glutathione cycle, proline metabolism and levels of nutrients. **Sci Rep** 10, 14078. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65124-8>

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE – USDA. **World Agricultural Production**. January 2024 (Circular Series).. Disponível em: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf>. Acesso em 22/01/2023

U.S. EPA (United States Environmental Protection Agency)2015. **Preliminary Ecological Risk Assessment in Support of the Registration Review of Glyphosate and Its Salts**; U.S. EPA: Washington, DC, USA;p. 318.

Van Erd, L. L.; R.E. Hoagland, R.M. Zablotowicz, J.C. Hall (2003). **Pesticide metabolism in plants and microorganisms**. Weed Sci., 51, p. 472-495

Van Bruggen AHC, He MM, Shin K, Mai V, Jeong KC, Finckh MR, et al.(2018). Efeitos ambientais e na saúde do herbicida glifosato. **Ciência Total Meio Ambiente**.p616–617: p 255–268.

Werle R., Tenhumberg B. & Linquist J.L (2017), Modeling shattercane dynamics in herbicide-tolerant grain sorghum cropping systems. **Ecol. Model**.343: 131–141.

Wendorf F, Close A E, Schild R, Wasylkova K, Housley R. A, Harlan J R,Królik H(1992). Saharan exploitation of plants 8000 years bp. **Nature**, v. 359, p. 721-724.

Winchell F, Brass M, Manzo A, Beldados A, Perna V,Murphy C, Stevens C, Fuller D. Q(2002). On the origins and dissemination of domesticated sorghum and pearl millet across Africa and into India: a view from the Butana Group of the Far Eastern Sahel. African

Yanniccaril, M.; E. Tambussi, C. Istilart, A.M. Castro(2012). **Glyphosate effects on gas exchange and chlorophyll fluorescence responses of two *Lolium perenne* L. biotypes with differential herbicide sensitivity.** *Plant Physiol. Biochem.*, 57 , pp. 210-217

Zampiroli R, Da Cunha J, De Alvarenga CB(2023). Simulated Drift of Dicamba and Glyphosate on Coffee Crop. **Plants.** 12(20):3525. <https://doi.org/10.3390/plants12203525>

Zhan H, Feng Y, Fan X, Chen S(2018). Recent advances in glyphosate biodegradation. **Appl. Microbiol. Biotechnol.** 102, 5033–5043 DOI10.1007/s00253-018-90350

Zeier J. (2013). New insights into the regulation of plant immunity by amino acid metabolic pathways. **Plant, Cell Environ.** 36 2085–2103. 10.1111/pce.12122

Zhu Z J, Wei G.Q, Li J, Qian Q. Q, Yu J. Q (2004). Silicon alleviates salt stress and increases antioxidant enzyme activity in leaves of salt-stressed cucumber (*Cucumis sativus* L.), **Plant Science**, v. 167, p. 527–533, . <http://dx.doi.org/10.1016/j.plantsci.2004.04.020>

Zulet-González A, Barco-Antoñanzas M, Gil-Monreal M, Royuela M, Zabalza A (2020). Increased Glyphosate-Induced Gene Expression in the Shikimate Pathway Is Abolished in the Presence of Aromatic Amino Acids and Mimicked by Shikimate. **Front Plant Sci.** 29;11:459. doi: 10.3389/fpls.2020.00459. PMID: 32411158; PMCID: PMC7202288.