

ANA PAULA RODRIGUES DA SILVA

**FORMAS DE APLICAÇÃO DE SILÍCIO E O SEU EFEITO NA MITIGAÇÃO DA
TOXIDEZ DE ZINCO NO MILHO**

Botucatu-SP

2021

ANA PAULA RODRIGUES DA SILVA

**FORMAS DE APLICAÇÃO DE SILÍCIO E O SEU EFEITO NA MITIGAÇÃO DA
TOXIDEZ DE ZINCO NO MILHO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Mestra em Agronomia (Agricultura).

Orientador: Prof. Dr. Dirceu Maximino Fernandes

Botucatu-SP

2021

S586f Silva, Ana Paula Rodrigues da
Formas de aplicação de silício e o seu efeito na mitigação da
toxidez de zinco no milho / Ana Paula Rodrigues da Silva. --
Botucatu, 2021
121 f. : il., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista
(Unesp), Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu
Orientador: Dirceu Maximino Fernandes

1. silicato. 2. remediação. 3. elementos-traço. 4.
elemento-benéfico. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da
Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: FORMAS DE APLICAÇÃO DE SILÍCIO E O SEU EFEITO NA MITIGAÇÃO DA TOXIDEZ DE ZINCO NO MILHO


AUTORA: ANA PAULA RODRIGUES DA SILVA


ORIENTADOR: DIRCEU MAXIMINO FERNANDES

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em AGRONOMIA (AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:



Prof. Dr. DIRCEU MAXIMINO FERNANDES (Participação Virtual)
Ciência Florestal, Solos e Ambiente / Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu - UNESP

Dr.^a ANGÉLICA CRISTINA FERNANDES DEUS (Participação Virtual) 
./.

Pesquisador Dr. EZEQUIEL LOPES DO CARMO (Participação Virtual) 
./ Instituto Federal do Tocantins

Botucatu, 31 de agosto de 2021

*Aos meus amados pais Coracy e Aronildo e a minha
amada avó, Felizona,*

dedico

AGRADECIMENTOS

A Deus, criador de todas as coisas, por toda proteção e direção em todos os dias da minha vida.

Aos meus amados pais Aronildo e Coracy, e a minha querida avó Felizolina (Eliza), por todo apoio, carinho e amor incondicional.

Ao meu irmão Lian, pelo respeito, amizade e amor incondicional.

Aos meus tios José dos Anjos e Lacy, pelo carinho e apoio.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Dirceu Maximino Fernandes, pela oportunidade, amizade, compreensão, tranquilidade transmitida e ensinamentos de crescimento profissional e pessoal.

Ao pessoal do Departamento de Ciência do Solo em especial, Adriana, José Carlos, Dorival, Luiz, Prof. Dr. Silvio, Antônio, Felipe, Reginaldo, Marta, Adilson, Tainah, Larissa, Selminha, Adriana (fertilizantes), Sônia, Juliana e Valquíria pela amizade e auxílio direto e/ou indireto durante meu mestrado.

À Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais (FEPAF), pelo apoio financeiro, no frete do silicato de potássio, em especial, a pessoa da Renata Oliveira que não mediu esforços para tornar isso possível.

Às assessoras administrativas II, Renata e Juliane, pelo suporte e paciência.

À Empresa Indiana Noble Alchem pela doação do silicato de potássio em pó, em especial aos Srs. Harsh Gupta e Rohan Gupta, pela paciência com os protocolos e disponibilidade em sanar dúvidas.

Às empresas Unaprosil e Grintec pela doação do silicato de potássio líquido, em especial, a pessoa do Adriano Magalhães da Silva (Unaprosil) e Eduardo Veitonis (Grintec).

Ao pessoal do apoio a pesquisa da Fazenda Lageado (FEPE), em especial a Silvia, Dirceu, Flávio e Carnieto.

Ao Wesley da fazenda São Manuel, pela disponibilidade em realizar a coleta de

solo para o meu experimento e ao departamento de transportes, pela disponibilidade em transportar o solo.

Ao Cirinho do Departamento de Produção Vegetal, pelo transporte de insumos e pela boa vontade de ajudar a todos sempre.

A todos os professores da pós-graduação que contribuíram para o meu conhecimento e crescimento, em especial ao Prof. Dr. Roberto Lyra Villas Boas, Prof. Dr. Hélio Grassi Filho, Prof. Dr. Paulo Roberto Arbex Silva, Prof. Dra. Maria Márcia Pereira Sartori, Profa. Dra. Angélica Fernandes Deus, Prof. Dr. Leonardo Theodoro Büll e Profa. Dra. Gisela Ferreira.

A todos os funcionários da biblioteca e da seção de pós-graduação, pelo suporte técnico.

Ao programa de pós-graduação em agronomia (agricultura) pela oportunidade na realização do mestrado, em especial ao Prof. Dr. Edvaldo Amaral Aparecido Silva.

Sem citar nomes para não cometer um equívoco de esquecer alguém, a todos os meus colegas e amigos que tive a chance de conhecer em Botucatu, pelas conversas, sorrisos e trocas de conhecimento. Gratidão por tornar a minha jornada mais leve.

À Laís pela disposição em me ajudar no dia da coleta das plantas, a Ivanaira pelo apoio no dia da semeadura, a Malba pelo suporte na lavagem das raízes e o Tarik pelo auxílio no transporte dos vasos para a estufa.

As minhas amigas de apartamento Malba e a Alessandra, pela convivência e divisão de contas.

Ao Instituto Federal do Tocantins *campus* Dianópolis por tornar a minha formação em Eng. Agrônômica possível.

Aos orientadores que tive durante a graduação, Prof. Dr. Jeremias Fernandes de Oliveira e Prof. Dr. Ezequiel Lopes do Carmo, pelos ensinamentos, amizade e por despertar em mim o amor pela pesquisa e pela agronomia.

A todos os meus amigos da graduação, em especial Cleo, Taynana e Wender.

As minhas amigas de infância Ilanna e Amanda. Vocês são especiais. Ao meu afilhado Benício que alegra os meus dias, mesmo de longe.

A todos aqueles os quais não citei, mas que contribuíram de alguma forma na minha vida acadêmica, profissional e pessoal, ajudando moldar a pessoa que sou hoje.

A todos aqueles que acreditaram no meu sucesso.

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

Gratidão!

“Para tudo há um tempo, para cada coisa há um momento debaixo dos céus (Eclesiastes, 3:1)”.

BÍBLIA, A. T. Eclesiastes. *In*: BÍBLIA. Sagrada Bíblia Católica: Antigo e Novo Testamentos. Tradução: José Simão. São Paulo: Sociedade Bíblica de Aparecida, 2008.

RESUMO

A contaminação do solo em áreas agrícolas vem sendo motivo de preocupação nas últimas décadas. Esta é causada pelo uso inadequado e descarte de resíduos industriais, fertilizantes, agroquímicos que contêm elementos tóxicos em sua composição. Embora o zinco seja um micronutriente para as plantas o seu excesso pode ocasionar danos nas raízes e por consequência redução da biomassa, transporte e a absorção de água e nutrientes. O silício é um elemento benéfico conhecido por reduzir estresses bióticos e abióticos em plantas. O objetivo deste trabalho foi verificar a eficiência de diferentes formas de aplicação de silício e o seu efeito na mitigação de níveis intermediário e alto de zinco em dois tipos de solo na cultura do milho. Foram conduzidos dois experimentos em túnel de plástico, em ambos o delineamento experimental utilizado foi em blocos casualizados, em esquema fatorial 3 x 9, com quatro repetições. Os tratamentos dos experimentos foram constituídos de três formas de aplicação de silício (via sulco, via foliar e em área total) e doses combinadas e individuais de silício e de zinco em nível intermediário e tóxico [1: controle (sem aplicação de silício e zinco); 2: Si1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si); 3: Si2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si); 4: Zn1 (aplicação de 20 mg kg⁻¹ de Zn); 5: Zn2 (aplicação de 60 mg kg⁻¹ de Zn); 6: Si1+Zn1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn); 7: Si1+Zn2 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn); 8: Si2+Zn1 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn) e 9: Si2+Zn2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn) exceto quando o silício foi aplicado via foliar, no qual foi fornecido uma concentração de 2,56 e 7,68 mg de Si vaso⁻¹ para os tratamentos Si1 e Si2, respectivamente]. No experimento I as plantas de milho foram cultivadas em solo arenoso, enquanto no experimento II em solo argiloso. Em ambos os experimentos, as avaliações foram realizadas aos 30 dias de ciclo, tanto na planta [altura da planta, número de folhas, índice relativo de clorofila (IRC), estimativa de área foliar, massa seca das folhas, colmo, raiz e parte aérea, teor e acúmulo de macronutrientes, micronutrientes e silício na parte aérea (N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mg, Zn e Si)], quanto no solo (pH, V%, H+Al, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Mn, Zn e Si). Conclui-se que independentemente do tipo de solo, nem sempre o Si se comportou como mitigador dos teores de Zn no solo e na planta e as formas de aplicação influenciaram na mitigação de Zn apenas no teor de Zn do solo argiloso. As formas de aplicação de Si no solo arenoso influenciaram na massa seca da parte aérea, raiz e caule, acúmulo de N, S, B, e Cu e teor de N, Cu e Mg na parte das plantas e para o teor de K e V% no solo. Enquanto no solo argiloso, as formas de aplicação de Si influenciaram no teor de K e Mn da parte aérea das plantas de milho e teor de S no solo.

Palavras-chave: silicato; remediação; elementos-traço; elemento benéfico.

ABSTRACT

Soil contamination in agricultural areas has been a matter of concern in recent decades. This is caused by the inappropriate use and disposal of industrial waste, fertilizers, agrochemicals that contain toxic elements in their composition. Although zinc is a micronutrient for plants, its excess can damage the roots and consequently reduce biomass, transport, and absorb water and nutrients. Silicon is a beneficial element known to reduce biotic and abiotic stresses in plants. The objective of this work was to verify the efficiency of different forms of silicon application and its effect on the mitigation of intermediate and high levels of zinc in two types of soil in the corn crop. Two experiments were carried out in a plastic tunnel, in both the experimental design used was a randomized block design, in a 3 x 9 factorial scheme, with four replications. The treatments of the experiments consisted of three forms of silicon application (via furrow, foliar and total area) and combined and individual doses of silicon and zinc at intermediate and toxic levels [**1**: control (without silicon and zinc application); **2**: Si1 (application of 30 mg kg⁻¹ of Si); **3**: Si2 (application of 120 mg kg⁻¹ of Si); **4**: Zn1 (20 mg kg⁻¹ Zn application); **5**: Zn2 (application of 60 mg kg⁻¹ of Zn); **6**: Si1+Zn1 (application of 30 mg kg⁻¹ of Si and 20 mg kg⁻¹ of Zn); **7**: Si1+Zn2 (application of 30 mg kg⁻¹ of Si and 60 mg kg⁻¹ of Zn); **8**: Si2+Zn1 (application of 120 mg kg⁻¹ of Si and 20 mg kg⁻¹ of Zn) and **9**: Si2+Zn2 (application of 120 mg kg⁻¹ of Si and 60 mg kg⁻¹ of Zn) except when silicon was applied via foliar, in which a concentration of 2.56 and 7.68 mg of Si pot⁻¹ was provided for treatments Si1 and Si2, respectively]. In experiment I corn plants were grown in sandy soil, while in experiment II in clayey soil. In both experiments, evaluations were carried out at 30 days of cycle, both on the plant [plant height, number of leaves, relative chlorophyll index (RCI), leaf area estimate, dry mass of leaves, stalk, root and part aerial, content and accumulation of macronutrients, micronutrients and silicon in the aerial part (N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mg, Zn and Si)], and in the soil (pH, V %, H+Al, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Mn, Zn and Si). It was concluded that, regardless of the type of soil, Si did not always act as a mitigator of the Zn content in the soil and in the plant, and the application forms influenced the Zn mitigation only in the Zn content of the clayey soil. The forms of Si application in the sandy soil influenced in the dry mass of shoots, root and stem, accumulation of N, S, B, and Cu and N, Cu and Mg content in the plant part and for the K and V% content in the soil. While in clay soil, the application forms of Si influenced the K and Mn content of the aerial part of the corn plants and S content in the soil.

Keywords: silicate; remediation; trace elements; beneficial element.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Temperatura máxima, média e mínima durante a condução do experimento. Botucatu-SP, 2021.....	37
Figura 2 - Índice relativo de clorofila (a), número de folhas (b), área foliar (c) e altura (d) em função dos tratamentos combinadas e individuais de Si e Zn. Experimento I.....	45
Figura 3 - Massa seca da raiz (a), massa seca das folhas (b), massa seca da parte aérea (c) e massa seca do colmo (d) em função dos tratamentos combinados e individuais de Zn e Si. Experimento I.....	48
Figura 4 - Teor (a) e acúmulo (b) de zinco em função dos tratamentos combinados e individuais de Si e Zn. Experimento I.....	55
Figura 5 - Teor de Si no solo extraído pelo método CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ em função dos tratamentos combinados e individuais de Si e Zn. Experimento I.....	68
Figura 6 - Teor de zinco (Zn) no solo extraído pelo método DTPA em função dos tratamentos combinados e individuais de Si e Zn. Experimento I.....	70
Figura 7 - Índice relativo de clorofila (a), número de folhas (b), área foliar (c) e altura (d) em função dos tratamentos combinadas e individuais de Si e Zn. Experimento II.....	78
Figura 8 - Massa seca da raiz (a), massa seca das folhas (b), massa seca da parte aérea (c) e massa seca do colmo (d) em função dos tratamentos combinados e individuais de Zn e Si. Experimento II.....	80
Figura 9 - Teor (a) e acúmulo (b) de zinco em função dos tratamentos combinados e individuais de Si e Zn. Experimento II.....	86
Figura 10 - Teor de Si no solo extraído pelo método CaCl_2 $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ em função dos tratamentos combinados e individuais de Si e Zn. Experimento I.....	100
Figura 11 - Desdobramento do teor de zinco (Zn) no solo extraído pelo método DTPA em função das formas de aplicação de aplicação de Si e tratamentos combinados e individuais de Si e Zn no milho. Experimento II	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise química (1) e granulométrica (2) do solo utilizado, antes da instalação do experimento. Experimento I.....	38
Tabela 2 - Fontes de silício (Si) e zinco (Zn) utilizadas nos tratamentos do experimento.....	40
Tabela 3 - Análise química e granulométrica do solo, antes da instalação do experimento. Experimento II.....	42
Tabela 4 - Altura, índice relativo de clorofila (IRC), número de folhas e área foliar (cm^2) em função das formas de aplicação de Si no milho. Experimento I.....	44
Tabela 5 - Massa seca da parte aérea, raiz folhas e colmo em função das formas de aplicação de Si no milho. Experimento I.....	47
Tabela 6 - Desdobramento do teor de Si na parte aérea (g kg^{-1}) em função das formas de aplicação e tratamentos combinados e individuais de Si e Zn no milho. Experimento I.....	50
Tabela 7- Desdobramento do acúmulo de Si na parte aérea (mg planta^{-1}) em função das formas de aplicação e tratamentos combinados e individuais de Si e Zn no milho. Experimento I.....	52
Tabela 8 - Teor e acúmulo de zinco (mg kg^{-1}) na parte aérea em função das formas de aplicação de Si no milho. Experimento I.....	54
Tabela 9 - Teor e acúmulo de N e P da parte aérea em função das formas de aplicação de Si e dos tratamentos combinados de Si e Zn no milho. Experimento I.....	57
Tabela 10 - Desdobramento do teor de K na parte aérea (g kg^{-1}) em função das formas de aplicação e tratamentos combinados e individuais de Si e Zn no milho. Experimento I.....	59
Tabela 11 - Desdobramento do acúmulo de K na parte aérea (g kg^{-1}) em função das formas de aplicação e tratamentos combinados e individuais de Si e Zn no milho. Experimento I.....	60
Tabela 12 - Teor e acúmulo de Ca e Mg na parte em função em função das formas de aplicação de Si e dos tratamentos combinados de Si e Zn no milho. Experimento I.....	62
Tabela 13 - Teor e acúmulo de S e B da parte aérea em função das formas de aplicação de Si e dos tratamentos combinados de Si e Zn no milho. Experimento I.....	64

Tabela 14 - Teor e acúmulo de Cu e Fe na parte aérea em função das formas de aplicação de Si e dos tratamentos combinados de Si e Zn no milho. Experimento I.....	65
Tabela 15 - Teor e acúmulo de Mn na parte aérea em função das formas de aplicação de Si e dos tratamentos combinados de Si e Zn no milho. Experimento I.....	66
Tabela 16 - Teor de Si no solo em função das formas de aplicação de Si no milho. Experimento I.....	67
Tabela 17 - Teor de zinco no solo no solo extraído pelo método DTPA em função das formas de aplicação de Si no milho. Experimento I.....	69
Tabela 18 – Valores de pH, P, H+Al, K e Ca no solo em função das formas de aplicação de Si e dos tratamentos combinados e individuais de Si e Zn no milho. Experimento I.....	72
Tabela 19 - Teores de Mg, V% e S no solo em função das formas de aplicação de Si e dos tratamentos combinados e individuais de Si e Zn no milho. Experimento I.....	73
Tabela 20 - Teores de B, Cu e Mn no solo em função das formas de aplicação de Si e dos tratamentos combinados e individuais de Si e Zn no milho. Experimento I.....	74
Tabela 21- Altura, índice relativo de clorofila (IRC), número de folhas e área foliar (cm ²) em função das formas de aplicação de Si no milho. Experimento II.....	77
Tabela 22- Massa seca da parte aérea, raiz folhas e colmo em função das formas de aplicação de Si no milho. Experimento II.....	79
Tabela 23 - Desdobramento do teor de Si na parte aérea em função das formas de aplicação de Si e tratamentos combinados e individuais de Si e Zn no milho. Experimento II.....	82
Tabela 24 - Desdobramento do acúmulo de Si na parte aérea em função das formas de aplicação de aplicação de Si e tratamentos combinados e individuais de Si e Zn no milho. Experimento II.....	84
Tabela 25 - Teor e acúmulo de zinco em função das formas de aplicação de Si no milho. Experimento II.....	85
Tabela 26 - Teor e acúmulo de N e Ca da parte aérea em função das formas de aplicação de Si e dos tratamentos combinados de Si e Zn no milho. Experimento II.....	89
Tabela 27 - Teor e acúmulo de Mg e S da parte aérea em função das formas de	

aplicação de Si e dos tratamentos combinados de Si e Zn no milho. Experimento II.....	91
Tabela 28 - Desdobramento do teor P na parte aérea em função das formas de aplicação de aplicação e tratamentos combinados e individuais de Si e Zn no milho. Experimento II.....	92
Tabela 29 - Desdobramento do acúmulo de K na parte aérea em função das formas de aplicação de aplicação de Si e tratamentos combinados e individuais de Si e Zn no milho. Experimento II.....	94
Tabela 30 - Teor de K, acúmulo de P e teor e acúmulo de B da parte aérea em função das formas de aplicação de Si e dos tratamentos combinados e individuais de Si e Zn no milho. Experimento II.....	96
Tabela 31 - Teor e acúmulo de Cu e Fe da parte aérea em função das formas de aplicação de Si e dos tratamentos combinados de Si e Zn no milho. Experimento II.....	97
Tabela 32 - Teor e acúmulo de Mn da parte aérea em função das formas de aplicação de Si e dos tratamentos combinados de Si e Zn no milho. Experimento II.....	98
Tabela 33 - Teor de Si no solo extraído pelo método cloreto de cálcio 0,01 mol L ⁻¹ em função das formas de aplicação de Si no milho. Experimento II.....	99
Tabela 34 – Valores de pH, P, H+Al, K, Ca no solo em função das formas de aplicação de Si e dos tratamentos combinados e individuais de Si e Zn no milho. Experimento II.....	105
Tabela 35 - Teores de Mg, V% e S no solo em função das formas de aplicação de silício e das doses combinadas de silício e zinco no milho. Experimento II.....	106
Tabela 36 - Teor de B, Cu e Mn no solo em função das formas de aplicação de Si e dos tratamentos combinados e individuais de Si e Zn no milho. Experimento II.....	107

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	25
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	27
2.1	Importância do milho.....	27
2.2	Zinco no solo e na planta.....	27
2.2.1	Toxicidade de zinco nas plantas e no solo.....	29
2.3	Silício no solo e na planta.....	31
2.3.1	Silício como mitigador do excesso de zinco.....	34
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	37
3.1	Experimento I.....	37
3.1.1	Delineamento experimental	37
3.1.2	Instalação e condução do experimento.....	38
3.1.3	Parâmetros avaliados.....	40
3.1.4	Análise estatística	42
3.2	Experimento II.....	42
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
4.1	Experimento I: Solo arenoso.....	44
4.1.1	Altura, número de folha, índice relativo de clorofila e área foliar.....	44
4.1.2	Massa seca da parte aérea, raiz, folhas e caule.....	46
4.1.3	Teor e acúmulo de silício e zinco na parte aérea.....	49
4.1.3.1	Teor e acúmulo de silício na parte aérea	49
4.1.3.2	Teor e acúmulo de zinco na parte aérea.....	54
4.1.4	Teores e acúmulo de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (B, Cu, Fe e Mn) da parte aérea.....	56
4.1.5	Teor de silício e zinco no solo.....	67
4.1.5.1	Teor de silício no solo.....	67
4.1.5.2	Teor de zinco no solo	69
4.1.6	Atributos do solo (pH, V%, H+Al, P, K, Ca, Mg e Mn	71
4.1.7	Considerações finais: Experimento I.....	75
4.2	Experimento II: Solo argiloso.....	77
4.2.1	Altura, número de folha, índice relativo de clorofila e área foliar....	77
4.2.2	Massa seca da parte aérea, raiz, folhas e caule	80

4.2.3	Teor de e acúmulo de silício e zinco na parte aérea.....	81
4.2.3.1	Teor e acúmulo de Si na parte aérea.....	85
4.2.3.2	Teor e acúmulo de Zn parte aérea.....	86
4.2.4	Teores e acúmulo de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (B, Cu, Fe e Mn) da parte aérea.....	88
4.2.5	Teor de silício e zinco no solo.....	99
4.2.5.1	Teor de silício no solo.....	99
4.2.5.2	Teor de zinco no solo.....	100
4.2.6	Atributos do solo (pH, V%, H+Al, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu e Mn)	104
4.2.7	Considerações finais: Experimento II.....	108
5	CONCLUSÃO.....	110
	REFERÊNCIAS.....	111

1 INTRODUÇÃO

A contaminação dos solos agrícolas por elementos tóxicos tem sido um dos problemas discutidos mundialmente nas últimas décadas, e é causada principalmente pelas ações antrópicas, com a utilização excessiva de fertilizantes, herbicidas e fungicidas que contém esses elementos tóxicos em sua formulação. Esses elementos tóxicos, além de limitar a produtividade agrícola e alimentação humana, podem causar a contaminação de cursos hídricos e lençol freático prejudicando todo o ecossistema.

O zinco (Zn) é um micronutriente para as plantas, desempenha papéis importantes para o funcionamento de diferentes processos metabólicos, promove a síntese de auxina e constitui enzimas importantes para o desenvolvimento das plantas. Embora o Zn seja um micronutriente para as plantas, o seu excesso pode ocasionar redução da fotossíntese, da absorção de água, e de outros nutrientes, e ainda, aumento do estresse oxidativo nas plantas. Esses efeitos adversos reduzem o crescimento das plantas e podem impedir que a planta complete o seu ciclo produtivo. A contaminação dos solos agrícolas por zinco pode ocorrer principalmente pela aplicação sucessiva de compostos orgânicos, como por exemplo, o lodo de esgoto, (MARQUES et al., 2007) dejetos líquidos de suínos (GIROTTO et al., 2013), além do uso de fungicidas que contém zinco na sua composição (TIECHER, 2014).

O silício (Si) é considerado um elemento benéfico para as plantas e é conhecido principalmente por atuar na redução de estresses bióticos e abióticos nas plantas (YIN et al. 2014; XIE et al. 2015; VIVANCOS et al., 2016; PINTO et al., 2020). Contudo, estudos investigando o uso do Si como remediador da toxidez de Zn no solo ainda são escassos. Além disso, a maioria dos trabalhos desenvolvidos que estão relacionados a mitigação de elementos tóxicos com a aplicação de Si foram conduzidos em sistema hidropônico. E também, o entendimento do comportamento do Si associado as concentrações elevadas de Zn no solo e a resposta da planta submetida a combinação desses dois elementos ainda é pouco reportada na literatura. Por esses motivos, torna-se necessário verificar o efeito dessa combinação em plantas cultivadas no solo.

As formas de aplicação de silício mais comuns na agricultura são via solo e foliar, contudo, são poucos os trabalhos comparando a eficiência das diferentes formas de aplicação do Si. A absorção de Si pelas raízes ocorre na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4) e a eficiência da absorção de Si ainda é controversa. Alguns estudos

apontam que a absorção de Si é quase exclusivamente realizada pelo sistema radicular (GUÉVEL; MENZIES; BÉLANGER, 2007), enquanto outros relatam que a aplicação via foliar de Si apresenta maior eficácia (OTHMANI et al., 2020).

Diante do exposto e levando em consideração a importância de encontrar formas de mitigar os efeitos causados pelo excesso de zinco no solo e considerando que o Si pode ser eficiente na remediação dos efeitos negativos causados pelo Zn no solo e na planta, o presente trabalho teve como objetivo investigar a eficiência de diferentes formas de aplicação de Si e os seus efeitos na mitigação de níveis intermediário e alto de zinco em dois tipos de solo em plantas jovens de milho.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Importância do milho

O milho (*Zea mays L.*) é uma planta originária do México, monocotiledônea, pertencente à família *Poaceae* e subfamília *Panicoideae*. É uma planta anual, alógama, com raízes fasciculadas, colmo ereto e folhas estreitas.

No Brasil o milho é cultivado em todas as regiões em diferentes épocas do ano, isso porque, as condições climáticas apresentam variações. Quando o semeio é realizado na primavera/verão é denominado cultivo de verão ou primeira safra, predominante nas regiões produtoras. Para as regiões norte e nordeste o semeio é conceituado de segunda safra, em função do período de chuvas que ocorre em janeiro. No centro-sul do país o milho é cultivado como safrinha, onde realiza-se a semeadura após a colheita da soja no verão/outono (CONTINI et al. 2019).

Nas últimas décadas o milho ultrapassou as culturas do trigo e arroz, sendo considerado a maior cultura agrícola do mundo, com produção maior que 1 bilhão de toneladas e um dos fatores que levou a cultura alcançar esse ranking foram suas diversas possibilidades de usos (CONTINI et al. 2019). Esse cereal pode ter mais de 3.500 aplicações e ainda possui granderelevância na alimentação humana e animal, na segurança alimentar, além de ser matéria-prima de diversos produtos como combustíveis, polímeros e bebidas (MIRANDA, 2018).

O Brasil ocupa o terceiro lugar na produção mundial com safra 2019/2020 de 102,0 milhões de toneladas, ficando atrás somente dos Estados Unidos e China com respectivamente 360 e 261 milhões de toneladas (USDA, 2020). No âmbito brasileiro o maior produtor de milho é o estado do Mato Grosso, seguido de Paraná e Goiás com produções de 35; 15; 13 mil toneladas respectivamente (CONAB, 2021). Ainda de acordo com a Conab (2021) o estado de São Paulo é o sétimo maior produtor brasileiro de milho, cujo, safra de 2019/2020 produziu 4.202,9 toneladas.

2.2 Zinco na planta e no solo

O zinco é considerado um micronutriente para as plantas, e pode ser encontrado na forma orgânica ou inorgânica (SANTOS, 2005). Está presente nas plantas principalmente na forma iônica Zn^{2+} , chega nas raízes por fluxo de massa e difusão e é transportado da raiz para a parte aérea através dos vasos condutores de seiva bruta

(xilema) e redistribuído na planta na mesma forma iônica, através dos vasos condutores de seiva elaborada (floema) e a sua redistribuição é considerada pouco móvel (MALAVOLTA, 2006).

Entre as principais funções que este nutriente desempenha nas plantas está o aumento da produção da auxina, hormônio responsável pelo crescimento, ainda, o zinco é constituinte de importantes enzimas como o álcool desidrogenase, desidrogenase glutâmica, anidrase carbônica (TAIZ; ZEIGER, 2004) e participa do metabolismo dos carboidratos (MARQUES; NASCIMENTO, 2014).

A deficiência de zinco pode ocasionar desequilíbrio no metabolismo, que consequentemente deixa a planta com maior suscetibilidade a pragas e doenças, além de provocar diminuição do porte da planta (LIMA NETO et al., 2015). Entre os principais sintomas de deficiência desse nutriente na planta pode-se citar a presença de clorose e diminuição da área foliar. Quando em estágio avançado de deficiência ocorre a diminuição no crescimento da planta e da produção de massa, isso porque, o alongamento dos internódios é reduzido (MALAVOLTA et al., 1997; EPSTEIN; BLOOM, 2006).

Apesar do zinco ser considerado um micronutriente essencial para as plantas, ou seja, absorvido em quantidades pequenas (HOODA, 2010) e quando a massa seca da parte aérea das plantas em geral apresentam teores acima de 300 mg kg⁻¹ é considerado fitotóxico (BROADLEY et al., 2007; SILVA et al., 2015), entretanto esses teores podem variar em função da espécie.

O zinco no solo está presente de forma natural, a partir da decomposição de rochas e minerais. Quando o solo apresenta níveis baixos, pode ser realizada a reposição de zinco com uso de fertilizantes que contém esse elemento em sua composição ou formulação. Diversos fatores podem influenciar na disponibilidade de zinco na solução do solo, entre esses, o pH, granulometria, umidade, tipo de solo, teor de matéria orgânica, ou seja, a química e física do solo e o teor de zinco total presente (KACHINSKI; VIDIGA; ÁVILA, 2020).

Quando o pH (pH em H₂O) da solução do solo se encontra acima de 6,5 ocasiona redução da disponibilidade de zinco para as plantas (RENGEL, 2015), por isso, a correção da acidez do solo pode resultar em menor extração de zinco pelas plantas. E ainda, elevados teores de argila, matéria orgânica, carbonatos, hidróxidos de ferro e alumínio aumentam a retenção do zinco nos colóides do solo, que por consequência também leva a reduzir a disponibilidade de zinco para as plantas (LINHARES et al., 2010).

Outro fator que contribui para a deficiência de zinco do solo está relacionado a aplicação de fertilizantes fosfatados de forma excessiva, isso ocorre porque o zinco e o fósforo interagem entre si. De modo genérico o que ocorre é a interação do cátion Zn^{2+} com os ânions $H_2PO_4^-$ e/ou $H_2PO_4^{2-}$. Com isso ocasiona maior precipitação do Zn^{2+} na forma de $Zn_3(PO_4)_2$ (fosfato de zinco) e esta forma não é absorvida pelas plantas (KACHINSKI; VIDIGA; ÁVILA, 2020).

O zinco também interage com o cobre. Quando há presença de cobre na solução do solo ocorre menor absorção de zinco pelas plantas e esse efeito está relacionado a competição do zinco e cobre pelos mesmos sítios de absorção (PÉREZ-NOVO et al., 2011). Também foi verificada a interação do zinco com o boro. Alguns autores relataram que essa interação foi positiva contribuindo para maiores incrementos de produção (LIMA, 2006; HOSSEINI et al., 2007), enquanto, outros autores não notaram interação entre o boro e o zinco (JAMAMI et al., 2006). Isso demonstra que a interação do boro com o zinco pode estar relacionada ao pH, a aplicação de fertilizantes e ao tipo de solo. Por isso, nem sempre é observada essa interação.

2.2.1 Toxicidade de zinco nas plantas e no solo

O zinco (Zn) em quantidade excessiva no ambiente é considerado um elemento tóxico, e a contaminação dos solos agrícolas por esse elemento pode ocorrer através da aplicação de produtos como herbicidas, fungicidas e fertilizantes que contém zinco na sua formulação (BORGES, 2008; MENEGATTI, 2017), quando estes são aplicados de forma excessiva e/ou sem monitoramento dos níveis de zinco. Além dessas formas, a contaminação pode ocorrer através de descarte industriais inadequados e de resíduos de equipamentos eletrônicos, ou pela aplicação de resíduos como dejetos de suínos e lodo de esgoto, estes quando são aplicados em excesso ou descartados de forma inadequada (LINCOLN et al., 2007; HOODA, 2010; SILVA et al., 2016).

Essa contaminação é um dos grandes problemas ambientais em áreas agrícolas, porque a presença de zinco em excesso no solo causa uma série de mudanças no solo, na fauna, flora e em águas superficiais e subterrâneas (MENEGATTI, 2017).

Vários autores relataram os efeitos de que o excesso do zinco pode provocar nas plantas, entre eles estão o aumento da síntese de proteínas e enzimas

responsáveis pela defesa de danos oxidativos, alterações na fotossíntese, além da danificação estrutural das raízes, o que conseqüentemente diminui o crescimento das plantas devido a redução da absorção de água e nutrientes pelas raízes (YANG et al., 2011; CAMBROLLÉ et al., 2015; AMBROSINI et al., 2015; BOCHICCHIO et al., 2015; AMBROSINI et al., 2016). Entre os sintomas visuais na planta causados por toxidez de zinco está a clorose nas folhas mais novas, podendo se estender para as folhas mais velhas após longo tempo de exposição (EBBS; KOCHIAN, 1997; GJORGIEVA ACKOVA, 2018).

Com exceção do estado de São Paulo, no Brasil os níveis de zinco no solo que são considerados críticos foi definido pela resolução Conama nº 420, de 28 de dezembro de 2009, na qual estabelece valores orientados para o solo, sendo considerado valor de prevenção a partir de 300 mg Zn kg⁻¹ de peso seco e de investigação para área agrícola valores maiores ou igual a 450 mg Zn kg⁻¹.

No estado de São Paulo esses valores são estabelecidos pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). Para valor de prevenção é considerados solos com teores igual ou maior que 86 mg Zn kg⁻¹ e 1900 mg Zn kg⁻¹ no solo como valor de investigação em área agrícola, estes valores foram determinados pelo método 3050b (CETESB, 2005). Apesar dos valores preventivos e de investigação apresentarem um intervalo considerável para determinar que o solo apresenta toxidez por Zn, na agricultura também se leva em consideração as limitações do desenvolvimento das plantas e a redução da produtividade causada por níveis elevados desse elemento.

Os níveis adequados e tóxicos do zinco no solo e na planta em região do cerrado foram definidos por Fageria (2000), para diferentes culturas (milho, arroz, feijão, soja e trigo). Através desse ensaio, concluiu-se que as doses de zinco consideradas tóxicas no solo estavam entre 40 e 110 mg Zn kg⁻¹ de solo e para as plantas estiveram entre 100 e 673 mg Zn kg⁻¹. Especificamente para a cultura do milho, os teores de Zn considerados tóxicos no solo variaram de 25 a 94 mg kg⁻¹ de Zn quando utilizado o extrator Mehlich 1 e quando extraído pelo método DTPA entre 33 e 60 mg kg⁻¹ de Zn. O nível de zinco considerado tóxico na parte aérea foi de 427 mg kg⁻¹ de Zn.

Um experimento foi conduzido com o objetivo de verificar o potencial do milho como planta fitorremediadora, utilizou-se doses crescentes de zinco (0, 30, 60, 90,

180 e 270mg Zn kg⁻¹), e foi observado redução do crescimento radicular e da parte aérea e decréscimo na produção de matéria seca das raízes e parte aérea com o aumento das doses de zinco no solo. Nesse mesmo ensaio também foi notado teores foliares de zinco acima dos níveis considerados normais, indicando que as doses altas aplicadas causaram toxicidade (TIECHER et al. 2016). Outro experimento foi realizado com doses crescentes de zinco na cultura da aveia preta e foi notado que a aplicação de doses de 120 mg Zn kg⁻¹ e 180 mg Zn kg⁻¹ causaram toxicidade nas plantas de aveia preta, uma vez que apresentaram valores elevados e redução do desenvolvimento (TIECHER et al. 2016).

Também foi realizado um ensaio em sistema hidropônico com a cultura do feijão. Foram adicionadas doses crescentes de zinco (2, 50, 75 e 100 µM) e os autores reportaram que o aumento das concentrações de zinco (a partir de 2 µM) houve redução do crescimento da raiz e do diâmetro do caule do feijoeiro (MENEGATTI et al. 2017). Ainda se observou efeitos negativos com a aplicação de doses de zinco na cultura do arroz (*Oryza sativa* L.) de terras altas. O experimento foi realizado em campo, onde foi aplicado doses de 0, 2, 4, 6 e 8 kg Zn ha⁻¹ e os autores concluíram com esse experimento que com a utilização de doses a partir de 2 kg Zn ha⁻¹ houve reduções do número de perfilhos por planta e da produtividade (RIVA et al., 2019).

2.3 Silício no solo e na planta

O silício está presente na crosta terrestre em abundância, perdendo apenas para o oxigênio. Esse elemento participa dos processos de constituição do solo, constituindo argilominerais 2:1 e 1:1 (MENEGALE et al., 2015). Apesar de estar presente nos argilominerais, os solos possuem de 4 a 40% de silício em sua composição. Essa ampla faixa ocorre porque apesar de ser um elemento que faz parte da constituição do solo, como grau de intemperismo (físico, químico e biológico) sofrido pelo solo esse elemento vai sendo lixiviado (Ma et al., 2001).

O teor de silício nos solos é influenciado pela textura do solo, sendo maior em solos argilosos e menor em solos arenosos (GUTIERREZ et al., 2011). Isso ocorre principalmente porque em solos de textura arenosa há maior predominância de quartzo (SiO₂), mineral de difícil intemperização. Os solos argilosos por sua vez possuem maior predominância de minerais de argila, os quais com a ação do intemperismo liberam rapidamente silício e alumínio para a solução do solo

(DEMATTE et al. 2011).

O comportamento do silício na solução do solo é como a de um ácido-fraco e está presente na solução do solo na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4), o qual é prontamente disponível para as plantas (CATEN, 2013). Epstein e Bloom (2006) reportaram que a concentração de silício na solução do solo é de 0,1 a 0,6 mmol L^{-1}

Alguns fatores podem afetar a disponibilidade de silício na solução do solo, entre esses está o pH, solos muito ácidos não possuem o silício na sua forma disponível, uma vez que a solubilidade desse elemento advém quando o pH se encontra entre 4 e 9 (CATEN, 2013). Outro fator limitante é a compactação do solo que levam ao aumento no nível de ácido polissilícico e por consequência há redução do ácido monossilícico (H_4SiO_4) (MARONDI, 2011). Além disso, o cultivo contínuo de culturas, sem o fornecimento de fertilizantes com teores de silício, também reduz os teores de ácido monossilícico (H_4SiO_4), devido a extração pelas plantas (KORNDÖRFER; DATNOFF, 1995).

Apesar do silício ser considerado micronutriente pela legislação brasileira de produção e comercialização de Fertilizantes e Corretivos, através da aprovação da Leino. 4.954, de 14 de janeiro de 2004 (BRASIL, 2004), do ponto de vista da nutrição de plantas o silício não é considerado micronutriente, todavia, é considerado um elemento benéfico, ou seja, a utilização desse elemento na nutrição traz resultados positivos, mas as plantas são capazes de se desenvolver e reproduzir na ausência desse elemento. Em um dos seus estudos Epstein (1999) reportou que o silício poder ser considerado um elemento “quase essencial”, pois quando o solo apresente deficiência nesse nutriente as plantas podem apresentar redução no crescimento, viabilidade e reprodução.

Há inúmeros materiais que possuem teores de silício e podem ser utilizados como fontes de silício para as plantas, sendo elas: Escórias de siderurgias, subprodutos da produção de fósforo elementar em fornos elétricos, cinzas de casca de arroz, silicato de sódio, silicato de potássio, sílica gel, metassilicato de sódio, metassilicato de cálcio, sílico amorfo, entre outras (SILVA; BOAS; FERNANDES, 2020). A forma de aplicação destas variam, sendo que algumas são aplicadas como corretivos, e outras como fertilizantes de solo ou foliares.

A absorção do ácido monossilícico (H_4SiO_4) pelas plantas ocorre a favor do

gradiente de concentração por fluxo de massa (CATEN, 2013). Após ser absorvido pelas raízes, o caminhar do silício para os órgãos das plantas ocorre via xilema, a favor do fluxo de transpiração (CATEN, 2013). Após ser absorvido pela planta o silício passa por transformações, permanecendo nas folhas mais velhas na forma de sílica amorfa hidratada ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) e posteriormente é acumulado rapidamente pelas células senescentes (DAYANANDAN; KAUFMAN; FRANKLIN, 1983).

O acúmulo na forma de $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ acarreta na formação de uma dupla camada de sílica cutícula e sílica-celulosa (MA; YAMAJI, 2006). O silício acumulado fica depositado na epiderme foliar, e este, sob a forma de sílica junta-se as frações depolissacarídeos como a celulose e hemicelulose da parede celular, lúmen celular e nos espaços intracelulares das raízes (SANGSTER; HODSON; TUBB et al., 2001).

O acúmulo de silício nas plantas pode variar em função da espécie e famílias, havendo três classificações baseadas na exigência de silício: Acumuladoras, intermediárias e não acumuladoras (HODSON, 2005). Plantas que acumulam de 1 a 3% de SiO_2 e apresentam relação Si:Ca Maior que 1 são consideradas acumuladoras de silício, como por exemplo, as gramíneas. Já as não acumuladoras são plantas que acumulam na matéria seca uma concentração de SiO_2 inferior a 0,5%, enquanto as intermediárias como a cultura da soja devem possuir de 0,5% a 1% de silício na matéria seca e relação Si:Ca inferior a 1 (MA et al., 2001).

A literatura vem reportando incrementos significativos nas plantas com a aplicação de silício, entre eles estão o aumento da produção de grãos (LIMA FILHO E TSAI, 2007), a redução do estresse (LIMA FILHO, 2009), menor susceptibilidade a pragas e doenças, aumento do diâmetro do caule, tamanho de folhas e das plantas, além do aumento da capacidade fotossintética (OLIVEIRA, 2009), aumento da disponibilidade de fósforo (PRADO; FERNANDES, 2001), nitrogênio e potássio (EPSTEIN, 1999), e menor acamamento (PULZ, et al., 2008). O local de maior acúmulo de silício é diferente em função da espécie e é possível encontrar teores de silício em várias partes da planta, mas é comum encontrar maior acúmulo no caule nas folhas e menor nos grãos (MENECALE, 2015).

2.3.1 Silício como mitigador do excesso de zinco

O uso de silício na mitigação de elementos tóxicos vem sendo reportado na literatura nas últimas décadas. Cunha, Nascimento e Silva (2008) avaliaram doses crescentes de silicato de cálcio na redução do estresse no milho (*Zea mays*) causado por contaminação de zinco no solo e concluíram que houve diminuição no estresse, aumento da biomassa da planta. Entretanto, quando se realizou a comparação com solo que não recebeu o tratamento com o silicato de cálcio, observaram que o pH não apresentou mudança significativa. Além disso, afirmaram que a imobilização dos elementos tóxicos ocorre devido ao aumento dos teores de silício na solução do solo, independente do aumento do pH do solo. Esses resultados corroboraram com observados por Cunha e Nascimento (2009), quais avaliaram doses crescentes de silício (0, 50 100, 150 e 200 mg kg⁻¹) em solo contaminado com 100 mg Zn kg⁻¹ no solo, conforme houve o aumento das doses foi notado incremento na matéria seca.

Pinto et al. (2009) verificaram o efeito do silício no alívio da toxidez de zinco em mudas de Eucalipto (*Eucalyptus*) cultivadas em solução. As doses utilizadas foram de 0, 2, 50, 150, 300 e 400 µmol L⁻¹ de zinco e 0 e 1,78 µmol L⁻¹ de silício. Os autores não notaram significância nos parâmetros avaliados, mas foi observado que os efeitos anatômicos negativos foram amenizados quando foi utilizado o silício na solução. Um outro experimento também utilizou o silício para avaliar o efeito do silício na remediação de zinco no solo em Eucalipto (*Eucalyptus*). Nesse ensaio foi avaliado o efeito do silício em três níveis de toxicidade (moderada, intermediária e severa), e houve diminuição dos teores de zinco disponíveis em todos os níveis de toxicidade e da transferência de zinco para as raízes (ACCIOLY et al. 2009).

Em ensaio realizado com duas cultivares de arroz (*Oryza sativa* L.) também observou o efeito do silício como mitigador da toxidez de zinco. Nesse ensaio as plantas foram cultivadas em solução nutritiva com concentrações de zinco baixa (0,15 µM) e alta (2 µM) com ou sem o fornecimento de silício (1,5 mM). Os autores observaram que ambas as cultivares que receberam as doses de zinco e silício apresentaram menor acúmulo de zinco na parte aérea (SONG et al., 2011).

Um outro ensaio em hidroponia com arroz também mostrou que o silício pode reduzir os efeitos negativos do zinco, foi observado redução na translocação e concentração de zinco nas raízes e no xilema quando utilizado os tratamentos com silício (0,5 ou 1,8 mM) e zinco (200 µM) (GU et al., 2012). Um estudo mais recente

avaliando em hidroponia o efeito do silício em função de uma concentração de zinco elevada, mostrou que além da redução da concentração de Zn, houve um aumento nos teores de potássio e ferro nas plantas de arroz (MEHRABANJOURANI et al., 2015).

Masarovič et al. (2012) realizaram um experimento em hidroponia utilizando doses contendo zinco e silício (Zn 75µM + 5 mM Si e Zn150 µM + 5mM Si), cujo objetivo foi avaliar o efeito do silício na diminuição da toxidez por zinco na cultura do sorgo (*Sorghumbicolor*). Os autores reportaram que não houve efeito significativo do silício no alívio da toxidade de zinco, mesmo com a aplicação associada do silício e zinco houve alto acúmulo do elemento Si nas plantas de sorgo em condições de hidroponia. Um outro trabalho semelhante realizado com a cultura do algodão (*Gossypium hirsutum*), mostrou resultado diferente. Entretanto as plantas de algodão foram submetidas a uma solução com concentração de 0,25 e 50 µM de zinco combinadas a 1 mM de silício. Os autores notaram que a combinação de zinco e silício ocasionaram redução do acúmulo de zinco nas folhas, caule e raízes do algodão (ANWAAR et al., 2015).

Zajackowska, Korzeniowska e Sienkiewicz-Cholewa (2020) avaliaram o efeito de duas formas de aplicação (via foliar e via solo) de silício na mitigação dos efeitos negativos do desenvolvimento do trigo (*Triticum* spp.). Nesse ensaio o solo foi contaminado intencionalmente com 600 mg kg⁻¹ de Zn e foram utilizadas as doses de 200 e 400 mg Si kg⁻¹ via solo e três aplicações foliares de 2 e 6 mM Si L⁻¹. Foi observado pelos autores que a aplicação via solo trouxe resultados benéficos para as plantas de trigo, enquanto a aplicação via foliar ocasionou redução da matéria seca. Com a aplicação via solo e independente da concentração houve redução do acúmulo de zinco nas raízes e parte aérea, aumento do pH e da concentração de silício nas partes da planta.

Embora existam alguns estudos avaliando o silício na mitigação do estresse em plantas causado pela toxidade de zinco, a maioria dos estudos são conduzidos em hidroponia e ainda não se sabe exatamente qual o comportamento da aplicação de silício em diferentes tipos de solo contaminados com zinco e tão pouco o que causa essa redução de toxidade. Alguns autores relataram que a redução dos elementos tóxicos no solo e a diminuição da disponibilidade desses elementos para a planta está relacionado principalmente com o aumento do pH (LIANG; WONG; WEI, 2005; LIANG et al. 2005) e outros descreveram que pode estar relacionado a formação de complexos

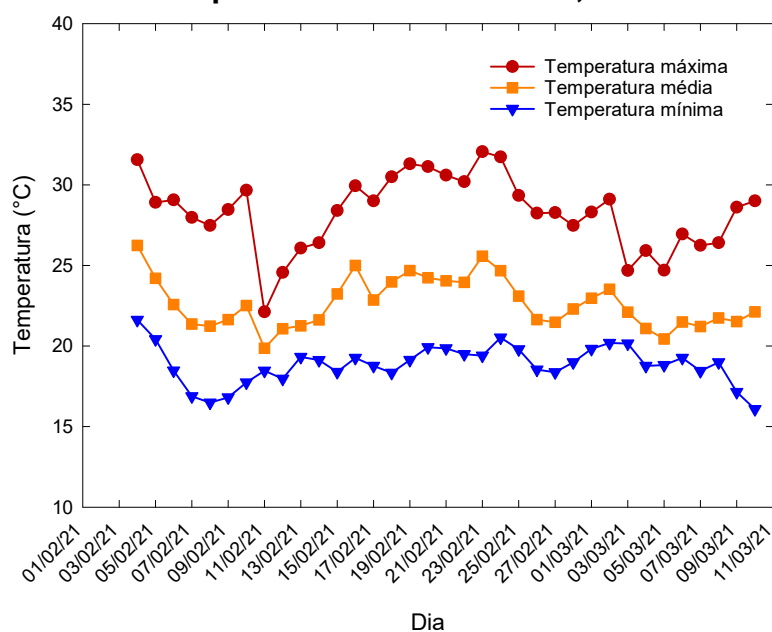
com o silício (GU et al. 2011; ZHAO et al., 2020). Diante do exposto, são necessários novos trabalhos para esclarecimento dessas causas e do efeito do silício nesse sistema heterogêneo, que é o solo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram instalados e conduzidos junto ao Departamento de Ciência Florestal, Solos e Recursos Ambientais (área Ciência do Solo), da Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista *campus* de Botucatu (FCA/UNESP). Os experimentos I e II foram implantados em ambiente sob estufa plástica.

As temperaturas máxima, média e mínima durante a condução dos experimentos estão representadas na Figura 1.

Figura 1- Temperatura máxima, média e mínima durante a condução do experimento. Botucatu-SP, 2021.



Fonte: Dados da estação meteorológica da Faculdade de Ciências Agrônômicas – Botucatu-SP

3.1 Experimento I

3.1.1 Delineamento experimental

O experimento foi instalado em blocos casualizados, arranjado em esquema fatorial 3 x 9, com quatro repetições, totalizando 108 unidades experimentais. Os tratamentos consistiram-se de três formas de aplicação de silício (via foliar, via sulco de semeadura e em área total) e aplicações combinadas e individuais de silício e zinco em nível tóxico intermediário e alto (controle, Si1, Si2, Zn1, Zn2, Si1+Zn1, Si1+Zn2, Si2+Zn1 e Si2+Zn2):

1. Controle= Sem a aplicação de Zn e Si no solo;
2. Si1= Aplicação de 30 mg Si kg⁻¹ no solo;

3. Si2= Aplicação de 120 mg Si kg⁻¹ no solo;
4. Zn1= Aplicação de 20 mg Zn kg⁻¹ no solo;
5. Zn2= Aplicação de 60 mg Zn kg⁻¹ no solo;
6. Si1+Zn1= Aplicação de 30 mg Si kg⁻¹ e 20 mg Zn kg⁻¹ no solo;
7. Si1+Zn2= Aplicação de 30 mg Si kg⁻¹ e 60 mg Zn kg⁻¹ no solo;
8. Si2+Zn1= Aplicação de 120 mg Si kg⁻¹ e 20 mg Zn kg⁻¹ no solo;
9. Si2+Zn2= Aplicação de 120 mg Si kg⁻¹ e 60 mg Zn kg⁻¹ no solo.

Quando o silício foi aplicado via foliar os tratamentos contendo Si1 e Si2 corresponderam as seguintes concentrações:

2. Si1= Aplicação de 2,56 mg Si vaso⁻¹;
3. Si2= Aplicação de 7,68 mg Si vaso⁻¹;
6. Si1+Zn1= Aplicação de 2,56 mg Si vaso⁻¹ e 20 mg Zn kg⁻¹ no solo;
7. Si1+Zn2= Aplicação de 2,56 mg Si vaso⁻¹ e 60 mg Zn kg⁻¹ no solo;
8. Si2+Zn1= Aplicação de 7,68 mg Si vaso⁻¹ e 20 mg Zn kg⁻¹ no solo;
9. Si2+Zn2= Aplicação de 7,68 mg Si vaso⁻¹ e 60 mg Zn kg⁻¹ no solo.

3.1.2 Instalação e condução do experimento

O experimento foi conduzido em ambiente sob estufa de plástico tipo túnel (sem controle de temperatura e circulação de ar), em vasos com capacidade para quatro quilos de solo (23 x 26 x 19 cm). O solo utilizado no experimento foi classificado como Latossolo Vermelho-amarelo (CARVALHO et al. 1983; SANTOS, 2018), e este apresentava textura arenosa e baixa fertilidade natural. A Tabela 1 apresenta a análise química e granulométrica do solo antes da instalação do experimento.

Tabela 1- Análise química (1) e granulométrica (2) do solo utilizado, antes da instalação do experimento. Experimento I.

pH	P _{resina}	M.O.	Ca	Mg	H+Al	K	SB	CTC	Al ³⁺	
	mg dm ⁻³	g dm ⁻³	mmolc.dm ⁻³							
3,9	3	13	2	1	71	0,2	3	74	12	
Granulometria										
S	B	Cu	Fe	Mn	Zn	V%	Argila	Silte	Areia	Si
mg dm ⁻³						%		mg kg		
7	0,24	2,7	36	2,2	0,2	4	31,9	6,9	61,2	3

Metodologia: RAIJ et al. (2001) (1) e CLAESSEN (1997) (2)

Antes da instalação do experimento o solo utilizado foi peneirado e colocado em

vasos. Posteriormente realizou-se a aplicação de calcário dolomítico (PRNT= 95%), este foi incorporado em todo o solo com o objetivo de elevar a saturação por bases a 70%, e o solo foi incubado e mantido úmido por um período de 30 dias. Após o período de incubação realizou-se a adubação conforme o recomendado por Rajj et al. (1997).

Para a semeadura foi utilizada sementes de milho híbrido, as quais receberam tratamento industrial (Clotianidina + Clorantraniliprole). A cultivar utilizada neste experimento possuía tecnologia Bt. A semeadura foi realizada no dia 04 de fevereiro de 2021, utilizando-se quatro sementes por parcela (vaso). A emergência ocorreu no dia 09 de fevereiro de 2021, e após a emergência foi realizado o desbaste das plântulas, deixando duas plântulas por parcela.

A adubação de semeadura foi realizada para suprimento da necessidade de nutrientes conforme a recomendação de Rajj et al. (1997). Foi aplicado N, P, e K, utilizando como fonte uréia, superfosfato triplo e cloreto de potássio (KCl), respectivamente. O N foi aplicado em dois momentos, na semeadura e aos 15 dias após a emergência.

A aplicação das doses de zinco foi realizada conforme os tratamentos e utilizou-se como fonte cloreto de zinco. Com o objetivo de obter uma aplicação homogênea, este foi solubilizado em água e em seguida aplicado na superfície do solo.

Nas unidades experimentais que receberam silicato de potássio via solo para fornecimento da menor concentração de Si (30 mg kg⁻¹ de Si) realizou-se o balanceamento do potássio, completando o fornecimento de K com KCl para atingir os valores de K recomendado por Rajj et al. (1997). As unidades experimentais que receberam o tratamento de Si via solo na concentração maior (120 mg kg⁻¹ de Si), o fornecimento de potássio foi suprido apenas com o silicato de potássio, sendo superior ao recomendado por Rajj et al. (1997). A aplicação do silicato de potássio foi realizada juntamente com a adubação, exceto os tratamentos que receberam adubação foliar. Nas parcelas onde foi avaliada a aplicação via sulco, o silicato de potássio foi adicionado no sulco de semeadura, cinco centímetros abaixo e ao lado das sementes e para a aplicação em área total realizou-se a incorporação do silicato de potássio em todo o solo do vaso.

A aplicação via foliar foi realizada nas parcelas onde avaliou-se esta forma de aplicação, em dois momentos, quando as plantas apresentavam quatro e seis folhas totalmente expandidas (estádios V4 e V6), respectivamente aos 11 e 23 dias após a emergência. O silício foi fornecido na forma de silicato de potássio líquido. Para a

aplicação utilizou-se pulverizador manual de pressão acumulada. As informações de concentrações presentes nos fertilizantes utilizados estão apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2- Fontes de silício (Si) e zinco (Zn) utilizadas nos tratamentos do experimento.

Fonte	Composição	Aspecto	Fórmula química
Silicato de potássio (aplicações via solo)	55,2 de SiO ₂ e 34,5 de K ₂ O	Pó branco	K ₂ OSiO ₃
Silicato de potássio (aplicações foliares)	26,7% de SiO ₂ e 12,8 de K ₂ O	Líquido incolor e semitransparente	K ₂ OSiO ₃
Cloreto de zinco P.A.	97,0 % de Zn	Granulado branco	ZnCl ₂

Fonte: Fornecido pelos fabricantes.

O controle de plantas daninhas durante a condução do experimento foi realizado manualmente. Para uma melhor eficiência da irrigação realizou-se a análise de determinação da umidade do solo pelo método da estufa (ABNT, 2016), após determinação da umidade manteve-se a umidade do solo em $\pm 70\%$ durante toda a condução do experimento. Para o controle de doenças fúngicas foi realizada aplicação preventiva de 1,73 ml de fungicida sistêmico, que possuía como ingrediente ativo 200 g L⁻¹ de picoxistrobina + 20 g L⁻¹ de ciproconazol. A coleta das plantas para avaliação foi realizada aos 30 dias após a emergência das plantas.

3.1.3 Parâmetros avaliados

As avaliações foram realizadas 30 dias após a emergência e foram avaliados os seguintes parâmetros:

a) Altura da planta

Para medição da altura da planta foi utilizada uma trena rígida. Foi considerado a superfície do solo até o ápice da planta, obtendo assim a altura (cm) das duas plantas por parcela experimental. Posteriormente foi realizada uma média da altura das duas plantas.

b) Número de folhas

Obteve-se o número de folhas através da contagem. Levou-se em consideração as duas plantas de cada parcela experimental, e após a contagem,

realizou uma média dos valores obtidos.

c) Índice relativo de clorofila (IRC)

Para determinação do índice relativo de clorofila utilizou-se um clorofilômetro modelo SPAD-502 (Soil and Plant Analysis Development, Minolta Co., Osaka, Japão). A avaliação foi realizada no período da manhã entre as 07h00min e 08h00min e considerou-se duas plantas por parcela experimental. Foram realizadas três leituras e posteriormente foi obtida uma média, e a aferição da leitura foi realizada a partir do terço médio da folha e os valores foram expressos em SPAD.

d) Estimativa de área foliar (cm²)

Obteve-se a média da área foliar das plantas de milho das duas plantas da parcela experimental através da seguinte equação (GUISCHEM et al., 2000):

$$Y (\text{área foliar}) = 1.130,6 + 172,17 X (\text{peso seco de folhas})$$

e) Massa seca da parte aérea, colmo, folhas e da raiz.

Para a determinação da massa seca da raiz, estas foram separadas, lavadas e armazenadas em sacos de papel tipo kraft, e posteriormente foram armazenadas em estufa de circulação forçada, regulada a temperatura de 65°C, até a obtenção da massa constante. Para obtenção da massa seca da folha e colmo, estes foram lavados, separados e em seguida armazenados na estufa, até atingir a massa constante. O peso da massa seca da parte aérea foi obtida através do somatório da massa seca da folha e do caule, considerou-se as duas plantas de cada parcela.

f) Teor e acúmulo de nutrientes na parte aérea (macronutrientes, micronutrientes e Si)

Após a secagem em estufa de circulação forçada, realizou-se a moagem em moinho de facas tipo Willey da parte aérea. Após moagem do material, este foi armazenado para realização das análises nutricionais. Avaliou-se o teor de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn e Zn através de análise da parte aérea conforme o método descrito por Malavolta et al. (1997) e a análise de Si foi realizada através da metodologia descrita por Korndörfer, Pereira e Nolla (2004). Para estimativa da

quantidade de nutrientes acumulados na parte aérea das plantas de milho, multiplicou-se o teor de cada nutriente pela massa seca da parte aérea.

g) Análise do solo (macronutrientes, micronutrientes e Si)

Foi realizada análise de solo (pH, V%, H+Al, P, K, Ca, Mg S, B, Cu, Zn e Mn) de acordo com o método disposto por Raij et al. (2001) e o teor de silício total no solo foi obtido pelo método do cloreto de cálcio 0,01 mol L⁻¹ (HAYSOM; CHAPMAN, 1975).

3.1.4 Análise estatística

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-wilk e após a verificação da normalidade realizou-se a análise de variância pelo teste F à nível de significância de 5%; posteriormente, aplicou-se o teste de médias de Tukey nas variáveis que apresentaram significância. Para a análise de normalidade dos dados foi utilizado o software Sisvar (FERREIRA, 2003) e para análise de variância e teste Tukey utilizou-se o Agroestat (BARBOSA; MALDONADO JÚNIOR, 2009).

3.3 Experimento II

O experimento II foi conduzido no mesmo local e época do experimento I (ver item 3.1.), os tratamentos e manejo foram idênticos ao realizado no experimento I (ver item 3.2.), a diferença do experimento II foi o tipo de solo, este apresentava textura argilosa e foi classificado como Latossolo Vermelho Distroférico (CARVALHO et al. 1983; SANTOS, 2018) com baixa fertilidade natural. A Tabela 3 apresenta os dados da análise química e granulométrica do solo utilizado nesse experimento.

Tabela 3 - Análise química (1) e granulométrica (2) do solo, antes da instalação do experimento. Experimento II.

pH	Presina	M.O.	Ca	Mg	H+Al	K	SB	CTC	Al ³⁺	
CaCl ₂	mg dm ⁻³	g dm ⁻³	mmolc dm ⁻³							
4,6	4	9	2	1	35	0,5	3	39	8	
Granulometria										
S	B	Cu	Fe	Mn	Zn	V%	Argila	Silte	Areia	Si
mg dm ⁻³						%		mg kg		
3	0,17	0,7	30	0,6	0,4	3	85,7	3,3	11,0	4

Metodologia: RAIJ et al. (2001) (1) e CLAESSEN (1997) (2)

Assim como o experimento I, antes da implantação realizou-se a correção da acidez do solo, elevando a saturação por bases a 70% com a utilização de calcário

dolomítico e a adubação de sementeira foi realizada de acordo com as recomendações de Raij et al. (1997), realizou-se a aplicação de N, P e K, tendo como fonte desses nutrientes uréia, superfosfato triplo e cloreto de potássio. O N foi aplicado na sementeira e os 15 dias após a emergência.

Os parâmetros avaliados nesse experimento foram os mesmos do experimento I. Altura da planta, número de folhas, índice relativo de clorofila (IRC), massa seca da parte aérea, folhas, colmo e raiz, estimativa de área foliar, análise nutricional da parte aérea, acúmulo de macro, micronutrientes e Si e análise de solo (pH, V%, H+Al, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu e Mn). A metodologia utilizada para avaliação desses parâmetros está apresentada no item 3.2.3.

A análise estatística utilizada também foi idêntica a realizada no experimento I (ver item 3.3).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Experimento I: Solo arenoso

4.1.1 Altura, número de folha, índice relativo de clorofila e área foliar

Não houve significância na interação entre os fatores (formas de aplicação de silício x aplicações combinadas e individuais de Zn e Si) para os parâmetros de altura, índice relativo de clorofila, número de folhas e área foliar. As formas de aplicação de Si apresentam diferença significativa apenas para o parâmetro de área foliar.

Observou-se maior incremento de área foliar quando o Si foi aplicado em área total e menor quando aplicado via sulco de semeadura (Tabela 4). Ma e Takahashi (2002) realizaram um estudo para verificar os possíveis sintomas de deficiência de Si em uma espécie gramínea e foi notado que na falta de Si ocorre redução da área foliar dessas plantas, o presente estudo mostrou que a aplicação de Si em área total contribuiu para maior incremento de área foliar.

Tabela 4- Altura, índice relativo de clorofila (IRC), número de folhas e área foliar (cm²) em função das formas de aplicação de Si no milho. Experimento I.

Formas de aplicação de Si (FA)	Variáveis			
	Altura	IRC	Nº de folhas	Área foliar
	cm planta	SPAD	Nº planta	cm ²
Sulco	63,10 ± 2,70 a	29,25 ± 1,26 a	6,47 ± 0,25 a	1923,20 ± 102,91 b
Foliar	66,75 ± 2,63 a	29,88 ± 0,89 a	6,44 ± 0,39 a	2015,98 ± 337,74 ab
Área Total	66,67 ± 3,48 a	28,63 ± 1,24 a	6,69 ± 0,29 a	2113,30 ± 104 a
FV			F	
FA	Ns	Ns	Ns	**
TRAT	**	*	Ns	**
FA X TRAT	Ns	Ns	Ns	Ns
CV (%)	10,73	8,74	11,33	11,69

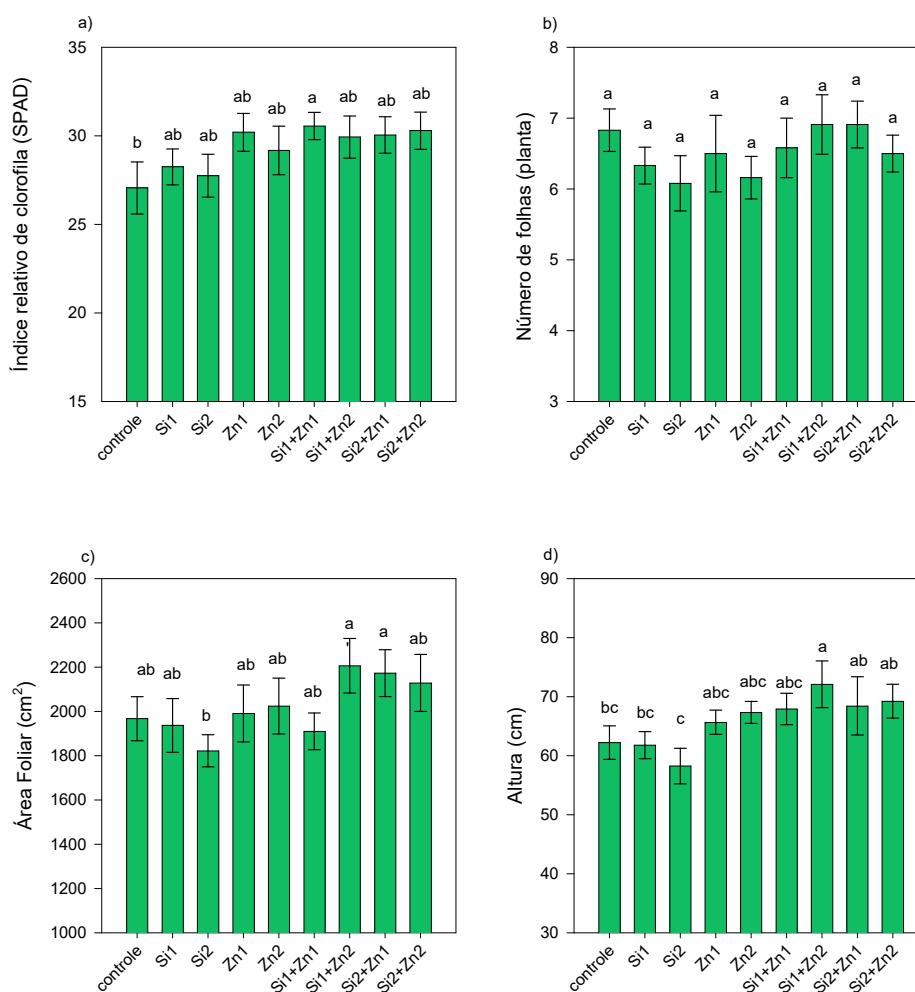
Médias seguidas da mesma letra não se diferenciam entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. CV= coeficiente de variação. TRAT = tratamentos combinados e individuais de Si e Zn. Valores após o sinal de ± indicam o erro padrão (n=4). **= significativo a 1% e 5%. * significativo a 5%. Ns= não significativo.

A Figura 2 apresenta os dados de índice relativo de clorofila (IRC) (Figura 2a), número de folhas (Figura 2b), área foliar (Figura 2c) e altura (Figura 2d) em função da aplicação dos tratamentos combinados e individuais de Si e Zn. Não houve diferença entre os tratamentos para a variável número de folhas, as demais variáveis apresentaram diferença significativa.

Houve maior incremento no IRC no tratamento Si1+Zn1 (30,56 SPAD) e este tratamento foi diferente do controle (27,06 SPAD). Os demais tratamentos não se

diferiram do controle e Si1+Zn1. Em experimento em condições de sistema hidropônico Mapodzeke et al. (2021) também observou aumento do IRC (valor do SPAD) em tratamentos combinados de Si e Zn, esse incremento no SPAD pode estar relacionado ao efeito benéfico do Zn e Si no metabolismo da planta, que conseqüentemente melhora a atividade fotossintética da planta (MAPODZEKE et al. 2018).

Figura 2- Índice relativo de clorofila (a), número de folhas (b), área foliar (c) e altura (d) em função dos tratamentos combinadas e individuais de Si e Zn. Experimento I.



Médias seguidas da mesma letra não se diferenciam entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. Barras de erro representam o erro padrão (n=4). Controle (sem aplicação de silício e zinco); Si1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si); Si2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si); Zn1 (aplicação de 20 mg kg⁻¹ de Zn); Zn2 (aplicação de 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn2 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si2+Zn1 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn) e Si2+Zn2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn) exceto quando o silício foi aplicado via foliar, no qual foi fornecido uma concentração de 2,56 e 7,68 mg de Si vaso⁻¹ para os tratamentos Si1 e Si2, respectivamente].

Para a variável área foliar pode ser observado maior média nos tratamentos

Si1+Zn2 e Si2+Zn1 (2206,080 cm² e 2172,80 cm², respectivamente). A menor média foi observada no tratamento Si2 (1822,15 cm²) e este tratamento diferiu-se dos tratamentos Si1+Zn2 e Si2+Zn1 e foi semelhante a todos os demais (Figura 2c). A área foliar é uma variável importante para observar o desenvolvimento das plantas, levando em consideração que esse parâmetro é fator determinante da quantidade de radiação solar que é retida para realização da fotossíntese (SOUZA et al., 2015).

Souza et al. (2015) percebeu aumento linear da área foliar das plantas de milho com a aplicação de silicato, enquanto Jamami et al. (2006) avaliaram o efeito de doses crescentes de Zn no aumento da área foliar do milho e não encontraram diferença da área foliar em função das doses de Zn. Isso indica que o Si pode ter contribuído para aumento do incremento de área foliar nos tratamentos.

A altura também foi influenciada pelos diferentes tratamentos, a menor altura foi notada no tratamento que recebeu a maior dose de silício (Si2) este apresentou média de 58,25 cm, e foi semelhante aos tratamentos controle, Si1, Zn1, Zn2 e Si1+Zn1. O maior incremento de altura pode ser observado no tratamento combinado Si1+Zn2, o qual apresentou média de 72,09 cm (Figura 2d). O incremento de altura das plantas de milho submetidas a alta concentração de Zn e menor concentração de Si indicou que o milho pode possuir uma resistência aos altos teores de Zn no solo e o Si pode ter contribuído para esse incremento de altura, além disso, foi reportado na literatura que o milho possui resistência a toxidade, mesmo sendo submetido a teores elevados de Zn no solo a cultura exibiu bom desenvolvimento (AHMED; LATIF, 2018).

4.1.2 Massa seca da parte aérea, raiz, folhas e colmo

A massa seca da parte aérea apresentou maior média quando o silício foi aplicado em área total (8,08 gramas) e menor média foi quando aplicado via sulco de semeadura (6,48 gramas), e a aplicação via foliar foi semelhante a ambas as formas de aplicação (Tabela 5).

A massa seca da raiz obteve maior média quando aplicado em área total (5,12 gramas) sendo diferente das demais formas de aplicação de Si. A forma de aplicação via sulco de semeadura apresentou menor média e não foi diferente da aplicação via foliar, estas apresentaram 4,34 e 4,43 gramas, respectivamente (Tabela 5). Com a aplicação de Si via sulco de semeadura as raízes possuem contato direto com uma maior concentração do fertilizante, enquanto quando o fertilizante é aplicado em área total ocorre o inverso, isso indicou que nas condições em que o experimento foi

realizado para incremento de massa seca da raiz é mais eficiente a incorporação do fertilizante ao invés de uma aplicação localizada.

Quando se avaliou as formas de aplicação de Si para a variável massa seca da folha, foi observado resultado semelhante ao da massa seca da parte aérea (Tabela 5), sendo obtido maior peso (5,70 gramas) quando aplicado em área total e menor quando aplicado via sulco de semeadura (4,60 gramas). A aplicação via foliar não apresentou diferença entre as demais formas de aplicação.

Tabela 5- Massa seca da parte aérea, raiz folhas e colmo em função das formas de aplicação de Si no milho. Experimento I.

Formas de aplicação de Si (FA)	Variáveis			
	MSPA	MSR	MSF	MSC
	g planta			
Sulco	6,48 ± 0,83 b	4,34 ± 0,52 b	4,60 ± 0,59 b	1,88 ± 0,27 b
Foliar	7,43 ± 0,92 ab	4,43 ± 0,47 b	5,14 ± 0,67 ab	2,29 ± 0,30 a
Área Total	8,08 ± 0,84 a	5,12 ± 0,63 a	5,70 ± 0,59 a	2,37 ± 0,27 a
FV	F			
FA	*	**	*	*
TRAT	*	**	**	*
FAX TRAT	Ns	Ns	Ns	Ns
CV (%)	26,23	25,48	26,59	29,29

Médias seguidas da mesma letra não se diferenciam entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. MSPA= massa seca parte aérea; MSR= massa seca da raiz; MSF=massa seca das folhas; MSC= massa seca do colmo. CV= coeficiente de variação. TRAT = tratamentos combinados e individuais de Si e Zn. Valores após o sinal de ± indicam o erro padrão (n=4). **= significativo a 1% e 5%. * significativo a 5%. Ns= não significativo.

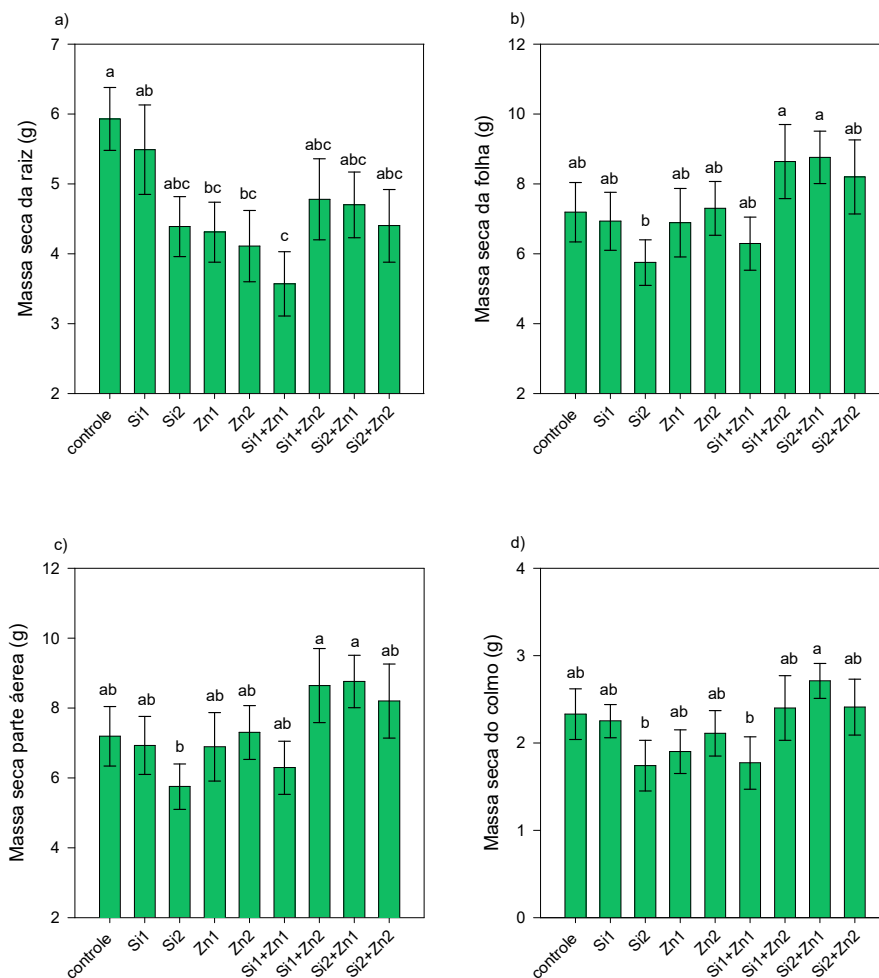
Na variável massa seca do caule as aplicações via foliar e área total apresentaram as maiores médias 2,29 e 2,37 gramas, respectivamente. A menor média foi observada quando aplicada via sulco de semeadura onde obteve-se média de 1,88 gramas, sendo diferente das demais formas de aplicação (Tabela 5).

Barbosa et al. (2008) avaliaram o efeito de formas de aplicação de silicato de Ca e Mg nos incrementos de massa seca da folha e do caule na cultura do sorgo e as aplicações via sulco de semeadura ou em área total não apresentaram incrementos diferentes, isso indica que a resposta da adubação com silicato de potássio pode ser influenciada pelas formas de aplicação ou que o milho possui resposta diferente do sorgo em função das diferentes formas de aplicação de Si.

A Figura 3 apresenta graficamente as variáveis analisadas em função da aplicação dos tratamentos de combinados de Si e Zn. Houve diferença entre os tratamentos para os parâmetros de massa seca da parte aérea, raiz, caule e folhas.

Na Figura 3a foi possível notar os efeitos negativos causados pelo excesso de zinco na massa seca da raiz. O maior peso de massa seca da raiz foi observado no tratamento controle o qual apresentou peso médio de 5,93 gramas e este diferenciou-se dos tratamentos Zn1, Zn2 e Si1+Zn1.

Figura 3- Massa seca da raiz (a), massa seca das folhas (b), massa seca da parte aérea (c) e massa seca do colmo (d) em função dos tratamentos combinados e individuais de Zn e Si. Experimento I.



Médias seguidas da mesma letra não se diferenciam entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. Barras de erro representam o erro padrão (n=4). Controle (sem aplicação de silício e zinco); Si1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si); Si2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si); Zn1 (aplicação de 20 mg kg⁻¹ de Zn); Zn2 (aplicação de 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn2 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si2+Zn1 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn) e Si2+Zn2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn) exceto quando o silício foi aplicado via foliar, no qual foi fornecido uma concentração de 2,56 e 7,68 mg de Si vaso⁻¹ para os tratamentos Si1 e Si2, respectivamente].

O menor peso foi observado no tratamento combinado Si1+Zn1, apresentando peso médio de 3,57 gramas, e este foi diferente dos tratamentos controle e Si1. Isso indicou que a combinação da concentração menor de Si combinada com a concentração intermediária de Zn (Si1+Zn1) afeta negativamente a massa seca da raiz (Figura 3a).

As demais combinações de Si com o Zn trouxeram aumento da massa seca da raiz. Bokor et al. (2014) realizaram um experimento em sistema hidropônico e notaram que a combinação de Si e Zn afeta negativamente a massa seca das raízes das plantas de milho.

Percebeu-se efeito positivo do Si na atenuação do excesso de zinco na massa seca das folhas (Figura 3b), os tratamentos Si1+Zn2 e Si2+Zn1 apresentaram maior peso, com média de 6,64 e 6,05 gramas, respectivamente. O tratamento que recebeu a concentração maior de Si (Si2) possuiu menor média de massa seca das folhas (4,01 g). O comportamento dos tratamentos de massa seca da parte aérea foi semelhante ao da massa seca das folhas (Figura 3c). Os tratamentos Si1+Zn2 e Si2+Zn1 apresentaram maior média de massa seca, 8,64 e 8,76 gramas, respectivamente e a menor média de peso da massa seca da parte aérea pôde ser notada no tratamento Si2 (5,75 g).

Na massa seca do colmo foi notado maior média de peso no tratamento combinado Si2+Zn1, o qual apresentou 2,17 g e foi diferente dos tratamentos Si2, Si1+Zn1 e Si1+Zn2. O menor peso da massa seca do colmo, seguiu o comportamento das variáveis anteriores (Figura 3b e 3c), onde o tratamento Si2 apresentou menor média de massa seca (1,74 g), diferindo-se apenas do tratamento Si2+Zn1. Em experimento avaliando doses de Si na cultura do milho não foi verificada redução da massa seca da parte aérea das plantas de milho em solo Neossolo quartzarenico Órtico latossólico (SILVA et al, 2010).

4.1.3 Teor e acúmulo de silício e zinco na parte aérea

4.1.3.1 Teor e acúmulo de silício na parte aérea

Houve interação significativa para os fatores formas de aplicação de Si e tratamentos combinados e individuais de Si e Zn no teor de Si da parte aérea de plantas de milho. Também não existiu diferença entre as formas de aplicação nos tratamentos controle, Si1, Si2, Zn1, Zn2 e Si2+Zn2 para o parâmetro teor de Si na parte aérea. Os demais apresentaram diferença entre as formas de aplicação (Tabela 6).

O tratamento Si1+Zn1 apresentou diferença no teor de Si da parte aérea dentro das formas de aplicação. A aplicação via foliar proporcionou maior teor de silício para

a parte aérea (15,19 g kg⁻¹), sendo diferente das demais formas de aplicação de Si. A aplicação em área total apresentou menor teor com média de 6,13 g kg⁻¹ (Tabela 6).

O tratamento Si1+Zn2 dentro das formas de aplicação apresentou maior teor de Si quando foi aplicado via sulco de semeadura, atingindo um teor de 12,27 g kg⁻¹ de Si e diferiu-se das demais formas de aplicação. As menores médias de teor de Si foi verificada com a aplicação via foliar e em área total com médias de 9,18 e 6,65 g kg⁻¹ de Si na parte aérea, respectivamente (Tabela 6).

Tabela 6- Desdobramento do teor de Si na parte aérea em função das formas de aplicação e tratamentos combinados e individuais de Si e Zn no milho. Experimento I.

Tratamentos	Teor de Si (g kg ⁻¹)		
	Sulco	Foliar	Área total
Controle	1,50 ± 0,18 aC	1,57 ± 0,18 aB	1,56 ± 0,11 aD
Si1	11,12 ± 0,45 aB	9,77 ± 1,29 aA	9,57 ± 0,30 aAB
Si2	9,69 ± 0,32 aB	9,20 ± 0,37 aA	8,32 ± 0,51 aAB
Zn1	2,85 ± 0,90 aC	1,75 ± 0,32 aB	2,85 ± 0,90 aCD
Zn2	1,75 ± 0,09 aC	1,42 ± 0,29 aB	1,77 ± 0,81 aD
Si1+Zn1	15,19 ± 1,66 aA	10,52 ± 0,47 bA	6,13 ± 0,89 cBC
Si1+Zn2	12,27 ± 0,21 aAB	9,18 ± 0,12 bA	6,65 ± 1,37 cAB
Si2+Zn1	12,37 ± 0,37 aAB	10,23 ± 0,37 abA	8,31 ± 1,64 bA
Si2+Zn2	11,02 ± 0,41 aB	10,29 ± 1,98 aA	8,94 ± 0,66 aAB
FV		F	
FA		**	
TRAT		**	
FAX TRAT		**	
CV (%)		22,02	

Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não se diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. CV= coeficiente de variação. Valores após o sinal de ± indicam o erro padrão (n=4). TRAT= tratamentos combinados e individuais de Si e Zn. FA= Formas de aplicação. **= significativo a 1% e 5%. * significativo a 5%. Ns= não significativo. Controle (sem aplicação de silício e zinco); Si1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si); Si2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si); Zn1 (aplicação de 20 mg kg⁻¹ de Zn); Zn2 (aplicação de 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn2 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si2+Zn1 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn) e Si2+Zn2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn) exceto quando o silício foi aplicado via foliar, no qual foi fornecido uma concentração de 2,56 e 7,68 mg de Si vaso⁻¹ para os tratamentos Si1 e Si2, respectivamente].

Por fim, quando foi observado as formas de aplicação dentro do tratamento Si2+Zn1, a maior média de Si na parte aérea foi verificada com a aplicação via sulco de semeadura (12,37 g kg⁻¹) e esta foi diferente da aplicação em área total. A aplicação via foliar de Si foi semelhante as demais formas de aplicação (Tabela 6). Com esse resultado foi possível perceber que o teor de Si na parte aérea das plantas de milho

sofreu influência das formas de aplicação de Si somente quando essas plantas estavam submetidas as concentrações de Zn.

Verificando os tratamentos combinados e individuais de Si e Zn dentro da aplicação via sulco de semeadura foi notado maior média de Si na parte aérea das plantas de milho no tratamento Si1+Zn1, o qual obteve média de 15,19 g kg⁻¹ de Si, esse tratamento se assemelhou apenas dos tratamentos combinados Si2+Zn1 e Si1+Zn2. Notou-se a menor média no tratamento controle (1,50 g kg⁻¹) e esse foi semelhante aos teores encontrados em Zn1 e Zn2 (Tabela 6). Quando comparado apenas os tratamentos Si2 e Si1, houve semelhança entre os teores de Si na parte aérea. Os tratamentos combinados Si1+Zn2, Si2+Zn1 e Zn2+Zn2, não diferiram entre si, o que aponta que a planta de milho absorve o Si mesmo quando é submetida a concentrações elevadas de Zn (Tabela 6).

Avaliando os tratamentos combinados e individuais de Si e Zn dentro da aplicação via foliar (Tabela 6) verifica-se que o tratamento combinado Si1+Zn1 apresentou maior teor de silício na parte aérea (10,52 g kg⁻¹ de Si) e este tratamento diferenciou-se apenas dos tratamentos controle, Zn1 e Zn2. Os menores teores de silício na parte aérea ocorreram nos tratamentos controle, Zn1 e Zn2. Quando comparado as duas doses de Si individualmente não houve diferença entre elas na absorção de Si. Quando comparado somente os tratamentos combinados com Si e Zn foi verificado comportamento diferente da via sulco e via área total. Os tratamentos Si1+Zn1, Si1+Zn2, Si2+Zn1 e Si2+Zn2 não diferiram entre si e foram semelhantes aos tratamentos individuais de Si.

Observando o efeito dos tratamentos combinados e individuais de Si e Zn dentro da aplicação em área total foi possível notar que o tratamento que apresentou maior média foi o Si2+Zn1, este apresentou média de 10,23 g kg⁻¹ de Si e se diferenciou do controle, Zn1, Zn2 e Si1+Zn1. A menor média foi observada no tratamento controle com média de 1,56 g kg⁻¹ de Si e este foi semelhante aos tratamentos Zn1 e Zn2.

Barbosa et al. (2008) verificaram o efeito de doses de silicato de Ca e Mg e formas de aplicação (sulco de semeadura e área total) no aumento do teor de Si nas plantas de sorgo e verificaram aumento linear independente das formas de aplicação, diferente do obtido nesse trabalho, onde houve diferença dos teores de Si em função das formas de aplicação de Si e ainda se verificou que houve aumento do teor de Si na parte aérea das plantas de milho submetidas as concentrações de Zn, mesmo não

apresentando diferença significativa com os teores encontrados no tratamento com maior concentração de Si (Si2).

Houve interação entre as formas de aplicação de Si e tratamentos combinados e individuais de Si e Zn no acúmulo de Si na parte aérea das plantas de milho. Comparando as formas de aplicação de Si (FA) dentro de cada tratamento (TRAT) houve diferença entre as formas de aplicação de Si apenas no tratamento combinado com Si1+Zn1 (Tabela 7).

Tabela 7- Desdobramento do acúmulo de Si na parte aérea em função das formas de aplicação e tratamentos combinados e individuais de Si e Zn no milho. Experimento I.

Tratamentos	Acúmulo de Si (mg planta ⁻¹)		
	Sulco	Foliar	Área total
Controle	8,81 ± 1,63 aB	11,38 ± 1,40 aB	12,83 ± 3,33 aE
Si1	63,55 ± 4,53 aA	75,50 ± 25,12 aA	70,10 ± 13,13 aABC
Si2	56,48 ± 14,24 aAB	53,50 ± 2,56 aAB	46,34 ± 7,69 aBCDE
Zn1	15,55 ± 7,77 aB	12,00 ± 1,63 aB	28,19 ± 13,75 aCDE
Zn2	12,57 ± 2,21 aB	8,54 ± 2,37 aB	16,51 ± 9,27 aDE
Si1+Zn1	97,66 ± 15,25 aA	84,96 ± 15,46 aA	34,55 ± 4,85 bCDE
Si1+Zn2	84,27 ± 13,17 aA	86,84 ± 20,45 aA	63,34 ± 15,54 aABCD
Si2+Zn1	103,41 ± 14,02 aA	68,57 ± 5,54 aA	101,07 ± 17,73 aA
Si2+Zn2	75,06 ± 15,57 aA	85,00 ± 21,28 aA	86,87 ± 11,70 aAB
FV		F	
FA		Ns	
TRAT		**	
FA X TRAT		*	
CV (%)		39,46	

Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não se diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. CV= coeficiente de variação. Valores após o sinal de ± indicam o erro padrão (n=4). TRAT= tratamentos combinados e individuais de Si e Zn. FA= Formas de aplicação. **= significativo a 1% e 5%. * significativo a 5%. Ns= não significativo. Controle (sem aplicação de silício e zinco); Si1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si); Si2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si); Zn1 (aplicação de 20 mg kg⁻¹ de Zn); Zn2 (aplicação de 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn2 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si2+Zn1 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn) e Si2+Zn2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn) exceto quando o silício foi aplicado via foliar, no qual foi fornecido uma concentração de 2,56 e 7,68 mg de Si vaso⁻¹ para os tratamentos Si1 e Si2, respectivamente].

O tratamento Si1+Zn1 trouxe maior incremento no acúmulo de Si quando este foi aplicado via sulco de semeadura ou via foliar, com incrementos de 97,65 e 84,96 mg planta⁻¹ de Si, respectivamente. Possivelmente o acúmulo de Si foi maior com essas duas aplicações por conta de o contado direto da raiz-íon no sulco de semeadura ser maior do que em área total, uma vez que o fertilizante se espalha em uma maior área. E na aplicação foliar as folhas também tem contato direto. Entretanto

a diferença entre as formas de aplicação de Si para incremento do acúmulo de Si não foi constante em todos os tratamentos (tabela 7).

Os tratamentos dentro das formas de aplicação de Si via sulco, foliar e em área total apresentaram diferença significativa. Quando se comparou os tratamentos combinados de Si e Zn dentro da aplicação via sulco de semeadura notou-se maior incremento no acúmulo de Si no tratamento Si2+Zn1(103,41 mg planta⁻¹) e este não foi diferente dos tratamentos Si1+Zn1, Si1+Zn2, Si2+Zn2, Si1 e Si2. O menor incremento de acúmulo de Si foi notado no tratamento controle (8,81 mg planta⁻¹) e este foi semelhante aos tratamentos Zn1, Zn2 e Si2 (Tabela 7).

A aplicação via foliar de Si contribuiu para maior acúmulo de Si no tratamento Si1+Zn2(86,84 mg planta⁻¹), o qual foi semelhante do acumulado nos tratamentos Si1, Si2, Si1+Zn1, Si2+Zn1 e Si2+Zn2. O menor incremento de acúmulo de Si foi obtido no tratamento Zn2 (8,54 mg planta⁻¹) e não foi diferente do acumulado nos tratamentos controle, Si2 e Zn1 (Tabela 7).

Quando comparado os tratamentos dentro da forma de aplicação de Si em área total foi possível notar maior acumulação de Si na parte aérea das plantas de milho no tratamento Si2+Zn1 com acúmulo de 101,07 mg planta⁻¹ de Si, e este foi parecido com o acumulado nos tratamentos Si1+Zn2, Si2+Zn2 e Si1. A menor acumulação de Si ocorreu no tratamento controle, o qual apresentou acúmulo médio de 12,83 mg planta⁻¹ de Si e não foi diferente do acumulado nos tratamentos Si2, Zn1, Zn2 e Si1+Zn1 (Tabela 7).

Zajaczkowaska, Korzeniowska e Cholewa (2020) realizaram experimento semelhante com a cultura do trigo e esses autores verificaram que houve aumento no acúmulo de Si na parte nos tratamentos que receberam aplicação de Si via solo (aplicação de 200 e 400 mg kg⁻¹ de Si), entretanto quando foi aplicado via foliar (2 e 6 mM L⁻¹ de Si) o acúmulo de Si foi baixo, diferente do encontrado neste trabalho, no qual o acúmulo de Si nos tratamentos que receberam Si apresentou acúmulo de Si superior aos que não receberam aplicação de Si.

Bokor et al. (2014) realizou experimento em sistema hidropônico e notou que o Si aplicado contribuiu no incremento de acúmulo de Si em plantas de milho e a maior concentração de Si na solução combinada com Zn apresentou redução no acúmulo de Si no milho. Essa redução do acúmulo de Si na parte área também foi notada neste experimento quando o Si foi aplicado em sulco de semeadura o tratamento combinado Si2+Zn2 apresentou uma das menores médias. Os mesmos autores citados acima

comentaram que esse efeito pode estar ligado a atividade das enzimas antioxidativas, entretanto, isso não foi o alvo de estudo deste presente trabalho.

4.1.3.1 Teor e acúmulo de zinco na parte aérea

A interação entre as formas de aplicação de silício (FA) e tratamentos combinados ou individuais de Si e Zn (TRAT) não foi significativa para o teor e acúmulo de Zn na parte aérea das plantas de milho (Tabela 8). Para o efeito isolado houve efeito significativo somente para o fator tratamentos combinados ou individuais de Si e Zn (Figura 4).

Tabela 8- Teor e acúmulo de zinco na parte aérea em função das formas de aplicação de Si no milho. Experimento I.

Formas de aplicação de Si(FA)	Teor		Acúmulo
	Zn		
	mg kg ⁻¹		µg planta ⁻¹
Via sulco	23,19 ± 2,07 a		150,54 ± 29,83 a
Via foliar	24,50 ± 2,27 a		161,74 ± 31,99 a
Área total	24,86 ± 2,90 a		188,60 ± 22,43 a
FV	F		F
FA	Ns		Ns
TRAT	**		**
FA X TRAT	Ns		Ns
CV (%)	28,15		40,68

Médias seguidas da mesma letra não se diferenciam entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. CV= coeficiente de variação. TRAT = tratamentos combinados e individuais de Si e Zn. Valores após o sinal de ± indicam o erro padrão (n=4). **= significativo a 1% e 5%. * significativo a 5%. Ns= não significativo.

Notou-se maior teor de zinco na parte aérea no tratamento Si1+Zn2, (54,58 mg kg⁻¹ de Zn), e foi semelhante ao tratamento Zn2, que recebeu concentração alta de zinco (60 mg kg⁻¹ de Zn), esse comportamento indica que a concentração menor de Si, não foi eficiente para a redução da absorção de zinco pelas plantas de milho. A menor absorção de zinco ocorreu com a aplicação do tratamento Si1 que chegou ao teor médio de 8,91 mg kg⁻¹ de Zn, este tratamento foi semelhante ao controle, Si2, Si1+Zn1, e Si2+Zn1 (Figura 4a).

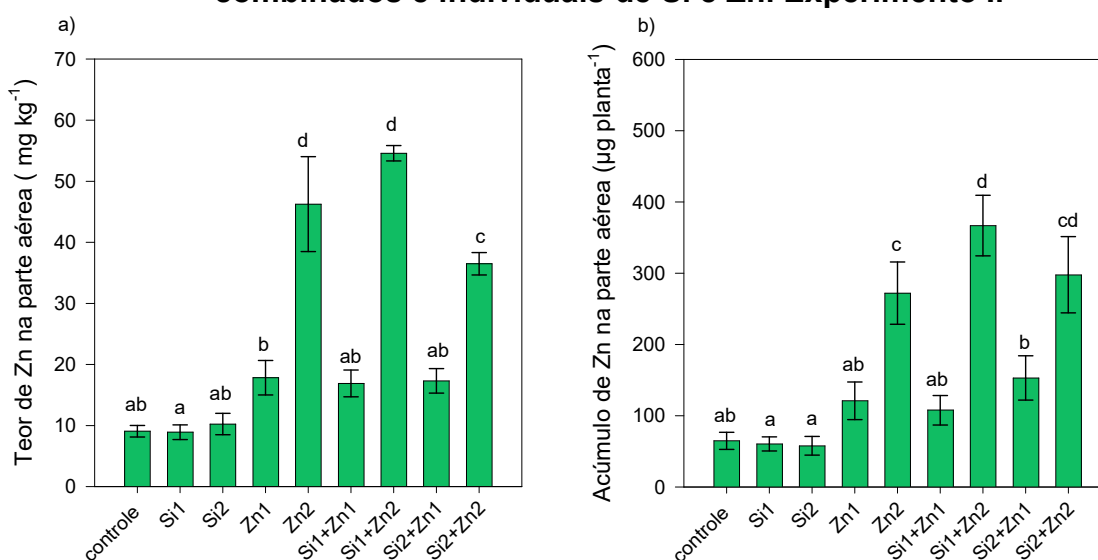
O tratamento que recebeu a concentração intermediária de Zn (Zn1) apresentou teor de zinco semelhante ao controle, expondo que a concentração de 20 mg kg⁻¹ de Zn aplicadas em solo arenoso não aumenta os teores de zinco na parte aérea das

plantas de milho. Os teores de zinco nos tratamentos combinados de Si1+Zn1 e Si2+Zn1 foi semelhante ao tratamento Zn1 (Figura 4a).

Observando o tratamento Si2+Zn2, este comportou-se diferente de todos os demais tratamentos, sendo possível notar que a aplicação de Si em concentração alta contribuiu para a redução dos teores de zinco na parte aérea das plantas de milho, quando a planta foi submetida a concentração alta de zinco (Figura 4a).

O menor incremento de acúmulo de Zn foi observado no tratamento Si2 (57,96 $\mu\text{g planta}^{-1}$) e este assemelhou-se aos tratamentos controle, Si1, Zn1 e Si1+Zn1. O tratamento Zn1 foi semelhante ao controle e isso indicou que a concentração de 20 mg kg^{-1} de Zn no solo não ocasiona alto acúmulo de Zn na parte aérea das plantas de milho (Figura 4b).

Figura 4- Teor (a) e acúmulo (b) de zinco (Zn) em função dos tratamentos combinados e individuais de Si e Zn. Experimento I.



Médias seguidas da mesma letra não se diferenciam entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. Barras de erro representam o erro padrão (n=4). Controle (sem aplicação de silício e zinco); Si1 (aplicação de 30 mg kg^{-1} de Si); Si2 (aplicação de 120 mg kg^{-1} de Si); Zn1 (aplicação de 20 mg kg^{-1} de Zn); Zn2 (aplicação de 60 mg kg^{-1} de Zn); Si1+Zn1 (aplicação de 30 mg kg^{-1} de Si e 20 mg kg^{-1} de Zn); Si1+Zn2 (aplicação de 30 mg kg^{-1} de Si e 60 mg kg^{-1} de Zn); Si2+Zn1 (aplicação de 120 mg kg^{-1} de Si e 20 mg kg^{-1} de Zn) e Si2+Zn2 (aplicação de 120 mg kg^{-1} de Si e 60 mg kg^{-1} de Zn) exceto quando o silício foi aplicado via foliar, no qual foi fornecido uma concentração de 2,56 e 7,68 $\text{mg de Si vaso}^{-1}$ para os tratamentos Si1 e Si2, respectivamente].

O tratamento Zn1 também foi semelhante aos tratamentos Si1+Zn1 e Si2+Zn1. O maior incremento no acúmulo de Zn foi notado no tratamento Si1+Zn2 (366,96 $\mu\text{g planta}^{-1}$), e esse acúmulo foi superior à média acumulada no tratamento individual de Zn2 (272,26 $\mu\text{g planta}^{-1}$), apontando que o tratamento Si1+Zn2 contribuiu para maior acumulação de Zn, isso indicou que o Si1 não reduziu a acumulação de Zn na parte

das plantas de milho. O tratamento Si₂+Zn₂ assemelhou-se a média de Zn acumulado no tratamento Zn₂ (Figura 4b).

Bokor et al. (2014) verificaram em experimento com tratamentos semelhantes realizado em condição de sistema hidropônico com plantas de milho redução do acúmulo de Zn na parte aérea quando foi aplicada a maior concentração de Si. Este resultado foi contraditório ao observado neste trabalho, onde foi possível notar que houve um aumento do acúmulo de Zn nas plantas submetidas a aplicação de Si e Zn combinados.

Outro trabalho avaliando o silício na redução da concentração de Zn nas plantas de trigo cultivadas em solo verificou resultado diferente. Foi verificado redução do acúmulo de Zn na parte aérea das plantas de trigo, entretanto as concentrações de Si utilizada por esses autores foram superiores as utilizadas neste trabalho (ZAJACZKOWASKA; KORZENIOWSKA; CHOLEWA, 2020).

Rizwan et al. (2016) observaram o efeito do silício no alívio de Cd em plantas de trigo duro em condições de hidroponia e verificaram indiretamente o efeito do Si no acúmulo de Zn. Esses autores não notaram redução do acúmulo de Zn com aplicação de Si em condições de hidroponia, corroborando com esse presente estudo em solo arenoso.

4.1.4 Teores e acúmulo de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (B, Cu, Fe e Mn) da parte aérea.

Nas condições em que o experimento foi conduzido os teores e acúmulo de macronutrientes na parte aérea ocorreram em ordem decrescente da seguinte forma: N>K>Ca>Mg>S>P. Enquanto os micronutrientes apresentaram a seguinte sequência: Fe>Mn>B>Cu.

Houve diferença significativa entre as formas de aplicação de Si para os teores e acúmulo de N e para o P houve diferença somente no acúmulo da parte aérea do milho. Verificando o fator tratamentos combinados e individuais de Si e Zn para o N houve diferença apenas para os teores, enquanto o fósforo apresentou diferença no acúmulo e teor (Tabela 9).

O teor e acúmulo de N na parte aérea foi maior quando o Si foi aplicado via sulco de semeadura, o menor teor de N foi notado quando o Si foi aplicado em área total e a aplicação via foliar foi semelhante as demais formas de aplicação de Si. Wallace, Romney e Mueller (1976) identificaram que o ácido monossilício (H₄SiO₄) e o nitrato

(NO₃⁻) competem pelos mesmos sítios de absorção, ou seja, o Si pode reduzir a absorção de N, e o inverso também é verdadeiro. A aplicação em área total de Si pode ter causado esse efeito de antagonismo. Na aplicação de Si via sulco de semeadura essa interação negativa foi menor.

Tabela 9- Teor e acúmulo de N e P da parte aérea em função das formas de aplicação de Si e dos tratamentos combinados de Si e Zn no milho. Experimento I.

Formas de aplicação (FA)	N		P	
	Teor g kg ⁻¹	Acúmulo mg planta ⁻¹	Teor g kg ⁻¹	Acúmulo mg planta ⁻¹
Via sulco	19,44 ± 0,80 a	124,14 ± 13,54 b	1,06 ± 0,02 a	6,81 ± 0,85 b
Via foliar	18,92 ± 0,99 ab	137,77 ± 15,63 ab	1,10 ± 0,04 a	8,18 ± 1,11 a
Área total	18,08 ± 0,71 b	142,90 ± 13,49 a	1,10 ± 0,05 a	9,02 ± 1,13 a
Tratamentos				
Controle	19,29 ± 0,60 abc	138,37 ± 16,39 a	1,16 ± 0,07 a	8,40 ± 1,28 ab
Si1	20,19 ± 1,14 ab	136,58 ± 10,72 a	1,15 ± 0,05 a	8,06 ± 1,16 ab
Si2	20,59 ± 0,78 a	117,95 ± 14,02 a	1,09 ± 0,04 a	6,35 ± 0,74 b
Zn1	18,74 ± 0,72 abc	127,15 ± 18,47 a	1,12 ± 0,02 a	7,79 ± 1,16 ab
Zn2	18,62 ± 0,50 abc	134,38 ± 11,73 a	1,07 ± 0,03 ab	7,83 ± 0,86 ab
Si1+Zn1	19,30 ± 0,98 abc	120,14 ± 11,51 a	1,06 ± 0,03 ab	6,66 ± 0,71 ab
Si1+Zn2	17,80 ± 0,79 bc	149,66 ± 15,39 a	1,09 ± 0,03 a	9,41 ± 1,05 a
Si2+Zn1	16,82 ± 0,84 c	145,95 ± 9,97 a	0,97 ± 0,03 b	8,54 ± 0,91 ab
Si2+Zn2	17,94 ± 1,17 bc	144,26 ± 20,25 a	1,08 ± 0,04 ab	8,98 ± 1,37 ab
FV		F		
FA	*	*	Ns	**
TRAT	**	Ns	**	*
FA X TRAT	Ns	Ns	Ns	Ns
CV (%)	10,27	23,84	8,54	28,76

Médias seguidas da mesma letra não se diferenciam entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. CV= coeficiente de variação. TRAT = tratamentos combinados e individuais de Zn e Si. Valores após o sinal de ± indicam o erro padrão (n=4). **= significativo a 1% e 5%. * significativo a 5%. Ns= não significativo. Controle (sem aplicação de silício e zinco); Si1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si); Si2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si); Zn1 (aplicação de 20 mg kg⁻¹ de Zn); Zn2 (aplicação de 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn2 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si2+Zn1 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn) e Si2+Zn2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn) exceto quando o silício foi aplicado via foliar, no qual foi fornecido uma concentração de 2,56 e 7,68 mg de Si vaso⁻¹ para os tratamentos Si1 e Si2, respectivamente].

O maior teor de N ocorreu no tratamento Si2 e o menor no Si2+Zn1, isso indica que a concentração de Zn intermediária no solo pode ter reduzido a absorção de N pelas plantas de milho, entretanto, isso não foi confirmado no acúmulo de N. Comparando o tratamento Si2+Zn1 com os demais tratamentos, este foi diferente apenas do tratamento onde foi aplicado maior concentração de Si (Si2) (Tabela 9).

Verificando os teores de P da parte aérea nota-se que o menor teor foi encontrado no tratamento combinado Si2+Zn1. Os tratamentos controle, Si1, Si2 e Zn1 apresentaram as maiores médias. Esse comportamento foi diferente do acúmulo do acúmulo de P, onde o menor acúmulo foi notado no tratamento individual Si2 e o maior no tratamento Si1+Zn1 (Tabela 9).

Acreditava-se que os tratamentos onde se aplicou Si apresentaria maiores teores e acúmulo de P, levando em consideração que a literatura reporta que o Si pode tornar o fósforo adsorvido pelos coloides de argila disponível (PRADO; FERNANDES, 2001). Possivelmente esse efeito ocorre em menor frequência em solos arenosos.

A interação entre as formas de aplicação de Si e os tratamentos combinados e individuais de Si e Zn apresentou significância para o teor e acúmulo de K na parte aérea (Tabelas 10 e 11). Verificando os tratamentos controle, Si1, Zn1, Zn2, Si1+Zn1, Si1+Zn2 dentro das formas de aplicação de Si não foi verificada diferença em relação aos teores de K. Comparando as formas de aplicação de Si dentro do tratamento de Si2, houve maior incremento do teor de K quando a aplicação foi realizada em área total e via sulco de semeadura, apresentando médias de 19,45 e 16,86 g kg⁻¹ de K (Tabela 10).

O mesmo comportamento foi observado quando comparado os tratamentos Si2+Zn1 e Si2+Zn2. Possivelmente o aumento dos teores de K nesses tratamentos em função da forma de aplicação de Si foi devido o fornecimento de Si indireto com a aplicação do tratamento de 120 mg kg⁻¹ de Si, as parcelas onde foi aplicado esse tratamento receberam maior quantidade de K, devido a presença de K no silicato de potássio (Tabela 10).

Comparando os tratamentos combinados e individuais de Si e Zn dentro da forma de aplicação via sulco de semeadura notou-se maior incremento no teor de K com a aplicação do tratamento Si2 (16,86 g kg⁻¹) e menor com a aplicação do Si1+Zn2 (11,10 g kg⁻¹). A aplicação de Si1 não contribuiu para maiores teores de K na parte aérea. Quando os tratamentos foram aplicados combinados com Si2+Zn1 e Si2+Zn2 o incremento foi parecido com o Si2. As combinações Si1+Zn1 e Si1+Zn2 foram semelhantes ao controle na absorção de K. Os teores de K nos tratamentos somente com Zn foram semelhantes entre si e ao controle (Tabela 10).

Quando verificado o incremento de K dos tratamentos dentro da forma de aplicação via foliar não foi notado diferença entre os teores de K (Tabela 10). Avaliando os tratamentos dentro da forma de aplicação em área total houve maior

aumento no teor de K quando aplicado o tratamento Si2 (19,45 g kg⁻¹) e menor com aplicação do tratamento combinado Si1+Zn2 (9,25 g kg⁻¹). Os tratamentos Zn1, Zn2, Si1, Si1+Zn1, Si1+Zn2 tiveram teores de K semelhantes ao controle (Tabela 10).

Tabela 10- Desdobramento do teor de K na parte aérea em função das formas de aplicação de aplicação e tratamentos combinados e individuais de Si e Zn no milho. Experimento I.

Tratamentos	Teor de K (g kg ⁻¹)		
	Sulco	Foliar	Área total
Controle	12,52 ± 0,56 aBC	11,20 ± 1,27 aA	10,55 ± 0,74 aCD
Si1	11,72 ± 0,21 aC	11,32 ± 0,53 aA	10,77 ± 0,96 aCD
Si2	16,86 ± 0,32 aA	13,15 ± 0,75 bA	19,45 ± 0,22 aA
Zn1	14,42 ± 0,99 aABC	13,92 ± 0,83 aA	13,90 ± 0,90 aBC
Zn2	12,30 ± 1,00 aBC	13,15 ± 1,16 aA	10,70 ± 0,78 aCD
Si1+Zn1	11,85 ± 1,38 aC	11,92 ± 0,70 aA	12,25 ± 0,66 aBCD
Si1+Zn2	11,10 ± 0,87 aC	10,70 ± 1,27 aA	9,25 ± 0,54 aD
Si2+Zn1	15,95 ± 1,41 aAB	11,07 ± 0,26 bA	15,20 ± 0,97 aB
Si2+Zn2	16,26 ± 0,63 aAB	12,12 ± 0,72 bA	15,87 ± 0,90 aAB
FV		F	
FA		**	
TRAT		**	
FAX TRAT		**	
CV (%)		13,94	

Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não se diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. CV= coeficiente de variação. Valores após o sinal de ± indicam o erro padrão (n=4). TRAT= tratamentos combinados e individuais de Si e Zn. FA= Formas de aplicação. **= significativo a 1% e 5%. * significativo a 5%. Ns= não significativo. Controle (sem aplicação de silício e zinco); Si1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si); Si2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si); Zn1 (aplicação de 20 mg kg⁻¹ de Zn); Zn2 (aplicação de 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn2 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si2+Zn1 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn) e Si2+Zn2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn) exceto quando o silício foi aplicado via foliar, no qual foi fornecido uma concentração de 2,56 e 7,68 mg de Si vaso⁻¹ para os tratamentos Si1 e Si2, respectivamente].

Provavelmente os maiores incrementos de K na parte aérea das plantas de milho ocorreu através do fornecimento de K indireto através da aplicação da maior concentração de Si, mas também foi verificado redução dos teores de K da parte aérea das combinações de Si em concentração menor e de Zn em ambas as dosagens.

Observando individualmente cada tratamento dentro das formas de aplicação de Si, somente os tratamentos Si2+Zn1 e Si2+Zn2 apresentaram diferença quanto ao acúmulo de K, os demais apresentaram médias semelhantes quanto as formas de aplicação de Si. No tratamento Si2+Zn1 o maior incremento no acúmulo de K foi notado quando o Si foi aplicado em área total, não diferindo-se da aplicação via sulco de semeadura, por sua vez, a aplicação foliar de Si possui menor média no acúmulo de K. O tratamento Si2+Zn2 obteve maior acúmulo de K quando o Si foi aplicado em

área total e o menor incremento de acúmulo foi notado quando foi aplicado Si via foliar (Tabela 11).

Tabela 11- Desdobramento do acúmulo de K na parte aérea em função das formas de aplicação de aplicação e tratamentos combinados e individuais de Si e Zn no milho. Experimento I.

Tratamentos	Acúmulo de K (mg planta ⁻¹)		
	Sulco	Foliar	Área total
Controle	73,83 ± 8,99 aBC	78,73 ± 4,71 aA	84,95 ± 5,75 aC
Si1	66,56 ± 2,14 aC	85,96 ± 10,36 aA	76,46 ± 3,81 aC
Si2	95,78 ± 11,77 aABC	76,49 ± 4,78 aA	94,67 ± 12,27 aBC
Zn1	71,38 ± 6,59 aBC	101,15 ± 16,25 aA	93,71 ± 9,18 aC
Zn2	88,49 ± 6,62 aABC	79,93 ± 8,21 aA	88,49 ± 9,34 aC
Si1+Zn1	74,47 ± 8,90 aBC	78,39 ± 11,16 aA	70,22 ± 5,35 aC
Si1+Zn2	74,24 ± 2,34 aBC	94,17 ± 13,03 aA	90,17 ± 5,35 aC
Si2+Zn1	128,76 ± 10,16 aA	90,78 ± 5,45 bA	140,23 ± 1,51 aA
Si2+Zn2	109,87 ± 19,22 abAB	96,10 ± 5,95 bA	136,13 ± 7,69 aAB
FV		F	
FA		*	
TRAT		**	
FAX TRAT		*	
CV (%)		20,35	

Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não se diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. CV= coeficiente de variação. Valores após o sinal de ± indicam o erro padrão (n=4). TRAT= tratamentos combinados e individuais de Si e Zn. FA= Formas de aplicação. **= significativo a 1% e 5%. * significativo a 5%. Ns= não significativo. Controle (sem aplicação de silício e zinco); Si1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si); Si2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si); Zn1 (aplicação de 20 mg kg⁻¹ de Zn); Zn2 (aplicação de 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn2 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si2+Zn1 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn) e Si2+Zn2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn) exceto quando o silício foi aplicado via foliar, no qual foi fornecido uma concentração de 2,56 e 7,68 mg de Si vaso⁻¹ para os tratamentos Si1 e Si2, respectivamente].

Comparando os tratamentos individuais e combinados de Si e Zn dentro da forma de aplicação via sulco de semeadura notou-se maior acúmulo de K na parte aérea das plantas de milho no tratamento Si2+Zn1 e este foi semelhante ao acúmulo atingido com os tratamentos Si2+Zn2, Zn2 e Si2. Notou-se menor média de incremento de K no tratamento Si1 e esta foi semelhante ao tratamento controle, Si1, Zn1, Zn2, Si1+Zn1 e Si1+Zn2 (Tabela 11).

Os tratamentos dentro da aplicação via foliar de Si não apresentam diferença significativa entre as médias. Quando observado os tratamentos dentro da aplicação de Si em área total, notou-se maior incremento no acúmulo de K com o tratamento Si2+Zn1 e esta média foi semelhante ao do tratamento Si2+Zn2. O menor incremento de acúmulo foi verificado no tratamento Si1+Zn1 e este foi diferente apenas dos tratamentos Si2+Zn1 e Si2+Zn2 (Tabela 11).

Os tratamentos dentro da aplicação via foliar de Si não apresentam diferença significativa entre as médias. Quando observado os tratamentos dentro da aplicação de Si em área total, notou-se maior incremento no acúmulo de K com o tratamento Si₂+Zn₁ e esta média foi semelhante ao do tratamento Si₂+Zn₂. O menor incremento de acúmulo foi verificado no tratamento Si₁+Zn₁ e este foi diferente apenas dos tratamentos Si₂+Zn₁ e Si₂+Zn₂ (Tabela 11).

Apesar da possibilidade dos incrementos do teor e acúmulo de K estarem ligados ao fornecimento indireto de K no silicato de potássio aplicado para o fornecimento de Si na concentração maior (Si₂), a literatura reporta que o Si aumenta os teores de K na planta. A ocorrência do aumento de K nas plantas pode estar ligado a estimulação da absorção de K com a aplicação de Si, levando em consideração que o Si aumenta a atividade da H⁺-ATPase das raízes e o aumento dessa atividade aumenta a absorção de K pela planta (LIANG, 1999).

O maior acúmulo de Ca da parte aérea foi notado com a aplicação do Si em área total e via foliar e o menor acúmulo ocorreu quando o Si foi aplicado via sulco de semeadura, o resultado foi diferente do encontrado no teor de Ca da parte aérea que não apresentou diferença significativa. Foi verificado o efeito da aplicação de Si e Ca quanto a absorção em plantas de arroz cultivadas em solução e notou-se que a aplicação de Si reduziu a absorção de Ca (MA; TAKAHASHI, 1993).

Quando avaliado o teor de Ca da parte aérea das plantas de milho, notou-se maior média nos teores de Ca quando utilizado o tratamento com menor concentração de Si (Si₁), esse resultado foi semelhante ao controle, Si₂ e Si₁+Zn₁. O menor teor de Ca foi observado no tratamento Si₂+Zn₁ e este foi semelhante ao Si₂+Zn₂, Si₁+Zn₂, Zn₁ e Zn₂, esse resultado foi diferente do verificando no acúmulo de Ca que não apresentou diferença em função dos tratamentos combinados e individuais de Si e Zn₁ (Tabela 12).

O resultado obtido neste presente trabalho indica que com a aplicação de Si via foliar ou em área total esse efeito de inibição da absorção de Ca é menor. A aplicação de Si via sulco de semeadura causa um contato íon-raiz maior, dessa forma, pode ter ocorrido essa interação negativa entre o Si e Ca reduzindo absorção de Ca e conseqüentemente ocasionou menor acúmulo de Ca. O comportamento do acúmulo de Mg foi semelhante ao do acúmulo de Ca quanto as formas de aplicação, o teor em área total foi semelhante ao de quando aplicado Si via foliar, o qual apresentou menor incremento no teor de Mg (Tabela 12).

Tabela 12- Teor e acúmulo de Ca e Mg da parte aérea em função das formas de aplicação de Si e dos tratamentos combinados de Si e Zn no milho. Experimento I.

Formas de aplicação (FA)	Ca		Mg	
	Teor g kg ⁻¹	Acúmulo mg planta ⁻¹	Teor g kg ⁻¹	Acúmulo mg planta ⁻¹
Via sulco	3,83 ± 0,22 a	24,61 ± 3,36 b	3,69 ± 0,14 b	23,64 ± 2,82 b
Via foliar	3,98 ± 0,20 a	29,83 ± 4,16 a	4,00 ± 0,18 a	29,98 ± 4,48 a
Área total	3,90 ± 0,24 a	31,12 ± 4,15 a	3,88 ± 0,17 ab	31,10 ± 3,60 a
Tratamentos				
Controle	4,50 ± 0,32 a	33,22 ± 5,36 a	4,35 ± 0,26 ab	31,41 ± 4,57 ab
Si1	4,53 ± 0,32 a	31,46 ± 4,29 a	4,77 ± 0,17 a	33,20 ± 4,10 ab
Si2	4,43 ± 0,26 a	25,59 ± 3,09 a	3,92 ± 0,17 bc	22,66 ± 2,82 b
Zn1	3,76 ± 0,16 bc	26,04 ± 3,28 a	3,89 ± 0,13 bc	27,26 ± 4,57 ab
Zn2	3,68 ± 0,20 bc	27,04 ± 3,62 a	3,73 ± 0,12 cd	27,40 ± 3,12 ab
Si1+Zn1	4,10 ± 0,22 ab	25,87 ± 3,35 a	3,69 ± 0,14 cd	23,20 ± 2,77 ab
Si1+Zn2	3,62 ± 0,19 bc	31,86 ± 4,49 a	3,95 ± 0,12 bc	34,52 ± 4,45 a
Si2+Zn1	3,15 ± 0,15 c	27,73 ± 3,58 a	3,17 ± 0,07 e	27,71 ± 2,71 ab
Si2+Zn2	3,36 ± 0,17 c	27,87 ± 4,76 a	3,25 ± 0,12 de	26,83 ± 3,98 ab
FV			F	
FA	Ns	**	*	**
TRAT	**	Ns	**	**
FAX TRAT	Ns	Ns	Ns	Ns
CV (%)	12,90	31,13	9,70	29,11

Médias seguidas da mesma letra não se diferenciam entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. CV= coeficiente de variação. TRAT = tratamentos combinados e individuais de Zn e Si. Valores após o sinal de ± indicam o erro padrão (n=4). **= significativo a 1% e 5%. * significativo a 5%. Ns= não significativo. Controle (sem aplicação de silício e zinco); Si1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si); Si2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si); Zn1 (aplicação de 20 mg kg⁻¹ de Zn); Zn2 (aplicação de 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn2 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si2+Zn1 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn) e Si2+Zn2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn) exceto quando o silício foi aplicado via foliar, no qual foi fornecido uma concentração de 2,56 e 7,68 mg de Si vaso⁻¹ para os tratamentos Si1 e Si2, respectivamente].

É sabido que há uma competição na absorção entre o K, Mg e Ca (MARSCHNER, 1995). Nas condições em que o experimento foi conduzido, pode ter ocorrido competição entre esses cátions.

Houve maior incremento no teor de Mg com a aplicação individual de Si1 e esse resultado foi semelhante ao controle. Os tratamentos Si2+Zn1 e Si2+Zn2 foram os que mais afetou os teores de Mg na planta e a aplicação individual de Si2 apresentou teores semelhantes ao encontrados com a aplicação da dose intermediária e alta de zinco. O acúmulo de Mg apresentou resultado diferente do teor de Mg, foi verificado

maior acumulação de Mg na parte aérea com o tratamento combinado Si1+Zn2 e o menor com o tratamento individual Si2 (Tabela 12). Esse resultado de menor acumulação pode estar relacionado a competição entre o Mg e K, levando em consideração que indiretamente os tratamentos que receberam maior concentração de Si (Si2) também receberam uma concentração maior de K.

As formas de aplicação de Si não apresentaram diferença entre as formas de aplicação de Si para o S, mas essa diferença foi notada no acúmulo de S, apontando que a aplicação de Si em área total contribui para maior absorção de S pelas plantas de milho. Quanto aos teores de S o tratamento Si2 trouxe maior incremento no teor de S com média de 1,19 g kg⁻¹ de S e foi diferente apenas do tratamento combinado Si1+Zn2, este obteve menor incremento no teor de S, para o S o acúmulo também foi diferente do comportamento do teor e não apresentou diferença em função dos tratamentos combinados e individuais de Si e Zn (Tabela 13).

Maillard et al. (2018) estudaram a transcrição do Si na regulação do metabolismo do S e notaram que o silício atua no aumento a transcrição de HvST1;1 (transportador de S) e por consequência aumenta absorção de SO₄²⁻, isso explica o aumento do teor de S no tratamento do teor de S no tratamento que recebeu maior concentração de Si.

O teor e acúmulo de B obtiveram comportamentos diferentes em função das formas de aplicação de Si. As aplicações de Si não influenciaram no teor de B, enquanto o acúmulo foi influenciado pelas aplicações de Si. Observou-se maior acúmulo de B na parte aérea das plantas de milho quando a aplicação de Si ocorreu em área total e foi menor quando a aplicação de Si foi realizada via sulco de semeadura (Tabela 13). O silício pode contribuir para redução de B na planta (GUNES, 2009; AKCAY; ERKAN, 2016), o resultado alcançado neste trabalho indica que a aplicação de Si via sulco de semeadura pode contribuir para maior redução do acúmulo de B na planta, diferente da aplicação de Si via área total, onde foi observado aumento. Esse resultado pode estar ligado ao contato íon-raiz com o fertilizante, levando em consideração que a aplicação de Si via sulco de plantio tem um maior contato íon-raiz.

Tabela 13- Teor e acúmulo de S e B da parte aérea em função das formas de aplicação de Si e dos tratamentos combinados de Si e Zn no milho. Experimento I.

Formas de aplicação (FA)	S		B	
	Teor	Acúmulo	Teor	Acúmulo
	g kg ⁻¹	mg planta ⁻¹	mg kg ⁻¹	µg planta ⁻¹
Via sulco	1,15 ± 0,05 a	7,44 ± 0,88 b	12,69 ± 0,78 a	81,30 ± 10,97 b
Via foliar	1,09 ± 0,04 a	8,06 ± 0,93 ab	12,19 ± 0,97 a	89,44 ± 11,15 ab
Área total	1,09 ± 0,05 a	8,70 ± 0,98 a	12,97 ± 0,85 a	102,37 ± 12,33 a
Tratamentos				
Controle	1,10 ± 0,03 ab	7,93 ± 0,93 a	12,41 ± 0,78 a	88,63 ± 9,83 a
Si1	1,17 ± 0,06 ab	8,80 ± 0,94 a	12,15 ± 1,07 a	83,39 ± 10,95 a
Si2	1,19 ± 0,06 a	6,92 ± 0,96 a	13,83 ± 1,06 a	79,25 ± 11,40 a
Zn1	1,12 ± 0,06 ab	7,68 ± 0,97 a	13,33 ± 1,00 a	87,42 ± 7,75 a
Zn2	1,12 ± 0,05 ab	8,13 ± 0,78 a	12,08 ± 0,93 a	86,63 ± 6,89 a
Si1+Zn1	1,12 ± 0,04 ab	7,11 ± 0,98 a	13,08 ± 0,85 a	82,42 ± 12,26 a
Si1+Zn2	1,04 ± 0,05 b	8,87 ± 1,01 a	11,25 ± 0,84 a	96,51 ± 15,21 a
Si2+Zn1	1,05 ± 0,03 ab	9,18 ± 0,74 a	12,00 ± 0,80 a	106,24 ± 10,88 a
Si2+Zn2	1,08 ± 0,08 ab	8,72 ± 1,09 a	13,41 ± 1,02 a	109,86 ± 18,15 a
FV		F		
FA	Ns	*	Ns	**
TRAT	*	Ns	Ns	Ns
FAX TRAT	Ns	Ns	Ns	Ns
CV (%)	10,56	25,26	16,12	28,82

Médias seguidas da mesma letra não se diferenciam entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. CV= coeficiente de variação. TRAT = tratamentos combinados e individuais de Zn e Si. Valores após o sinal de ± indicam o erro padrão (n=4). **= significativo a 1% e 5%. * significativo a 5%. Ns= não significativo. Controle (sem aplicação de silício e zinco); Si1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si); Si2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si); Zn1 (aplicação de 20 mg kg⁻¹ de Zn); Zn2 (aplicação de 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn2 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si2+Zn1 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn) e Si2+Zn2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn) exceto quando o silício foi aplicado via foliar, no qual foi fornecido uma concentração de 2,56 e 7,68 mg de Si vaso⁻¹ para os tratamentos Si1 e Si2, respectivamente].

Houve diferença no teor e acúmulo de Cu da parte aérea em função das formas de aplicação de Si. As aplicações de Si via sulco de semeadura e via foliar reduziram o teor e acúmulo de Cu na parte aérea e a aplicação em área total de Si contribuiu para maior do teor e acúmulo de Cu. Observando os incrementos de Cu em função dos tratamentos combinados e individuais de Si e Zn, notou-se maior incremento no acúmulo de Cu com o tratamento Si2+Zn1, este não foi diferente do acumulado no tratamento Si2+Zn2. O menor acúmulo de Cu foi observado no tratamento Si2 e esta média foi diferente apenas dos tratamentos Si2+Zn1 e Si2+Zn2 (Tabela 14).

A literatura reporta que o Si reduz a disponibilidade de Cu no solo (PAIM et al., 2003; KELLER et al., 2015; LU et al. 2019), isso aponta que em casos que há

necessidade de aumento da absorção de Cu pelas plantas a aplicação em área total pode ser eficiente. O Zn e o Cu competem pelos mesmos sítios de absorção (PÉREZ-NOVO et al., 2011), ou seja, um pode reduzir a absorção do outro, entretanto não foi observado esse efeito nas condições em que este experimento foi conduzido.

Tabela 14- Teor e acúmulo de Cu e Fe da parte aérea em função das formas de aplicação de Si e dos tratamentos combinados de Si e Zn no milho. Experimento I.

Formas de aplicação (FA)	Cu		Fe	
	Teor mg kg ⁻¹	Acúmulo µg planta ⁻¹	Teor mg kg ⁻¹	Acúmulo µg planta ⁻¹
Via sulco	4,44 ± 0,23 b	28,77 ± 4,02 b	111,72 ± 10,01 a	708,05 ± 98,08 a
Via foliar	4,41 ± 0,23 b	32,59 ± 4,07 b	103,55 ± 11,47 a	755,94 ± 139,50 a
Área total	4,77 ± 0,32 a	38,30 ± 7,73 a	103,16 ± 10,48 a	820,21 ± 122,23 a
Tratamentos				
Controle	4,50 ± 0,22 a	32,42 ± 4,06 ab	118,83 ± 13,46 a	816,59 ± 102,04 a
Si1	4,91 ± 0,28 a	33,99 ± 4,48 ab	117,33 ± 10,71 ab	762,16 ± 101,55 a
Si2	4,41 ± 0,32 a	25,33 ± 3,16 b	121,58 ± 11,61 a	695,94 ± 98,58 a
Zn1	4,66 ± 0,28 a	31,87 ± 3,93 ab	11,91 ± 12,86 ab	811,03 ± 201,64 a
Zn2	4,50 ± 0,22 a	32,69 ± 3,63 ab	94,33 ± 4,93 ab	684,90 ± 82,64 a
Si1+Zn1	4,58 ± 0,29 a	28,46 ± 3,20 ab	102,58 ± 11,48 ab	625,66 ± 82,06 a
Si1+Zn2	4,41 ± 0,21 a	37,94 ± 5,46 a	89,75 ± 6,17 b	762,16 ± 115,75 a
Si2+Zn1	4,41 ± 0,24 a	38,78 ± 4,05 a	102,58 ± 15,04 ab	871,60 ± 138,22 a
Si2+Zn2	4,50 ± 0,31 a	37,49 ± 6,48 ab	94,83 ± 9,65 ab	792,24 ± 156,92 a
FV			F	
FA	*	**	Ns	Ns
TRAT	Ns	*	*	Ns
FAX TRAT	Ns	Ns	Ns	Ns
CV (%)	12,82	28,13	22,62	35,27

Médias seguidas da mesma letra não se diferenciam entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. CV= coeficiente de variação. TRAT = tratamentos combinados e individuais de Zn e Si. Valores após o sinal de ± indicam o erro padrão (n=4). **= significativo a 1% e 5%. * significativo a 5%. Ns= não significativo. Controle (sem aplicação de silício e zinco); Si1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si); Si2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si); Zn1 (aplicação de 20 mg kg⁻¹ de Zn); Zn2 (aplicação de 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn2 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si2+Zn1 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn) e Si2+Zn2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn) exceto quando o silício foi aplicado via foliar, no qual foi fornecido uma concentração de 2,56 e 7,68 mg de Si vaso⁻¹ para os tratamentos Si1 e Si2, respectivamente].

Os tratamentos controle e o Si2 obtiveram maior teor de Fe na parte aérea. Estes tratamentos foram diferentes apenas do tratamento combinado Si1+Zn2 (Tabela 14). Chalmardi, Abdolzadeh e Sadeghipour (2014) avaliaram o Si na nutrição de plantas de arroz e o efeito sob níveis de Fe em sistema hidropônico e notaram que o Si reduz a absorção de Fe pelas plantas quando estas estão submetidas a altas concentração

de Fe, quando as concentrações de Fe são menores há uma estabilidade na concentração de Fe nas plantas independente da aplicação de Si.

Santos et al. (2020) avaliaram o silício na mitigação da toxicidade de Fe em plantas de arroz cultivadas em solução e notou-se que o silício reduziu as concentrações de Fe nas plantas, isso não foi notado neste experimento, levando em consideração que a maior concentração de Si aplicada (Si2) teve o mesmo comportamento do tratamento controle em relação ao teor de Fe na parte aérea, isso indica que o comportamento do Si com o Fe em solos arenosos pode ser diferente do verificado em solução.

Verificando Mn em função dos tratamentos combinados e individuais de Si e Zn apresentaram diferença significativa, o acúmulo e teor de Mn não diferenciaram em função das formas de aplicação de Si (Tabela 15).

Tabela 15- Teor e acúmulo de Mn da parte aérea em função das formas de aplicação de Si e dos tratamentos combinados de Si e Zn no milho. Experimento I.

Formas de aplicação (FA)	Mn	
	Teor mg kg ⁻¹	Acúmulo µg planta ⁻¹
Via sulco	30,77 ± 1,43 a	197,41 ± 27,10 a
Via foliar	30,94 ± 2,00 a	230,59 ± 35,22 a
Área total	28,77 ± ,82 a	225,36 ± 30,31 a
Tratamentos		
Controle	36,16 ± 2,06 a	263,54 ± 39,49 a
Si1	35,66 ± 2,14 ab	247,90 ± 32,31 a
Si2	34,58 ± 2,40 abc	233,75 ± 24,05 a
Zn1	29,75 ± 1,58 bcd	220,82 ± 33,40 a
Zn2	27,16 ± 1,81 d	218,12 ± 27,43 a
Si1+Zn1	28,58 ± 3,11cd	177,17 ± 21,95 a
Si1+Zn2	27,41 ± 1,42 d	233,75 ± 30,31 a
Si2+Zn1	25,16 ± 2,35 d	218,12 ± 26,76 a
Si2+Zn2	27,00 ± 1,88 d	220,82 ± 42,19 a
FV	F	
FA	Ns	Ns
TRAT	**	Ns
FA X TRAT	Ns	Ns
CV (%)	15,59	31,03

Médias seguidas da mesma letra não se diferenciam entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. CV= coeficiente de variação. TRAT = tratamentos combinados e individuais de Zn e Si. Valores após o sinal de ± indicam o erro padrão (n=4). **= significativo a 1% e 5%. * significativo a 5%. Ns= não significativo. Controle (sem aplicação de silício e zinco); Si1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si); Si2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si); Zn1 (aplicação de 20 mg kg⁻¹ de Zn); Zn2 (aplicação de 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn2 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si2+Zn1 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn) e Si2+Zn2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn) exceto quando o silício foi aplicado via foliar, no qual foi fornecido uma concentração de 2,56 e 7,68 mg de Si vaso⁻¹ para os tratamentos Si1 e Si2, respectivamente].

O teor de Mn foi maior nos tratamentos onde não foi aplicado Zn. O controle obteve maior incremento de Mn na parte aérea e foi semelhante as médias encontradas nos tratamentos Si1 e Si2. Os tratamentos combinados e individuais de Si e Zn apresentaram menor teor de Mn na parte aérea (Tabela 15), isso indica que as concentrações de Zn podem ter contribuído para a redução da absorção de Mn pelas plantas de milho, entretanto o efeito do Zn na redução dos teores de Mn na planta é pouco comentado na literatura.

Alguns autores conduziram experimentos em sistema hidropônico com o objetivo de verificar o efeito do Si no alívio da toxicidade por Mn em culturas como milho e arroz e foi verificado que o Si contribui para redução dos teores de Mn na parte aérea das plantas (DONCHEVA et al., 2009; ZANÃO JÚNIOR et al., 2010; LI et al., 2012). Esses resultados não corroboram com o encontrado neste trabalho. Mas é possível que a redução de Mn causada pelo Si ocorra apenas quando o Mn está presente em quantidades tóxicas para planta, neste trabalho os teores de Mn estavam dentro do considerado adequado.

4.1.5 Teor de silício e zinco no solo

4.1.5.1 Teor de silício no solo

Não houve interação entre os fatores formas de aplicação de Si e tratamentos combinados e individuais de Si e Zn. Os dois fatores isoladamente apresentaram diferença (Tabela 16).

Tabela 16- Teor de Si no solo em função das formas de aplicação de Si no milho. Experimento I.

Formas de aplicação de Si (FA)	Teor Si
	mg kg
Via sulco	2,36 ± 0,16 b
Via foliar	2,34 ± 0,46 b
Área total	3,11 ± 0,50 a
FV	F
FA	**
TRAT	**
FAX TRAT	Ns
CV (%)	31,22

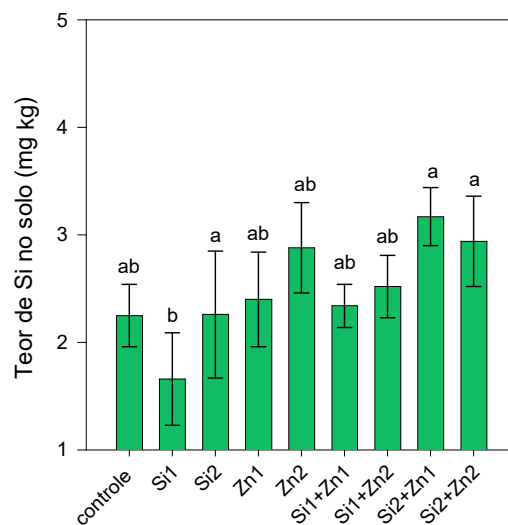
Médias seguidas da mesma letra não se diferenciam entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. CV= coeficiente de variação. TRAT = tratamentos combinados e individuais de Si e Zn. Valores após o sinal de ± indicam o erro padrão (n=4). **= significativo a 1% e 5%. * significativo a 5%. Ns= não significativo.

. A aplicação de Si em área total contribuiu para maior teor de Si no solo,

enquanto as formas de aplicação de Si via foliar e sulco de semeadura apresentaram os menores teores (Tabela 16).

Esse resultado foi diferente do encontrado por Barbosa et al. (2008) onde foi avaliado as formas de aplicação de Si via sulco de semeadura e em área total e as duas formas de aplicação de Si contribuíram para o aumento das concentrações de Si no solo. Entretanto as concentrações de Si aplicadas por esses autores foram superiores as aplicadas neste trabalho.

Figura 5- Teor de Si no solo extraído pelo método CaCl_2 0,01 mol L⁻¹ em função dos tratamentos combinados e individuais de Si e Zn. Experimento I.



Médias seguidas da mesma letra não se diferenciam entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. Barras de erro representam o erro padrão (n=4). Controle (sem aplicação de silício e zinco); Si1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si); Si2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si); Zn1 (aplicação de 20 mg kg⁻¹ de Zn); Zn2 (aplicação de 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn2 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si2+Zn1 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn) e Si2+Zn2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn) exceto quando o silício foi aplicado via foliar, no qual foi fornecido uma concentração de 2,56 e 7,68 mg de Si vaso⁻¹ para os tratamentos Si1 e Si2, respectivamente].

Houve maior incremento do teor de Si no solo com os tratamentos Si2+Zn1, Si2+Zn2 e Si2, com teores de 3,17, 2,94 e 2,26 mg dm⁻³ de Si, respectivamente, contudo, essas médias foram diferentes apenas do tratamento Si1. O menor incremento de Si foi verificado no tratamento Si1 (1,66 mg dm⁻³ de Si), e esta média foi diferente dos maiores incrementos (Figura 5).

Solos de textura arenosa naturalmente possuem menores teores de Si (DEMATTÊ et al. 2011). Nas condições que o experimento foi conduzido não foi verificado incremento dos teores do Si do solo com a aplicação de Si.

4.1.5.2 Teor de zinco no solo

O teor de zinco no solo apresentou diferença somente para os tratamentos individuais de Si e Zn. A interação entre os fatores FA X TAT e o fator isolado formas de aplicação de Si não apresentaram diferença (Tabela 17). De acordo com Raij et al. (1997) os teores de Zn no solo foram considerados altos nos tratamentos onde houve o seu fornecimento.

Tabela 17 - Teor de zinco no solo no solo extraído pelo método DTPA em função das formas de aplicação de Si no milho. Experimento I.

Formas de aplicação de Si(FA)	Variável Zn
	mg dm ³
Via sulco	6,57 ± 0,75 a
Via foliar	5,34 ± 1,25 a
Área total	5,34 ± 1,01 a
FV	F
FA	Ns
TRAT	**
FA X TRAT	Ns
CV (%)	45,57

Médias seguidas da mesma letra não se diferenciam entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. CV= coeficiente de variação. TRAT = tratamentos combinados e individuais de Si e Zn. Valores após o sinal de ± indicam o erro padrão (n=4). **= significativo a 1% e 5%. * significativo a 5%. Ns= não significativo.

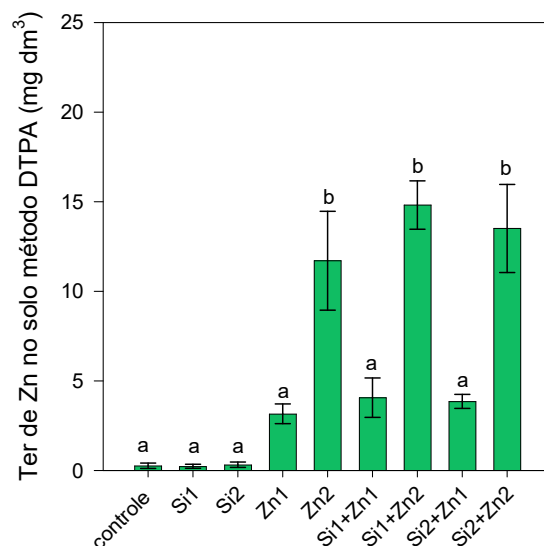
O tratamento Si1 apresentou o menor teor de Zn no solo (0,23 mg dm⁻³ de Zn), e este foi semelhante aos tratamentos controle, Si2, Zn1, Si1+Zn1 e Si2+Zn1. O tratamento Zn1 (0,33 mg dm⁻³ de Zn), não se diferenciou do controle (0,27 mg kg⁻¹ de Zn), indicando que a aplicação de 20 mg kg⁻¹ de Zn não ocasionou aumentos de Zn no solo, de forma que prejudicasse a qualidade do solo e das plantas, uma vez que, este tratamento assemelhou-se aos tratamentos que não receberam concentrações intermediária ou alta de Zn (controle, Si1 e Si2) (Figura 6).

Apesar do teor de Zn encontrado no solo com a aplicação do tratamento Zn1 apresentar semelhança com os tratamentos combinados Si1+Zn1 e Si2 +Zn1, visualmente é possível notar um aumento no teor de Zn no solo, estes apresentam média de 4,47 e 3,86 mg dm⁻³ de Zn, indicando que o Si pode a disponibilidade de Zn no solo (Figura 6).

O tratamento Si1+Zn2 obteve o maior teor de Zn no solo (14,82 mg dm⁻³ de Zn), e foi semelhante ao teor de Zn no solo em que foi aplicado os tratamentos Si2+Zn2 e

Zn₂ (13,51 e 11,71 mg dm⁻³ de Zn, respectivamente). Mesmo não apresentando diferença estatística é possível notar que houve tendência de aumento no teor de Zn onde os tratamentos foram aplicados combinados com Si e Zn (Figura 6).

Figura 6- Teor de zinco (Zn) no solo extraído pelo método DTPA em função dos tratamentos combinados e individuais de Si e Zn. Experimento I.



Médias seguidas da mesma letra não se diferenciam entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. Barras de erro representam o erro padrão (n=4). Controle (sem aplicação de silício e zinco); Si1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si); Si2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si); Zn1 (aplicação de 20 mg kg⁻¹ de Zn); Zn2 (aplicação de 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn2 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si2+Zn1 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn) e Si2+Zn2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn) exceto quando o silício foi aplicado via foliar, no qual foi fornecido uma concentração de 2,56 e 7,68 mg de Si vaso⁻¹ para os tratamentos Si1 e Si2, respectivamente].

O resultado desse presente experimento foi semelhante ao encontrado por Zajackowaska, Korzeniowska e Cholewa (2020) em solo de textura franco-arenosa. Esses autores notaram estabilidade nos teores de Zn disponível no solo, mesmo com as concentrações de Si utilizadas sendo superiores as utilizadas nesse estudo.

Muitos autores concluíram em seus estudos que o silício mitiga a disponibilidade de elementos tóxicos ou potencialmente tóxicos. Liang, Wong e Wei (2005) e Rizawan et al. (2012) notaram redução dos teores de Cd no solo com a aplicação de Si. Mu et al. (2019) verificaram imobilização do Cd e Pb com aplicações de resíduos a base de Si e Zhao et al. (2020) também verificaram redução da disponibilidade de Cd em solo alcalino e ácido com a aplicação de Si. Por outro lado, neste estudo não foi notado redução do teor de Zn utilizando o extrator DTPA, talvez a realização de análise para verificar o Zn no solo com outro extrator demonstre melhor esse resultado.

4.1.6 Atributos do solo (pH, V%, H+Al, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu e Mn)

Não houve interação significativa entre os fatores formas de aplicação de Si e tratamentos individuais e combinados de Si e Zn para os seguintes parâmetros do solo: pH, P, H+Al, K, Ca, Mg, V%, S, B, Cu e Mn. Verificando os fatores isoladamente, para o fator formas de aplicação de Si houve diferença significativa para os parâmetros de H+Al, K e V% e para o fator tratamentos combinados e individuais de Si e Zn houve diferença somente para o teor de K e Mn (Tabelas 18, 19 e 20). De acordo com Raij et al. (1997) os teores de P no solo estavam baixos em todos os tratamentos enquanto os teores de K foram considerados muito baixos. Os teores de Ca e Mg foram considerados altos e o teor de S estava na média. Além disso, o solo apresentou acidez baixa e o V% estava na média em todos os tratamentos. O teor de B foi considerado baixo, O Cu estava na média e o Mn no solo estava alto em todos os tratamentos.

Na variável acidez potencial (H+Al) a aplicação de Si via foliar ocasionou aumento dessa variável no solo, enquanto a aplicação via sulco de semeadura contribuiu para a redução. A aplicação de Si em área total apresentou semelhança nas médias encontradas nas demais formas de aplicação de Si (Tabela 18). A acidez potencial é formada pelo somatório dos íons H^+ e Al^{3+} e causa da acidez do solo está relacionada a grande quantidade de H^+ presente no solo, este se liga com componentes ácidos presentes no solo, que por consequência leva a redução do pH.

Quando ocorre a neutralização desses íons H^+ pelos ânions OH^- o pH do solo sofre elevação. O menor incremento no teor de H+Al observado com aplicação de Si via sulco indica que a aplicação via sulco contribuiu para maior redução dos íons H^+ . Alcarde (1992) comentou em seu estudo que essa redução está relacionada a formação do ácido monossilícico (H_2SiO_3) por intermédio do silicato (SiO_3^{2-}) na solução do solo. Sarto et al. (2014) verificaram redução nos teores de H+Al com a adubação de silicatada e utilizando como fonte silicato de Ca, isso aponta que o silicato de K em pó utilizado neste experimento também foi eficiente.

Notou-se maior incremento no teor de K com a aplicação de Si via sulco e não foi diferente da aplicação via foliar. O menor incremento foi visto com a aplicação em área total e esta não se diferenciou da aplicação via foliar de Si (Tabela 18).

Tabela 18- Valores de pH, P, H+Al, K e Ca no solo em função das formas de aplicação de Si e dos tratamentos combinados e individuais de Si e Zn no milho. Experimento I.

Formas de aplicação (FA)	Variáveis				
	pH	P	H+Al	K	Ca
	CaCl ₂	mg dm ³		mmolc dm ³	
Via sulco	5,69±0,09 a	8,18±1,61 a	13,03±0,69 b	0,78±0,05 a	18,07±1,24 a
Via foliar	5,62±0,07 a	8,03±1,70 a	14,07±0,48 a	0,72±0,05 ab	18,07±1,75 a
Área total	5,71±0,08 a	6,44±0,81 a	13,62±0,52 ab	0,71±0,05 b	17,51±0,79 a
Tratamentos					
Controle	5,68±0,13 a	9,77±2,31 a	14,22±0,83 a	0,65±0,05 bc	19,14±2,37 a
Si1	5,72±0,05 a	6,44±1,07 a	13,22±0,59 a	0,70±0,06 abc	17,66±0,80 a
Si2	5,70±0,12 a	9,77±2,81 a	13,55±0,34 a	0,81±0,06 a	18,77±1,52 a
Zn1	5,64±0,06 a	5,77±0,58 a	13,66±0,61 a	0,74±0,08 abc	17,33±1,39 a
Zn2	5,65±0,08 a	6,55±0,77 a	14,22±0,94 a	0,76±0,03 abc	17,77±1,47 a
Si1+Zn1	5,72±0,09 a	9,11±1,88 a	13,66±0,33 a	0,75±0,07 abc	17,44±1,30 a
Si1+Zn2	5,61±0,05 a	7,88±0,71 a	13,44±0,69 a	0,64±0,04 c	16,66±0,52 a
Si2+Zn1	5,71±0,05 a	8,22±1,54 a	13,11±0,33 a	0,75±0,04 abc	18,11±0,98 a
Si2+Zn2	5,63±0,08 a	6,33±0,71 a	13,88±0,43 a	0,80±0,05 ab	17,77±0,97 a
FV	F				
FA	Ns	Ns	**	*	Ns
TRAT	Ns	Ns	Ns	**	Ns
FA X TRAT	Ns	Ns	Ns	Ns	Ns
CV (%)	2,82	43,88	8,67	13,56	16,34

Médias seguidas da mesma letra não se diferenciam entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. CV= coeficiente de variação. TRAT = tratamentos combinados e individuais de Zn e Si. Valores após o sinal de ± indicam o erro padrão (n=4). **= significativo a 1% e 5%. * significativo a 5%. Ns= não significativo. Controle (sem aplicação de silício e zinco); Si1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si); Si2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si); Zn1 (aplicação de 20 mg kg⁻¹ de Zn); Zn2 (aplicação de 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn2 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si2+Zn1 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn) e Si2+Zn2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn) exceto quando o silício foi aplicado via foliar, no qual foi fornecido uma concentração de 2,56 e 7,68 mg de Si vaso⁻¹ para os tratamentos Si1 e Si2, respectivamente].

Analisando os tratamentos individuais e combinados de Si e Zn notou-se que o tratamento com maior concentração de Si (Si2) contribuiu para maior incremento no teor de K no solo, entretanto esse tratamento diferenciou-se apenas no tratamento Si1+Zn2 e do controle (Tabela 18). Esse resultado pode ter ocorrido devido o maior fornecimento indireto de K nos tratamentos em que foi aplicado maior concentração de Si, uma vez que a fonte de Si que foi utilizada continha K na sua composição. Entretanto, o aumento da concentração de k na solução do solo utilizando doses de Si foi reportada na literatura, quando se realizou aplicação de silicato de cálcio para fornecimento de Si. (VALE et al. 2010; SARTO et al. 2019).

A percentagem de saturação por bases (V%) apresentou maior elevação quando a aplicação de Si foi realizada via sulco de sementeira e foi menor quando aplicada via foliar. Quando a aplicação de Si foi realizada em área total o V% apresentou média semelhante as demais formas de aplicação de Si (Tabela 19).

Tabela 19- Teores de Mg, V% e S no solo em função das formas de aplicação de Si e dos tratamentos combinados e individuais de Si e Zn no milho. Experimento I.

Formas de aplicação (FA)	Variáveis		
	Mg	V	S
	mmolc dm ³	%	mg dm ³
Via sulco	9,00 ± 0,24 a	68,11 ± 1,69 a	5,00 ± 1,04 a
Via foliar	8,51 ± 0,54 a	65,29 ± 2,06 b	5,00 ± 0,74 a
Área total	8,77 ± 0,53 a	66,33 ± 1,41 ab	4,18 ± 0,50 a
Tratamentos			
Controle	8,66 ± 0,60 a	68,11 ± 3,06 a	4,88 ± 1,02 a
Si1	8,77 ± 0,40 a	67,33 ± 1,58 a	4,66 ± 0,85 a
Si2	8,88 ± 0,83 a	67,55 ± 2,17 a	5,77 ± 1,66 a
Zn1	9,33 ± 0,37 a	66,22 ± 1,88 a	4,33 ± 0,42 a
Zn2	8,55 ± 0,58 a	65,22 ± 2,39 a	3,88 ± 0,63 a
Si1+Zn1	8,66 ± 0,23 a	65,88 ± 1,59 a	4,22 ± 0,32 a
Si1+Zn2	8,33 ± 0,40 a	65,22 ± 0,77 a	7,88 ± 1,01 a
Si2+Zn1	8,88 ± 0,16 a	67,55 ± 0,85 a	4,77 ± 0,26 a
Si2+Zn2	8,77 ± 0,34 a	66,11 ± 1,17 a	5,11 ± 0,68 a
FV		F	
FA	Ns	*	Ns
TRAT	Ns	Ns	Ns
FAX TRAT	Ns	Ns	Ns
CV (%)	10,77	5,50	41,48

Médias seguidas da mesma letra não se diferenciam entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. CV= coeficiente de variação. TRAT = tratamentos combinados e individuais de Zn e Si. Valores após o sinal de ± indicam o erro padrão (n=4). **= significativo a 1% e 5%. * significativo a 5%. Ns= não significativo. Controle (sem aplicação de silício e zinco); Si1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si); Si2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si); Zn1 (aplicação de 20 mg kg⁻¹ de Zn); Zn2 (aplicação de 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn2 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si2+Zn1 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn) e Si2+Zn2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn) exceto quando o silício foi aplicado via foliar, no qual foi fornecido uma concentração de 2,56 e 7,68 mg de Si vaso⁻¹ para os tratamentos Si1 e Si2, respectivamente].

O V% é influenciado pela elevação do pH e pelos teores de Ca, Mg e K no solo, visualmente os teores de K e Mg no solo foram maiores na aplicação de Si via sulco de sementeira e isso pode ter contribuído para esse incremento. O aumento da saturação por bases (V%) utilizando fontes de silício também foi reportada por Sarto et al. (2014), Ferrari Neto (2016) e Alovisei (2018), entretanto em nenhum desses experimentos utilizou silicato de potássio como fonte de Si.

O maior teor de Mn no solo foi verificado no tratamento Si2+Zn1 e este foi diferente do controle e semelhante a todos os demais tratamentos, por sua vez o tratamento controle diferiu-se apenas do tratamento Si2+Zn1 (Tabela 20).

Tabela 20- Teores de B, Cu e Mn no solo em função das formas de aplicação de Si e dos tratamentos combinados e individuais de Si e Zn no milho. Experimento I.

Formas de aplicação (FA)	Variáveis		
	B	Cu	Mn
	mg dm ³		
Via sulco	0,18±0,02 a	0,55±0,03 a	0,84±0,05 a
Via foliar	0,19±0,02 a	0,53±0,02 a	0,79±0,04 a
Área total	0,17±0,02 a	0,55±0,03 a	0,80±0,04 a
Tratamentos			
Controle	0,18±0,03 a	0,54±0,02 a	0,74±0,05 b
Si1	0,17±0,03 a	0,54±0,04 a	0,75±0,05 ab
Si2	0,18±0,02 a	0,53±0,02 a	0,78±0,08 ab
Zn1	0,17±0,02 a	0,53±0,04 a	0,82±0,05 ab
Zn2	0,19±0,02 a	0,55±0,02 a	0,80±0,03 ab
Si1+Zn1	0,18±0,03 a	0,56±0,02 a	0,82±0,03 ab
Si1+Zn2	0,17±0,01 a	0,56±0,02 a	0,85±0,03 ab
Si2+Zn1	0,17±0,01 a	0,56±0,03 a	0,90±0,04 a
Si2+Zn2	0,16±0,01 a	0,56±0,04 a	0,84±0,04 ab
FV		F	
FA	Ns	Ns	Ns
TRAT	Ns	Ns	*
FAX TRAT	Ns	Ns	Ns
CV (%)	21,41	9,63	12,07

Médias seguidas da mesma letra não se diferenciam entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. CV= coeficiente de variação. TRAT = tratamentos combinados e individuais de Zn e Si. Valores após o sinal de ± indicam o erro padrão (n=4). ***= significativo a 1% e 5%. * significativo a 5%. Ns= não significativo. Controle (sem aplicação de silício e zinco); Si1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si); Si2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si); Zn1 (aplicação de 20 mg kg⁻¹ de Zn); Zn2 (aplicação de 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn2 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si2+Zn1 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn) e Si2+Zn2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn) exceto quando o silício foi aplicado via foliar, no qual foi fornecido uma concentração de 2,56 e 7,68 mg de Si vaso⁻¹ para os tratamentos Si1 e Si2, respectivamente].

Um estudo verificando o efeito do Si verificou redução de Mn no solo com aplicação de Silicato de Ca e Mg. Sarto et al. (2019) avaliaram doses de silicato de Ca e Mg em diferentes tipos de solo e foi notado redução linear do teor de Mn no solo maior teor de argila, as plantas cultivadas em solo arenoso apresentaram estabilidade do teor de Mn, diferenciando do notado neste trabalho que se utilizou solo arenoso. Possivelmente o efeito de redução dos teores de Mn depende do tipo de solo, ou a

concentração de Zn¹ combinado com o Si em concentração mais alta pode ter contribuído para esse efeito.

4.1.7 Considerações finais: Experimento I

A forma de aplicação de Si em área total contribuiu para aumento da área foliar, massa seca da parte aérea (MSPA), massa seca da raiz (MSR), massa seca do caule (MSC), maior acúmulo de N, S, B e Cu e teor de Cu na parte aérea das plantas jovens de milho.

Não houve diferença entre as formas de aplicação em área total e via foliar no incremento de massa seca do caule e acumulação de P, Ca e Mg da parte aérea.

A forma de aplicação de Si via sulco de semeadura obteve maior incremento do teor de K e V% no solo e aumento do teor de N na parte aérea das plantas de milho e a aplicação via foliar de Si mostrou-se eficiente no incremento do teor de Mg na parte aérea.

Houve influência dos tratamentos combinados e individuais de Si e Zn para os parâmetros de índice relativo de clorofila (IRC), área foliar, altura, massa seca da raiz, folhas, parte aérea e caule, teores de N, P, Ca, Mg, K Mn, S, Fe e Zn acúmulo de P, Mg, Cu e Zn, teor de K e Mn no solo.

Houve interação entre as formas de aplicação de Si para o teor e acúmulo de Si e K.

De forma geral as plantas de milho jovens tiveram bom desenvolvimento quando submetidas as concentrações de Zn no solo. Nem sempre foi notado aumento dos teores e acúmulo de Zn na parte aérea da planta quando o Zn foi aplicado. As concentrações de Zn intermediárias não causaram aumento no acúmulo e teor de Zn, indicando que aplicação de 20 mg kg⁻¹ de Zn não acarreta elevado teor e acúmulo de Zn na parte aérea das plantas jovens de milho quando aplicada com conforme a metodologia utilizada. Também não foi observado diferenças no teor e acúmulo de Zn nos tratamentos combinados com a menor e maior concentração de Si aplicada e concentração de Zn intermediária no solo.

Percebeu-se aumento no acúmulo de Zn na parte aérea das plantas jovens de milho nos tratamentos combinados Si¹+Zn² e Si²+Zn² indicando que as concentrações de Si aplicados não atenuaram o acúmulo de Zn (60 mg kg⁻¹ de Zn) na planta.

O teor de Zn no solo com o tratamento individual ou combinado Zn1 (20 mg kg⁻¹ de Zn) foi semelhante ao tratamento controle, indicando não causar aumento do Zn disponível no solo. Enquanto, o tratamento individual de Zn2 ou a combinação de Zn2 com as concentrações de silício foram semelhantes entre si. Não foi notado aumento do Zn disponível no solo mesmo com a aplicação das concentrações de Si.

4.2 Experimento II: Solo argiloso

4.2.1 Altura, número de folha, índice relativo de clorofila e área foliar

Não houve diferença significativa para a interação formas de aplicação X doses individuais e combinadas de Si e Zn para as variáveis altura, IRC, números de folhas e área foliar (Tabela 21). Observando os fatores isoladamente nenhuma das variáveis apresentaram diferença entre as formas de aplicação de Si e para o fator tratamentos individuais e combinados de silício e zinco o houve diferença significativa para os fatores altura, IRC e área foliar (Tabela 21).

Tabela 21- Altura, índice relativo de clorofila (IRC), número de folhas e área foliar (cm²) em função das formas de aplicação de Si no milho. Experimento II.

Formas de Aplicação (FA)	Variáveis			
	Altura	IRC	Nº de folhas	Área foliar
	cm planta	SPAD	Nº planta	cm ²
Sulco	65,95 ± 4,45 a	28,46 ± 1,76 a	6,61 ± 0,24 a	1835,92 ± 86,39 a
Foliar	70,16 ± 3,22 a	29,30 ± 1,40 a	6,88 ± 0,42 a	1900,72 ± 100,47 a
Área Total	69,55 ± 2,68 a	29,82 ± 1,23 a	6,83 ± 0,21 a	1922,86 ± 90,60 a
FV			F	
FA	Ns	Ns	Ns	Ns
TRAT	**	*	Ns	**
FAXTRAT	Ns	Ns	Ns	Ns
CV (%)	11,81	11,43	8,73	11,16

Médias seguidas da mesma letra não se diferenciam entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. CV= coeficiente de variação. TRAT = tratamentos combinados e individuais de Si e Zn. Valores após o sinal de ± indicam o erro padrão (n=4). **= significativo a 1% e 5%. * significativo a 5%. Ns= não significativo.

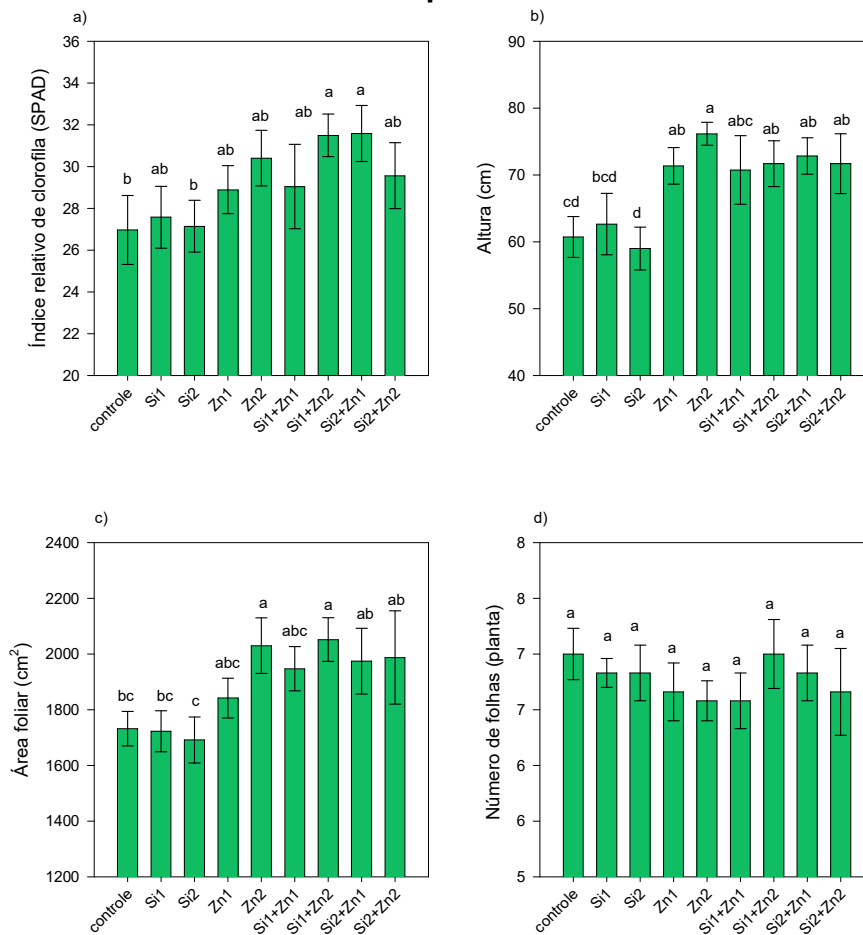
O IRC obteve maior incremento com a aplicação de Si₁+Zn₂ e Si₂+Zn₁ com média de 31,50 e 31,59 SPAD, respectivamente. Notou-se menor IRC com a utilização individual de Si₂ que apresentou média de 27,15 SPAD. O controle foi diferente dos tratamentos que apresentam maiores incrementos e semelhante a todos os demais (Figura 7a).

A aplicação do tratamento com maior concentração de Zn (Zn₂) contribuiu para maior altura do milho (76,17 cm), isso indica que o milho cultivado em solo argiloso se desenvolve mesmo quando há teores altos de Zn. Os tratamentos que não foram aplicados zinco tiveram menor altura quando comparados aos que receberam doses intermediária ou alta de zinco.

A menor altura foi notada no tratamento Si₂ (59,00 cm), entretanto, não foi

diferente do controle (Figura 7b). A área foliar das plantas de milho se comportou de forma semelhante à altura e IRC. O maior incremento de área foliar foi encontrado no tratamento Si1+Zn2 e Zn2 com médias de 2051,85 e 2030,04 cm², respectivamente, e foram diferentes apenas dos tratamentos que não receberam zinco. O tratamento Si2 obteve o menor incremento de área foliar, apresentando médias de 1691,30 cm² e foi semelhante ao controle, Si1 e Zn1 e ao tratamento combinado de Si1+Zn1 (Figura 7c). O número de folhas não foi influenciado pelos tratamentos individuais ou combinados de Si e Zn (Figura 7d).

Figura 7- Índice relativo de clorofila (IRC) (a), altura (b), área foliar (c) e número de folhas (d) em função dos tratamentos combinados e individuais de Si e Zn no milho. Experimento II.



Médias seguidas da mesma letra não se diferenciam entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. Barras de erro representam o erro padrão (n=4). Controle (sem aplicação de silício e zinco); Si1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si); Si2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si); Zn1 (aplicação de 20 mg kg⁻¹ de Zn); Zn2 (aplicação de 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn2 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si2+Zn1 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn) e Si2+Zn2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn) exceto quando o silício foi aplicado via foliar, no qual foi fornecido uma concentração de 2,56 e 7,68 mg de Si vaso⁻¹ para os tratamentos Si1 e Si2, respetivamente].

Notou-se que as plantas tiveram maiores incrementos de IRC, área foliar e altura

quando estas foram submetidas a maior concentração de Zn (Zn_2) do solo. Embora seja conhecido o efeito negativo causado nas plantas pelo excesso de Zn no solo, para o milho o Zn é um dos micronutrientes mais requeridos pela cultura, sendo recomendado a sua aplicação para obtenção de altos rendimentos de produtividade (RAIJ et al., 1997).

Fageria (2000) citou em seu estudo que as concentrações de Zn entre 25 e 94 $mg\ kg^{-1}$ são consideradas críticas para a cultura do milho e mesmo com o fornecimento de 60 $mg\ kg^{-1}$ de Zn no solo a concentração de Zn disponível no solo nesse experimento foram menores que 25 $mg\ kg^{-1}$ (Figura 11) e os teores na parte aérea estavam dentro do considerado adequado para o milho (FAGERIA, 2000) (Figura 9).

Além disso, um experimento avaliou o efeito da fitotoxicidade de Zn na cultura do milho. utilizou-se doses crescentes de Zn (0; 20; 225; 450;900 $mg\ Zn\ kg^{-1}$) e foi verificado aumento crescente dos pigmentos fotossintéticos do milho à medida que as concentrações de Zn foram aumentando no solo (GÁRGIA-GÓMES et al. 2018), isso corrobora com o maior incremento de IRC verificado no tratamento Zn_2 . Baran (2013) também verificou que o milho é uma espécie pouco sensível a altas concentrações de Zn no solo.

4.2.2 Massa seca da parte aérea, raiz, folhas e caule

A massa seca da parte aérea, da raiz, folhas e caule não apresentaram interação entre as formas de aplicação de Si e os tratamentos combinados e individuais de Si e Zn (Tabela 22).

Tabela 22- Massa seca da parte aérea, raiz folhas e colmo em função das formas de aplicação de Si no milho. Experimento II.

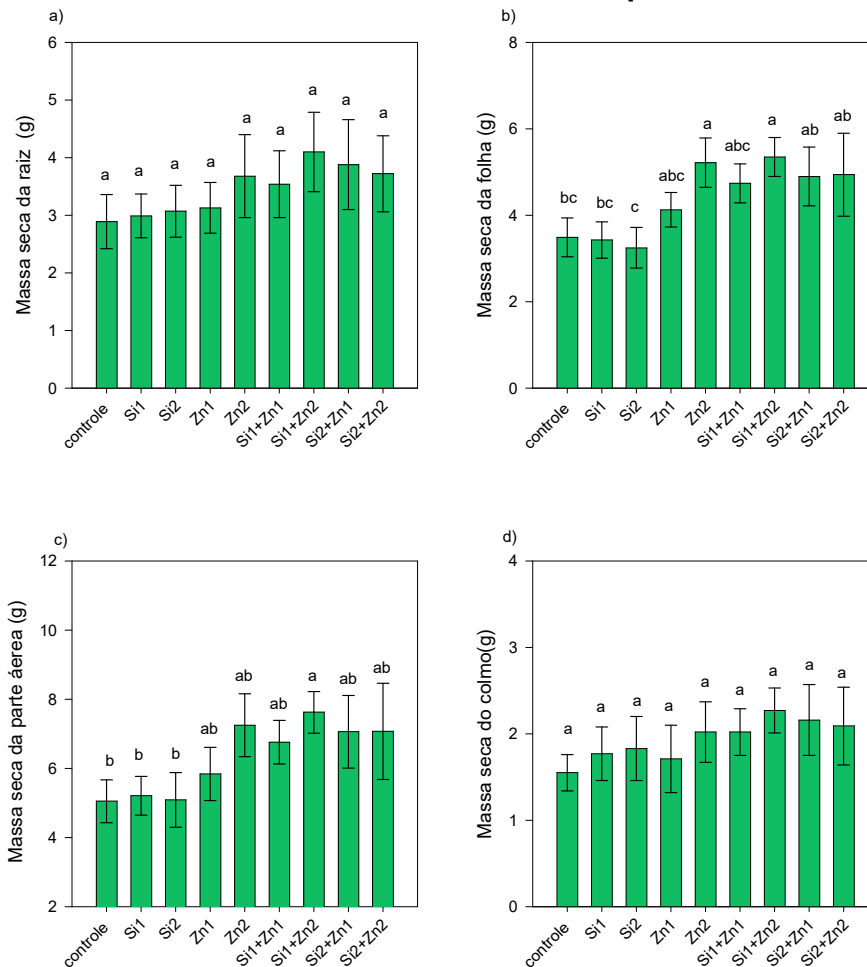
Formas de Aplicação (FA)	Variáveis			
	MSPA	MSR	MSF	MSC
	g planta			
Sulco	5,90 ± 0,75 a	3,22 ± 0,60 a	4,09 ± 0,49 a	1,81 ± 0,31 a
Foliar	6,37 ± 0,0,87 a	3,47 ± 0,65 a	4,47 ± 0,57 a	1,90 ± 0,36 a
Área Total	6,71 ± 0,79 a	3,64 ± 0,48 a	4,60 ± 0,52 a	2,11 ± 0,34 a
FV	P valor			
FA	Ns	Ns	Ns	Ns
TRAT	**	Ns	**	Ns
FAX TRAT	Ns	Ns	Ns	Ns
CV (%)	28,87	37,15	27,85	39,15

Médias seguidas da mesma letra não se diferenciam entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. MSPA= massa seca parte aérea; MSR= massa seca da raiz; MSF= massa seca das folhas; MSC= massa seca do colmo. CV= coeficiente de variação. TRAT = tratamentos combinados e individuais de Si e Zn. Valores após o sinal de ± indicam o erro padrão (n=4). **= significativo a 1% e 5%. * significativo a 5%. Ns= não significativo.

Observando os fatores isoladamente, o fator formas de aplicação de Si apresentaram semelhança entre os tipos de aplicação, por sua vez, o fator tratamentos combinados e individuais de Si e Zn apresentaram diferença nas variáveis massa seca da parte aérea e das folhas, as demais não se diferiram entre as médias (Tabela 22).

Notou-se maior incremento na massa seca das folhas do milho com os tratamentos Si1+Zn2 e Zn2, as quais apresentaram média de 5,35 e 5,22 g respectivamente, essas médias foram semelhantes ao incremento de massa seca nos tratamentos Zn1, Si1+Zn1, Si2+Zn1 e Si2+Zn2 (Figura 8).

Figura 8- Massa seca da raiz (a), massa seca das folhas (b), massa seca da parte aérea (c) e massa seca do colmo (d) em função dos tratamentos combinados e individuais de Si e Zn. Experimento II.



Médias seguidas da mesma letra não se diferenciam entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. Barras de erro representam o erro padrão (n=4). Controle (sem aplicação de silício e zinco); Si1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si); Si2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si); Zn1 (aplicação de 20 mg kg⁻¹ de Zn); Zn2 (aplicação de 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn2 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si2+Zn1 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn) e Si2+Zn2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn) exceto quando o silício foi aplicado via foliar, no qual foi fornecido uma concentração de 2,56 e 7,68 mg de Si vaso⁻¹ para os tratamentos Si1 e Si2, respectivamente].

O menor incremento de massa seca das folhas foi verificado no tratamento Si2 (3,25 g) e este foi semelhante ao controle, Si1, Zn1 e Si+Zn1. Isso indicou que em solo argiloso a aplicação da concentração maior de Si afetou negativamente a produção de massa seca do milho (Figura 8b).

Na variável massa seca da parte aérea foi verificado maior incremento no tratamento Si1+Zn2, este chegou à média de 7,62 g e diferenciou-se apenas dos tratamentos controle, Si1 e Si2. Notou-se menor incremento no tratamento Si2, com média de 5,09 g e foi diferente apenas do tratamento Si1+Zn2 (Figura 8c).

4.2.3 Teor de e acúmulo de silício e zinco na parte aérea

4.2.3.1 Teor e acúmulo de Si na parte aérea

A interação entre as formas de aplicação de Si e os tratamentos combinados e individuais de Si e Zn foi significativa. Observando as formas de aplicação dentro de cada tratamento, houve diferença nas formas de aplicação de Si nos tratamentos Si1, Si2, Si1+Zn1, Si1+Zn2, Si2+Zn1 e Si2+Zn2 (Tabela 23).

Observando as formas de aplicação dentro do tratamento Si1, observou-se que a aplicação de Si via sulco de semeadura contribuiu para maior incremento do teor de Si na parte aérea, diferindo-se das demais formas de aplicação. O menor incremento de teor de Si foi notado com a aplicação de Si via foliar. Verificando o tratamento Si2 dentro das formas de aplicação de Si, obteve-se maior teor de Si na parte aérea com a aplicação de Si em área total, menor teor quando aplicado via foliar e a aplicação de Si via sulco de semeadura, diferiu-se das demais formas de aplicação de Si (Tabela 23).

Comparado as formas de aplicação de Si dentro do tratamento Si1+Zn1, notou-se que a forma de aplicação em área total contribuiu para maior incremento do teor de Si e foi diferente do teor de Si verificado com a aplicação de Si via sulco de semeadura e via foliar. O tratamento Si1+Zn2 também apresentou maior teor de Si quando houve o fornecimento de Si em área total, a menor média foi verificada quando a aplicação de Si foi realizada no sulco de semeadura e a aplicação via foliar não se diferiu de ambas as formas de aplicação de Si (Tabela 23).

Foi notório no tratamento Si2+Zn1 dentro das formas de aplicação de Si que o fornecimento de Si em área total contribuiu para maior incremento do teor de Si na parte aérea, os menores teores de Si foram notados na aplicação via sulco de

semeadura e via foliar. Por fim, verificou-se maior média de teor de Si na parte aérea da planta no tratamento Si2+Zn2, quando houve a aplicação de Si via sulco de semeadura e em área total e este teor foi menor quando realizou-se o fornecimento de Si via foliar (Tabela 23).

Tabela 23-Desdobramento do teor de Si na parte aérea em função das formas de aplicação de Si e tratamentos combinados e individuais de Si e Zn no milho. Experimento II.

Tratamentos	Teor de Si (g kg ⁻¹)		
	Sulco	Foliar	Área total
Controle	2,55 ± 0,30 aD	3,27 ± 0,22 aB	2,55 ± 0,30 aE
Si1	14,83 ± 0,77 aAB	5,52 ± 1,04 cAB	10,54 ± 0,78 bBC
Si2	11,98 ± 0,96 bB	4,21 ± 0,30 cAB	16,41 ± 0,59 aA
Zn1	3,11 ± 0,23 aD	2,64 ± 0,37 aB	4,80 ± 0,49 aDE
Zn2	2,46 ± 0,13 aD	3,81 ± 0,66 aAB	3,07 ± 0,22 aE
Si1+Zn1	3,48 ± 0,73 cD	6,69 ± 1,27 bA	13,03 ± 0,94 aAB
Si1+Zn2	3,76 ± 0,20 bCD	5,75 ± 0,79 abAB	7,50 ± 1,52 aBC
Si2+Zn1	7,41 ± 1,89 abC	6,20 ± 0,22 bAB	10,62 ± 1,87 aBC
Si2+Zn2	15,91 ± 1,12 aA	3,85 ± 0,23 bAB	15,91 ± 0,42 aAB
FV		P valor	
FA		**	
TRAT		**	
FA X TRAT		**	
CV (%)		24,56	

Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não se diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. CV= coeficiente de variação. Valores após o sinal de ± indicam o erro padrão (n=4). TRAT= tratamentos combinados e individuais de Si e Zn. FA= Formas de aplicação. **= significativo a 1% e 5%. * significativo a 5%. Ns= não significativo. Controle (sem aplicação de silício e zinco); Si1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si); Si2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si); Zn1 (aplicação de 20 mg kg⁻¹ de Zn); Zn2 (aplicação de 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn2 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si2+Zn1 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn) e Si2+Zn2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn) exceto quando o silício foi aplicado via foliar, no qual foi fornecido uma concentração de 2,56 e 7,68 mg de Si vaso⁻¹ para os tratamentos Si1 e Si2, respectivamente].

Verificando a diferença entre os tratamentos dentro da forma de aplicação de Si via sulco de semeadura foi possível notar que houve maior incremento do teor de Si na parte aérea das plantas no tratamento Si2+Zn2, este foi parecido com o incremento de teor de Si atingido no tratamento Si1. Notou-se menor incremento do teor de Si nos tratamentos Zn2, controle, Zn1 e Si1+Zn, estes não foram diferentes do teor de Si encontrado nos tratamentos Si2+Zn2, Si1, Si2 e Si2+Zn1 (Tabela 23).

Os tratamentos dentro da forma de aplicação de Si via foliar apresentou resultado diferente da aplicação via sulco de semeadura, o tratamento Si1+Zn1

contribuiu para maior teor de Si na parte aérea e diferenciou apenas do tratamento Zn1, o menor incremento do teor de Si foi verificado no tratamento Zn1(Tabela 23).

Quando o Si foi aplicado em área total, notou-se maior incremento do teor de Si no tratamento Si2, este foi semelhante Si1+Zn1 e Si2+Zn2. Verificou-se menor incremento do teor de Si no tratamento controle e este foi semelhante aos tratamentos Zn1 e Zn2. Os tratamentos Si1, Si2+Zn1 e Si1+Zn2 apresentaram teor de Si intermediário (Tabela 23).

Os resultados encontrados nesse experimento onde utilizou-se solo argiloso visualmente apresentaram resultados diferentes do experimento I no qual foi utilizado solo arenoso (ver item 4.1.3.1.). Isso indica que absorção do Si pelas plantas também sofre influência do tipo de solo.

Houve interação entre as formas de aplicação de Si e tratamentos combinados e individuais de Si e Zn no acúmulo de Si na parte aérea das plantas de milho. Comparando as formas de aplicação de Si (FA) dentro de cada tratamento (TRAT) houve diferença entre as formas de aplicação de Si nos tratamentos individuais Si1 e Si2 e nos combinados Si1+Zn1 e Si2+Zn2 (Tabela 24).

Os tratamentos Si1 e Si2 apresentaram maior acúmulo de Si na parte aérea quando a aplicação de Si foi realizada em sulco de semeadura e não se diferenciaram da média encontrada com a aplicação em área total. Em ambos os tratamentos se notou menor média no acúmulo de Si com a aplicação via foliar. Estes resultados demonstram que a aplicação de Si via solo pode ser mais eficiente para aumento do acúmulo de Si na parte aérea das plantas de milho. Isso pode estar ligado ao maior contato íon-raiz que facilita a absorção do Si (Tabela 24).

No tratamento combinado Si1+Zn1 a forma de aplicação de Si em área total contribuiu para maior incremento no acúmulo de Si e as aplicações de Si via sulco de semeadura e via foliar trouxeram menor incremento. Enquanto no tratamento combinado Si2+Zn2 a forma de aplicação de Si via foliar contribuiu para menor incremento no acúmulo de Si e a aplicação de Si em área total contribuiu para aumento de Si acumulado na parte aérea. E a aplicação de Si via sulco de semeadura foi diferente de ambas as formas de aplicação de Si (Tabela 24).

Os tratamentos dentro das formas de aplicação de Si via sulco, foliar e em área total apresentaram diferença significativa. Quando se comparou os tratamentos combinados de Si e Zn dentro da aplicação via sulco notou-se maior incremento no acúmulo de Si nos tratamentos Si1 e Si2 (62,38 e 64,51mg planta⁻¹) e estes não foram

diferentes dos tratamentos Si2+Zn1 e Si2+Zn2. A menor média de acúmulo de Si foi notado no tratamento controle e foi semelhante ao encontrado nos tratamentos individuais Zn1 e Zn2 e combinados Si1+Zn1 e Si1+Zn2 (Tabela 24).

A aplicação via foliar de Si contribuiu para maior acúmulo de Si no tratamento Si2+Zn1(46,56 mg planta⁻¹), o qual foi diferente do acumulado nos tratamentos controle e Zn1. O menor incremento de acúmulo de Si foi obtido no tratamento Zn1 (14,53 mg planta⁻¹) e esta foi diferente apenas do tratamento maior média Si2+Zn1 (Tabela 24).

Tabela 24- Desdobramento do acúmulo de Si na parte aérea em função das formas de aplicação de aplicação de Si e tratamentos combinados e individuais de Si e Zn no milho. Experimento II.

Tratamentos	Acúmulo de Si (mg planta ⁻¹)		
	Sulco	Foliar	Área total
Controle	11,46 ± 3,12 aD	16,50 ± 1,62 aB	14,44 ± 2,19 aE
Si1	64,51 ± 4,91 aA	35,40 ± 4,23 bAB	52,27 ± 5,43 abBCD
Si2	62,38 ± 16,03 aA	23,43 ± 1,73 bAB	65,40 ± 3,04 aAB
Zn1	17,53 ± 1,88 aD	14,53 ± 4,51 aB	30,84 ± 1,65 aCDE
Zn2	16,67 ± 0,77 aD	24,48 ± 2,24 aAB	24,88 ± 3,34 aDE
Si1+Zn1	20,92 ± 4,43 bCD	33,77 ± 4,86 bAB	79,89 ± 5,60 aAB
Si1+Zn2	28,45 ± 2,18 aBCD	41,18 ± 8,61 aAB	62,74 ± 12,85 aAB
Si2+Zn1	49,72 ± 14,97 aABC	46,56 ± 7,70 aA	57,40 ± 8,15 aBC
Si2+Zn2	52,31 ± 2,22 bAB	21,93 ± 3,58 cAB	87,51 ± 3,76 aA
FV		F	
FA		**	
TRAT		**	
FAX TRAT		**	
CV (%)		33,26	

Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não se diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. CV= coeficiente de variação. Valores após o sinal de ± indicam o erro padrão (n=4). TRAT= tratamentos combinados e individuais de Si e Zn. FA= Formas de aplicação. **= significativo a 1% e 5%. * significativo a 5%. Ns= não significativo. Controle (sem aplicação de silício e zinco); Si1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si); Si2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si); Zn1 (aplicação de 20 mg kg⁻¹ de Zn); Zn2 (aplicação de 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn2 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si2+Zn1 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn) e Si2+Zn2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn) exceto quando o silício foi aplicado via foliar, no qual foi fornecido uma concentração de 2,56 e 7,68 mg de Si vaso⁻¹ para os tratamentos Si1 e Si2, respectivamente].

Visualizando os tratamentos dentro da forma de aplicação de Si em área total notou-se que o tratamento Si2+Zn2 contribuiu para maior acúmulo de Si na parte aérea e este incremento foi semelhante ao encontrado nos tratamentos Si2, Si2+Zn1 e Si1+Zn1. O menor acúmulo de Si pôde ser verificado no tratamento controle, este foi semelhante ao acúmulo de Si nos tratamentos Si1, Zn1 e Zn2 (Tabela 24).

Percebe-se nesse trabalho que as aplicações das concentrações de Si via solo

(30 e 120 mg kg⁻¹ de Si) ou via foliar (2,56 e 7,68 mg vaso⁻¹) contribuíram para o aumento significativo do teor e acúmulo de Si na parte aérea das plantas de milho e é notório diferença nos teores em função das formas de aplicação de Si. Nota-se que em alguns tratamentos houve redução do teor e acúmulo de Si em função da combinação de Si em Zn, mas em outros a combinação não afetou o teor e acúmulo de Si.

A eficiência da aplicação de fertilizantes no aumento da concentração de Si nas plantas foi reportada por muitos autores e mostrou ser eficiente independentemente das formas de aplicação (FREITAS et al. 2011; PILON; SORATTO; MORENO, 2013; NAEEM; ABDUL; FAROOQ, 2014; ZHAO et al., 2020).

4.2.3.2 Teor e acúmulo de Zn na parte aérea

A interação entre FA x TRAT não foi significativa, observando os fatores isoladamente somente o fator tratamentos combinados ou individuais de Si e Zn apresentaram diferença entre si para teor e acúmulo de Zn (Tabela 25).

Tabela 25- Teor e acúmulo de zinco em função das formas de aplicação de Si no milho. Experimento II.

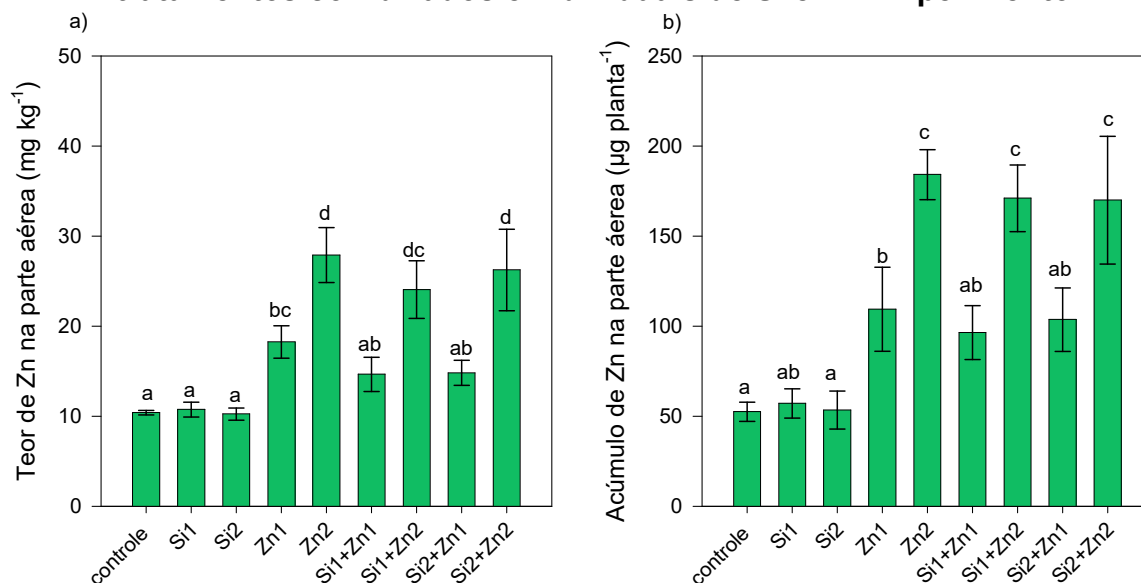
Formas de aplicação de Si(FA)	Teor	Acúmulo
	Zn	Zn
	mg kg ⁻¹	µg planta ⁻¹
Via sulco	17,61 ± 2,25 a	107,13 ± 19,56 a
Via foliar	17,66 ± 2,23 a	114,27 ± 22,65 a
Área total	17,19 ± 1,39 a	116,12 ± 14,05,43 a
FV	F	F
FA	Ns	Ns
TRAT	**	**
FAXTRAT	Ns	Ns
CV(%)	31,87	38,76

Médias seguidas da mesma letra não se diferenciam entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. CV= coeficiente de variação. TRAT = tratamentos combinados e individuais de Si e Zn. Valores após o sinal de ± indicam o erro padrão (n=4). **= significativo a 1% e 5%. * significativo a 5%. Ns= não significativo.

A Figura 9a apresenta o teor de Zn na parte aérea em função dos tratamentos combinados e individuais de Si e Zn. Foi possível notar menor incremento do teor de Zn na parte aérea com o tratamento Si2 (10,24 mg kg⁻¹ de Zn), este foi semelhante ao controle, Si1, Si1+Zn1 e Si2+Zn2. O maior incremento do teor de Zn foi verificado nos tratamentos Zn2 e Si2+Zn2 (27,91 e 26,25 mg kg⁻¹ de Zn, respectivamente).

Comparando o teor de zinco do tratamento Zn1 (aplicação de 20 mg kg⁻¹ de Zn) com o controle (sem adição de Zn ou Si) houve aumento do teor de Zn na parte aérea das plantas de milho com o tratamento Zn1 (18,25 mg kg⁻¹ de Zn). Os tratamentos Si1+Zn1 e Si2+Zn1 apresentaram média do teor de Zn semelhante ao Zn1, mas também foi parecido com o tratamento controle (10,41 mg kg⁻¹). Isso indicou que o Si1 e Si2 pode ter interferido na absorção do Zn pelas plantas, atenuando a absorção de Zn.

Figura 9- Teor (a) e acúmulo (b) de zinco na parte aérea em função dos tratamentos combinados e individuais de Si e Zn. Experimento II.



Médias seguidas da mesma letra não se diferenciam entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. Barras de erro representam o erro padrão (n=4). Controle (sem aplicação de silício e zinco); Si1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si); Si2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si); Zn1 (aplicação de 20 mg kg⁻¹ de Zn); Zn2 (aplicação de 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn2 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si2+Zn1 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn) e Si2+Zn2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn) exceto quando o silício foi aplicado via foliar, no qual foi fornecido uma concentração de 2,56 e 7,68 mg de Si vaso⁻¹ para os tratamentos Si1 e Si2, respectivamente].

Comparando o tratamento Zn2 (aplicação de 60 mg kg⁻¹ de Zn) com os tratamentos Si1+Zn2 e Si2+Zn2 constatou-se que o Si aplicado em maior concentração (ver tratamento Si2+Zn2) não contribuiu para a redução da absorção de Zn pelas plantas de milho e foi possível notar que o Si aplicado em menor quantidade (ver tratamento Si1+Zn2) atenuou essa absorção, entretanto não se diferenciou do tratamento com alta concentração de Zn no solo (Zn2). O teor de Zn do tratamento Zn1 foi semelhante ao tratamento Si1+Zn2, apontando também que o Si pode ter contribuído para mitigação da absorção de Zn (Figura 9a).

Foi possível verificar menor acúmulo de Zn na parte aérea das plantas de milho nos tratamentos controle e Si2 (52,51 e 53,49 µg planta⁻¹ de Zn, respectivamente) e

estes foram semelhantes aos tratamentos Si1, Si1+Zn1 e S1+Zn2. O maior acúmulo de Zn na parte aérea foi verificado nos tratamentos Zn2, Si1+Zn2 e Si2+Zn2 (184,19; 171,03 e 170,01 $\mu\text{g planta}^{-1}$ de Zn, respectivamente). Comparando o tratamento individual de Zn1 com os tratamentos combinados Si1+Zn1 e Si2+Zn1 foi possível observar que estes tratamentos foram semelhantes ao tratamento em que foi aplicado 20 mg kg^{-1} de Zn, entretanto, também houve semelhança desses tratamentos com o controle e tratamentos individuais de Si1 e Si2, indicando que o Si pode ter contribuído para redução do acúmulo de Zn da parte aérea das plantas de milho quando as plantas foram submetidas aos tratamentos com 20 mg kg^{-1} de Zn (Figura 9b).

O resultado encontrado nesse experimento foi diferente do encontrado no experimento I, quanto ao efeito do Si na redução dos teores de Zn na parte aérea. No tratamento combinado Si1+Zn2 observou-se redução dos teores de Zn neste experimento, enquanto no experimento I houve aumento. Por outro lado, no tratamento Si2+Zn1 ocorreu o contrário, nesse experimento houve semelhança do teor de Zn da parte aérea com o tratamento que recebeu somente Zn em concentração alta (Zn2) e no experimento II foi observado redução do teor de Zn na parte aérea quando comparado com o tratamento Zn2 (Ver item 4.1.3.1). Quando verificado o acúmulo de Zn no tratamento Si2+Zn1 essa redução não foi significativa, mas visualmente ainda se percebe esse comportamento de redução (Figura 9b). A explicação para esse efeito ainda é desconhecida, sendo necessário maior aprofundamento nesse tema, mas isso pode estar ligado a disponibilidade do Zn em função das diferentes texturas de solo.

Os resultados apresentados nesse experimento apontam que é necessário maior atenção em afirmar que o Si possui efeito mitigatório na absorção de metais pesados, nem sempre o Si mostrou ser eficiente na redução do teor e acúmulo de Zn, isso também foi comentado por Bokor et al. (2014). Alguns trabalhos foram realizados verificando esse efeito e observaram resultado positivo do Si na redução da absorção de Zn (KAYA et al. 2009; SONG et al. 2011), entretanto esses estudos foram realizados em hidroponia.

Huang e Ma (2020) avaliaram o efeito do silício no suprimento de Zn através dos genes que transportam o Zn em plantas de arroz e eles concluíram que o silício não mitiga diretamente o teor de Zn nas plantas, mas reduz a sua absorção por meio da regulação do gene *OsZiP1*, o Si acumulado nas plantas é importante para que ocorra a regulação dessa expressão gênica, e por consequência contribuiu para a redução

de Zn nas plantas, pois regula o gene que limita a absorção. Provavelmente isso também ocorra nas plantas de milho, levando em consideração que pertencem à mesma família botânica.

4.2.4 Teores e acúmulo de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) e micronutrientes (B, Cu, Fe e Mn) da parte aérea.

Para os teores de nutrientes apenas a variável P apresentou interação significativa entre os fatores FA x TRAT (Tabela 26) e para o acúmulo de nutrientes a o K apresentou significância (Tabela 29). Observando os fatores isoladamente, no fator formas de aplicação de Si, foi notado diferença apenas para o teor de K (Tabela 30). Para o fator tratamentos combinados ou individuais de Zn e Si, observou-se diferença nos teores de K, Ca, Mg (Tabelas 26, 27, e 30) e Mn (Tabela 32) e para acúmulo foi notou-se diferença no acúmulo de N, P, Mg, S, B e Cu (Tabelas 26, 27, 28, 31 e 32).

Os teores de nutrientes na parte aérea das plantas nas condições em que o experimento foi conduzido apresentaram a seguinte sequência em ordem decrescente: Para macronutrientes $N > K > Mg > Ca > S > P$ e micronutrientes $Fe > Mn > B > Cu$ (Tabelas 26, 27, 28, 29, 30, 31 e 32).

Os teores e acúmulo de N tiveram comportamentos diferentes, os teores de N não se diferenciaram em função dos tratamentos combinados e individuais de Si e Zn, diferente do acúmulo de N, o qual apresentou diferença. Os tratamentos controle, Si1 e Si2 apresentaram o menor incremento no acúmulo de N e este diferenciou-se apenas do tratamento Si1+Zn2 (Tabela 26).

Esperava-se que o Si pudesse contribuir para incremento da concentração de N nas plantas de milho, mas esse resultado indicou que o Si não traz incrementos positivos na concentração de N na parte aérea das plantas de milho, corroborando com o verificado por Wallace, Romney e Mueller (1976) e Wallace (1989) que observaram que existe uma competição entre o ácido monossilícico e nitrato em experimento com gramíneas. Nesse experimento notou-se que o Si pode ter interferido na absorção de N.

O efeito negativo do Si para incrementos de N também foi notado por Schaller et al. (2016), mas em contrapartida, Laîné et al. (2019) em condições de campo avaliaram o efeito do silício na melhoria da eficiência de dois fertilizantes nitrogenados em *Brassica napus* e não foi verificado redução da absorção de N pela plantas com aplicação de Si, esses autores concluíram que o pode ser considerado a aplicação de

Si afim de melhorar a eficiência do N, e que este efeito está ligado diretamente com a melhoria da absorção do N provocada com a aplicação combinada de Si.

Tabela 26- Teor e acúmulo de N e Ca da parte aérea em função das formas de aplicação de Si e dos tratamentos combinados de Si e Zn no milho. Experimento II.

Formas de aplicação (FA)	N		Ca	
	Teor g kg ⁻¹	Acúmulo mg planta ⁻¹	Teor g kg ⁻¹	Acúmulo mg planta ⁻¹
Via sulco	28,97 ± 2,22 a	162,08 ± 15,85 a	4,69 ± 0,33 a	26,76 ± 3,17 a
Via foliar	28,55 ± 2,33 a	178,55 ± 17,25 a	4,61 ± 0,25 a	29,16 ± 3,56 a
Área total	26,55 ± 1,74 a	173,92 ± 17,94 a	4,61 ± 0,25 a	29,94 ± 3,07 a
Tratamentos				
Controle	30,00 ± 2,26 a	147,43 ± 11,15 b	4,75 ± 0,32 ab	24,80 ± 3,73 a
Si1	28,41 ± 1,62 a	145,85 ± 14,40 b	5,16 ± 0,25 a	26,72 ± 2,62 a
Si2	29,66 ± 2,29 a	145,11 ± 12,66 b	5,16 ± 0,29 a	25,70 ± 2,72 a
Zn1	29,41 ± 2,13 a	167,76 ± 17,78 ab	4,50 ± 0,29 ab	26,75 ± 4,59 a
Zn2	25,58 ± 1,82 a	180,21 ± 14,59 ab	4,58 ± 0,19 ab	32,77 ± 3,01 a
Si1+Zn1	26,75 ± 1,77 a	178,74 ± 15,83 ab	4,75 ± 0,25 ab	31,57 ± 2,69 a
Si1+Zn2	26,58 ± 2,02 a	201,37 ± 21,23 a	4,41 ± 0,26 ab	33,42 ± 3,37 a
Si2+Zn1	27,25 ± 1,89 a	187,31 ± 19,23 ab	4,16 ± 0,37 b	28,33 ± 2,46 a
Si2+Zn2	28,58 ± 2,82 a	189,86 ± 26,35 ab	4,25 ± 0,25 b	27,53 ± 4,24 a
FV		F		
FA	Ns	Ns	Ns	Ns
TRAT	Ns	**	*	Ns
FAX TRAT	Ns	Ns	Ns	Ns
CV (%)	16,67	21,55	13,66	25,05

Médias seguidas da mesma letra não se diferenciam entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. CV= coeficiente de variação. TRAT = tratamentos combinados e individuais de Zn e Si. Valores após o sinal de ± indicam o erro padrão (n=4). **= significativo a 1% e 5%. * significativo a 5%. Ns= não significativo. Controle (sem aplicação de silício e zinco); Si1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si); Si2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si); Zn1 (aplicação de 20 mg kg⁻¹ de Zn); Zn2 (aplicação de 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn2 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si2+Zn1 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn) e Si2+Zn2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn) exceto quando o silício foi aplicado via foliar, no qual foi fornecido uma concentração de 2,56 e 7,68 mg de Si vaso⁻¹ para os tratamentos Si1 e Si2, respectivamente].

O teor e acúmulo de Ca também apresentaram comportamentos diferente. O teor de Ca apresentou diferença entre os tratamentos, enquanto o acúmulo apresentou semelhança. Houve maior incremento do teor de Ca nos tratamentos individuais Si1 e Si2, e estes foram diferentes dos tratamentos combinados Si2+Zn2 e Si2+Zn1, que apresentaram menor média no teor de Ca. O controle foi diferente apenas das menores médias (Tabela 26). Esse resultado foi diferente do encontrado por Ma e Takahashi (1993) que verificaram que o Si reduziu a absorção de Ca.

Por outro lado, percebe-se que as concentrações de Zn aplicadas combinadas reduziram os teores de Ca. Prasad, Shivay e Kumar (2016) comentaram que o Zn interage de forma negativa com o Ca, isso porque eles competem pelos mesmos sítios de adsorção no solo e nas superfícies das raízes, entretanto, esse efeito negativo não é frequente. Os mesmos autores concluíram que esse comportamento pode estar relacionado ao comportamento fisiológico de cada espécie de planta.

O teor e acúmulo de Mg apresentaram diferença significativa em função dos tratamentos combinados e individuais. O maior teor de Mg foi notado no tratamento Si1, mas não foi diferente do encontrado no controle. O menor teor de Mg foi verificado no tratamento Si2+Zn1, e este foi parecido com a média do teor de Mg nos tratamentos Zn1 e Si2+Zn2. Comparando todos os tratamentos com o controle foi possível notar que apenas os tratamentos combinados Si2+Zn1 e Si2+Zn2 foi diferente do controle (Tabela 25), indicando que essas combinações reduziram a absorção de Mg pelas plantas de milho. Esse fato é curioso, levando em consideração que a literatura reporta efeito sinérgico entre os íons de Zn e Mg na cultura do milho, ou seja, um aumento absorção do outro (ABUNYEWA; MERCIE-QUARSHIE, 2004).

Por outro lado, no acúmulo de Mg os tratamentos Si1+Zn2 e Zn2 apresentaram maior acúmulo de Mg na parte aérea, foram diferentes da média de acúmulo do tratamento Si2 e semelhantes aos demais. O tratamento Si2 apresentou menor incremento de acúmulo de Mg e diferenciou apenas dos tratamentos que tiveram maiores acúmulo de Mg (Tabela 27). Uma explicação para esse efeito de redução do acúmulo com os tratamentos combinados com Si2+Zn2 e Si2+Zn2 e menor acúmulo de Mg com o tratamento individual Si2 seria o maior fornecimento indireto de K com a aplicação da maior concentração de Si.

O teor e acúmulo de S tiveram resultados diferentes em função dos tratamentos combinados e individuais de Si e Zn. O teor foi semelhante em todos os tratamentos, enquanto para o acúmulo foi verificado maiores incrementos de S nos tratamentos combinados Si1+Zn2 e Si2+Zn2 e estes tratamentos foram diferentes somente do tratamento Si1. O menor incremento no acúmulo de S foi notado no tratamento Si1 e este foi diferente dos maiores acúmulo de S e semelhante aos demais tratamentos (Tabela 27).

Tabela 27- Teor e acúmulo de Mg e S da parte aérea em função das formas de aplicação de Si e dos tratamentos combinados de Si e Zn no milho. Experimento II.

Formas de aplicação (FA)	Mg		S	
	Teor g kg ⁻¹	Acúmulo mg planta ⁻¹	Teor g kg ⁻¹	Acúmulo mg planta ⁻¹
Via sulco	5,37 ± 0,25 a	31,18 ± 4,02 a	1,31 ± 0,10 a	7,60 ± 0,86 a
Via foliar	5,53 ± 0,28 a	35,04 ± 4,66 a	1,21 ± 0,07 a	7,67 ± 0,63 a
Área total	5,31 ± 0,21 a	35,77 ± 5,15 a	1,24 ± 0,07 a	8,11 ± 0,94 a
Tratamentos				
Controle	5,88 ± 0,46 a	29,91 ± 4,59 ab	1,33 ± 0,13 a	6,68 ± 0,84 ab
Si1	5,97 ± 0,31 a	31,87 ± 3,66 ab	1,24 ± 0,08 a	6,31 ± 0,63 b
Si2	5,41 ± 0,16 ab	27,38 ± 3,99 b	1,30 ± 0,07 a	6,48 ± 0,94 ab
Zn1	5,31 ± 0,17 abc	31,24 ± 5,29 ab	1,22 ± 0,09 a	7,10 ± 0,84 ab
Zn2	5,60 ± 0,19 a	40,93 ± 5,46 a	1,20 ± 0,10 a	8,51 ± 0,46 ab
Si1+Zn1	5,60 ± 0,20 a	37,75 ± 4,04 ab	1,27 ± 0,07 a	8,45 ± 0,76 ab
Si1+Zn2	5,40 ± 0,29 ab	41,37 ± 4,20 a	1,17 ± 0,08 a	9,03 ± 1,13 a
Si2+Zn1	4,46 ± 0,27 c	32,62 ± 8,83 ab	1,22 ± 0,04 a	8,56 ± 1,13ab
Si2+Zn2	4,75 ± 0,18 bc	32,99 ± 6,45 ab	1,33 ± 0,09 a	9,03 ± 1,34 a
FV	F			
FA	Ns	Ns	Ns	Ns
TRAT	**	**	Ns	**
FAX TRAT	Ns	Ns	Ns	Ns
CV (%)	10,10	29,54	15,32	25,39

Médias seguidas da mesma letra não se diferenciam entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. CV= coeficiente de variação. TRAT = tratamentos combinados e individuais de Zn e Si. Valores após o sinal de ± indicam o erro padrão (n=4). **= significativo a 1% e 5%. * significativo a 5%. Ns= não significativo. Controle (sem aplicação de silício e zinco); Si1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si); Si2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si); Zn1 (aplicação de 20 mg kg⁻¹ de Zn); Zn2 (aplicação de 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn2 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si2+Zn1 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn) e Si2+Zn2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn) exceto quando o silício foi aplicado via foliar, no qual foi fornecido uma concentração de 2,56 e 7,68 mg de Si vaso⁻¹ para os tratamentos Si1 e Si2, respectivamente].

Este resultado contradiz o reportado por (MAILLARD et al., 2018) que comentaram que o Si pode atuar no aumento de S na planta através do aumento da transcrição do gene *HvST1;1* em arroz, levando em consideração que o tratamento individual de Si teve menor acúmulo de Si. Em contrapartida a combinação Si2+Zn2 apresentou maior acúmulo. A literatura reporta que o Zn e S podem ter efeito sinérgico ou antagônico (PRASAD; SHIVAY; KUMAR, 2016), nesse experimento o Zn pode ter favorecido a absorção de S.

Notou-se dentro das formas de aplicação de Si diferença nos teores de P nos tratamentos Si1, Si2 e Si2+Zn2, os demais foram semelhantes entre si. Observando as formas de aplicação dentro do tratamento Si1 foi verificado que a aplicação de Si

via sulco de semeadura contribuiu para maior incremento do teor de P na parte aérea das plantas de milho e o menor incremento foi visto com a aplicação de Si em área total. A aplicação via foliar apresentou teor de P semelhante as demais formas de aplicação (Tabela 28).

Tabela 26- Desdobramento do teor P na parte aérea em função das formas de aplicação de aplicação e tratamentos combinados e individuais de Si e Zn no milho. Experimento II.

Tratamentos	Teor de P (g kg ⁻¹)		
	Sulco	Foliar	Área total
Controle	1,10 ± 0,05 aA	1,15 ± 0,04 aA	1,00 ± 0,03 aB
Si1	1,25 ± 0,10 aA	1,15 ± 0,04 abA	1,02 ± 0,04 bAB
Si2	1,17 ± 0,11 abA	1,07 ± 0,03 bA	1,27 ± 0,05 aA
Zn1	1,07 ± 0,04 aA	1,12 ± 0,07 aA	1,02 ± 0,01 aAB
Zn2	1,02 ± 0,01 aA	1,17 ± 0,03 aA	1,15 ± 0,03 aAB
Si1+Zn1	1,02 ± 0,02 aA	1,00 ± 0,04 aA	1,05 ± 0,06 aAB
Si1+Zn2	1,05 ± 0,04 aA	1,17 ± 0,07 aA	1,07 ± 0,05 aAB
Si2+Zn1	1,05 ± 0,01 aA	1,15 ± 0,06 aA	1,05 ± 0,03 aAB
Si2+Zn2	1,15 ± 0,09 aA	1,17 ± 0,07 aA	0,95 ± 0,05 bB
FV		F	
FA		Ns	
TRAT		Ns	
FAXTRAT		*	
CV (%)		10,61	

Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não se diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. CV= coeficiente de variação. Valores após o sinal de ± indicam o erro padrão (n=4). TRAT= tratamentos combinados e individuais de Si e Zn. FA= Formas de aplicação. **= significativo a 1% e 5%. *=significativo a 5%. Ns= não significativo. Controle (sem aplicação de silício e zinco); Si1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si); Si2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si); Zn1 (aplicação de 20 mg kg⁻¹ de Zn); Zn2 (aplicação de 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn2 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si2+Zn1 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn) e Si2+Zn2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn) exceto quando o silício foi aplicado via foliar, no qual foi fornecido uma concentração de 2,56 e 7,68 mg de Si vaso⁻¹ para os tratamentos Si1 e Si2, respectivamente].

Quando verificado o efeito das formas de aplicação de Si dentro do tratamento Si2 o resultado foi diferente do tratamento anterior, houve maior incremento do teor de P com a aplicação do Si em área total e menor com a aplicação via foliar. A aplicação via sulco de semeadura foi semelhante as demais formas de aplicação (Tabela 28).

Comparando as formas de aplicação de Si dentro do tratamento Si2+Zn2 as aplicações via sulco de semeadura e foliar apresentaram maiores teores de P na parte aérea e foi diferente do teor de P encontrado na aplicação em área total, onde foi notado menor teor de P (Tabela 28).

Observando os tratamentos combinados e individuais de Si e Zn dentro de cada

tratamento, não houve diferença entre os tratamentos dentro das formas de aplicação via sulco de semeadura e via foliar. Notou-se dentro da forma de aplicação em área total que o tratamento Si₂ contribuiu para aumento do incremento no teor de P na parte aérea das plantas de milho e o menor teor de P foi notado no tratamento Si₂+Zn₂. Os demais tratamentos foram semelhantes ao tratamento Si₂, controle e Si₂+Zn₂ (Tabela 28).

Notou-se o efeito benéfico do Si no aumento da absorção de fósforo quando aplicado a maior concentração de Si (Si₂) e com a forma de aplicação de Si em área total. Esse resultado corrobora com o citado na literatura, onde é comentado que o silicato compete pelos mesmos sítios de adsorção que o fosfato, tornando o P disponível em maior concentração na solução do solo e conseqüentemente é absorvido pelas plantas em maior quantidade (PRADO; FERNANDES, 2001; POZZA et al. 2007; PULZ et al. 2008).

No tratamento Si₂+Zn₂ observou-se maior incremento no acúmulo de K com a forma de aplicação de Si em área total e menor incremento quando aplicação de Si ocorreu via foliar. A forma de aplicação de Si via sulco de semeadura apresentou diferença entre as demais formas de aplicação (Tabela 29).

Verificando os tratamentos combinados e individuais de Si e Zn dentro de cada forma de aplicação de Si, houve diferença no acúmulo de K na parte aérea entre os tratamentos nas formas de aplicação de Si via sulco de semeadura e área total. A aplicação via foliar não apresentou diferença entre os tratamentos no acúmulo de K (Tabela 29).

Dentro da forma de aplicação via sulco de semeadura, notou-se maior incremento do acúmulo de K na parte aérea das plantas de milho nos tratamentos combinados de Si₂+Zn₁ e Si₂+Zn₂ e estes foram diferentes apenas dos tratamentos controle e Si₁. Os menores incrementos foram vistos no tratamento individual de Si₁ e controle estes foram diferentes apenas dos tratamentos que possuíram maior incremento, isso indicou que possivelmente a combinação Si₁ com Zn₁ contribuiu para maior incremento no acúmulo de K na parte aérea das plantas de milho (Tabela 29).

Os maiores incrementos de acúmulo de K possivelmente ocorreu em função da aplicação indireta de uma maior quantidade de K com a aplicação da concentração maior de Si (Si₂). Mesmo assim, é possível notar nas aplicações via sulco de semeadura e em área total que quando o Si₂ foi combinado com o Zn₁ e Zn₂ o

acúmulo de K foi ainda maior. Esses maiores acúmulos verificados nos tratamentos combinados de Zn e Si, foram semelhantes ao encontrados por Moinuddin e Imas (2010), estes autores verificaram o efeito da aplicação de Zn e K no sorgo em forragem e notaram que a aplicação de Zn aumentou a concentração de K nas plantas.

Tabela 29- Desdobramento do acúmulo de K na parte aérea em função das formas de aplicação de aplicação de Si e tratamentos combinados e individuais de Si e Zn no milho. Experimento II.

Acúmulo de K (mg planta⁻¹)			
Tratamentos	Sulco	Foliar	Área total
Controle	73,47 ± 1,81 aB	79,83 ± 5,00 aA	88,04 ± 7,12 aBCD
Si1	72,05 ± 3,92 aB	84,32 ± 7,85 aA	64,47 ± 1,76 aD
Si2	90,07 ± 14,00 aAB	88,56 ± 6,79 aA	109,32 ± 10,16 aBC
Zn1	86,54 ± 3,17 aAB	81,61 ± 7,60 aA	90,97 ± 4,46 aBCD
Zn2	100,89 ± 3,26 aAB	99,11 ± 3,54 aA	87,95 ± 3,74 aBCD
Si1+Zn1	86,02 ± 10,29 aAB	89,88 ± 4,66 aA	79,67 ± 5,45 aCD
Si1+Zn2	95,14 ± 9,43 aAB	91,91 ± 13,20 aA	88,70 ± 5,42 aBC
Si2+Zn1	125,51 ± 11,40 aA	95,84 ± 16,00 aA	125,23 ± 20,15 aAB
Si2+Zn2	120,10 ± 16,18 bA	81,41 ± 9,20 cA	155,16 ± 11,58 aA
FV		F	
FA		*	
TRAT		**	
FAX TRAT		**	
CV (%)		20,28	

Médias seguidas da mesma letra minúscula na linha e maiúscula na coluna não se diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. CV= coeficiente de variação. Valores após o sinal de ± indicam o erro padrão (n=4). TRAT= tratamentos combinados e individuais de Si e Zn. FA= Formas de aplicação. **= significativo a 1% e 5%. *=significativo a 5%. Ns= não significativo. Controle (sem aplicação de silício e zinco); Si1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹de Si); Si2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹de Si); Zn1 (aplicação de 20 mg kg⁻¹ de Zn); Zn2 (aplicação de 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn2 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si2+Zn1(aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹de Zn) e Si2+Zn2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn) exceto quando o silício foi aplicado via foliar, no qual foi fornecido uma concentração de 2,56 e 7,68 mg de Si vaso⁻¹ para os tratamentos Si1 e Si2, respectivamente].

Observando o teor de K na parte aérea das plantas de milho em função da aplicação dos tratamentos combinados e individuais de Si e Zn foi possível notar maior incremento do teor de K no tratamento Si2, este não se diferiu dos tratamentos controle, Si2+Zn1 e Si2+Zn2. Os menores incrementos do teor de K foi observado nos tratamentos Si1+Zn1 e Si1+Zn2, estes foram semelhantes aos tratamentos Si1 e Zn1 (Tabela 30).

Observando apenas os tratamentos individuais Si1 e Si2 notou-se diferença entre o teor de K, mostrando que o tratamento Si2 trouxe maior incremento no teor de K, entretanto foi semelhante ao controle. Os tratamentos Zn1 e Zn2 apresentam

semelhança em razão do teor de K na parte aérea das plantas de milho (Tabela 30). Provavelmente o aumento do teor de K na parte aérea com os tratamentos individual ou combinado de Si₂ (maior concentração de Si) se deu em função da aplicação maior de K indiretamente com a aplicação do silicato de potássio para fornecimento de Si, ou o fornecimento de Si em maior concentração pode ter aumentado a atividade da H⁺-ATPase nas raízes, e por consequência levou ao aumento do teor de K (LIANG, 1999).

O maior acúmulo de P na parte aérea foi notado no tratamento Si₁+Zn₂ e foi diferente somente do tratamento controle. O tratamento controle apresentou menor média de acúmulo de P e foi diferente apenas do tratamento Si₁+Zn₂ (Tabela 30). Esperava-se maior acúmulo de P nos tratamentos individuais de Si₁ e Si₂, devido ser comentado por vários autores que o Si aumenta a disponibilidade de P no solo (PRADO; FERNANDES, 2001; POZZA et al. 2007; PULZ et al. 2008).

O maior acúmulo de P na parte aérea foi notado no tratamento Si₁+Zn₂ e foi diferente somente do tratamento controle. O tratamento controle apresentou menor média de acúmulo de P e foi diferente apenas do tratamento Si₁+Zn₂ (Tabela 30). Esperava-se maior acúmulo de P nos tratamentos individuais de Si₁ e Si₂, devido ser comentado por vários autores que o Si aumenta a disponibilidade de P na no solo (PRADO; FERNANDES, 2001; POZZA et al. 2007; PULZ et al. 2008).

Diferente do teor de B, o acúmulo apresentou diferença em função dos tratamentos combinados e individuais de Si e Zn. O maior incremento no acúmulo de B foi encontrado no tratamento Zn₂ e este acúmulo foi diferente apenas do encontrado no tratamento Si₂ (Tabela 30). Hosseini et al. (2007) em experimento avaliando a interação entre B X Zn no milho, foi utilizado doses crescentes de B e Zn e esses autores notaram que à medida que as doses de Zn e B foram aumentadas houve aumento da concentração de B na parte aérea das plantas, indicando que o Zn não reduz a absorção do B.

Ainda foi verificado por esses autores que mesmo sem aplicação de B o aumento crescente da dose de Zn contribuiu para o aumento da concentração de B na parte aérea das plantas de milho, corroborando com o encontrado neste trabalho onde a maior concentração de Zn no solo (Zn₂) gerou maior incremento de B na parte aérea das plantas de milho. Tavallali (2017) comentou que há comportamento sinérgico entre o Zn e B quando estes se encontram em níveis adequados.

Tabela 30- Teor de K, acúmulo de P e teor e acúmulo de B da parte aérea em função das formas de aplicação de Si e dos tratamentos combinados de Si e Zn no milho. Experimento II.

Formas de aplicação (FA)	K		P		B	
	Teor	Acúmulo	Teor	Acúmulo	Teor	Acúmulo
	g kg ⁻¹	mg planta ⁻¹	mg kg ⁻¹	µg planta ⁻¹		
Via sulco	17,16 ± 1,31 a	6,37 ± 0,76 a	17,52 ± 1,34 a	98,98 ± 10,89 a		
Via foliar	14,38 ± 1,31 b	7,19 ± 1,01 a	15,44 ± 1,71 a	95,86 ± 11,20 a		
Área total	15,63 ± 1,49 ab	7,12 ± 0,95 a	15,63 ± 2,21 a	95,86 ± 11,77 a		
Tratamentos						
Controle	17,08 ± 1,78 abc	5,53 ± 0,66 b	17,41 ± 1,34 a	87,46 ± 9,87 ab		
Si1	14,50 ± 1,07 bcd	5,93 ± 0,67 ab	18,00 ± 2,22 a	92,23 ± 11,16 ab		
Si2	20,16 ± 0,96 a	5,89 ± 0,87 ab	17,33 ± 1,43 a	85,86 ± 11,50 b		
Zn1	15,50 ± 1,44 bcd	6,21 ± 0,82 ab	16,00 ± 2,10 a	91,99 ± 7,63 ab		
Zn2	13,83 ± 1,47 cd	8,10 ± 1,00 ab	17,16 ± 1,81 a	119,75 ± 12,96 a		
Si1+Zn1	12,91 ± 0,79 d	6,98 ± 0,86 ab	15,33 ± 2,21 a	97,64 ± 12,75 ab		
Si1+Zn2	12,08 ± 0,66 d	8,35 ± 0,76 a	14,66 ± 2,26 a	106,84 ± 13,56 ab		
Si2+Zn1	17,33 ± 1,60 abc	7,65 ± 1,17 ab	14,25 ± 2,25 a	95,02 ± 8,07 ab		
Si2+Zn2	18,16 ± 2,48 ab	7,41 ± 1,34 ab	15,66 ± 1,49 a	103,33 ± 14,08 ab		
FV			F			
FA	*	Ns	Ns	Ns		
TRAT	**	**	Ns	*		
FAX TRAT	Ns	Ns	Ns	Ns		
CV (%)	20,00	28,58	25,67	26,37		

Médias seguidas da mesma letra não se diferenciam entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. CV= coeficiente de variação. TRAT = tratamentos combinados e individuais de Zn e Si. Valores após o sinal de ± indicam o erro padrão (n=4). **= significativo a 1% e 5%. * significativo a 5%. Ns= não significativo. Controle (sem aplicação de silício e zinco); Si1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si); Si2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si); Zn1 (aplicação de 20 mg kg⁻¹ de Zn); Zn2 (aplicação de 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn2 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si2+Zn1 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn) e Si2+Zn2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn) exceto quando o silício foi aplicado via foliar, no qual foi fornecido uma concentração de 2,56 e 7,68 mg de Si vaso⁻¹ para os tratamentos Si1 e Si2, respectivamente].

O menor acúmulo de B foi visualizado no tratamento Si2 e este foi diferente apenas do tratamento Si2 (Tabela 30). Esse efeito era esperado levando em consideração que a literatura reporta o efeito do Si na redução da concentração de B nas plantas (GUNES et al., 2007; INAL; PILBEAM; GUNES, 2009; AKCAY; ERKAN, 2016).

Para o Cu apenas o acúmulo foi influenciado pelos tratamentos combinados e individuais de Si e Zn. Quando foi verificado o acúmulo de Cu na parte aérea das plantas de milho em função dos tratamentos, notou-se maior incremento no tratamento Si1+Zn2 e este incremento foi diferente do encontrado nos tratamentos controle, Si1 e Si2 e semelhante a todos os demais (Tabela 31).

Tabela 31- Teor e acúmulo de Cu e Fe da parte aérea em função das formas de aplicação de Si e dos tratamentos combinados de Si e Zn no milho. Experimento II.

Formas de aplicação (FA)	Cu		Fe	
	Teor mg kg ⁻¹	Acúmulo µg planta ⁻¹	Teor mg kg ⁻¹	Acúmulo µg planta ⁻¹
Via sulco	7,48 ± 0,33 a	43,78 ± 6,01 a	136,11 ± 19,78 a	775,50 ± 147,70 a
Via foliar	7,58 ± 0,32 a	47,90 ± 6,13 a	136,69 ± 20,30 a	842,56 ± 135,93 a
Área total	7,25 ± 0,26 a	48,29 ± 5,29 a	129,36 ± 15,32 a	837,81 ± 129,08 a
Tratamentos				
Controle	7,83 ± 0,12 a	39,61 ± 4,98 b	157,41 ± 23,93 a	779,10 ± 119,16 a
Si1	7,36 ± 0,36 a	38,41 ± 4,69 b	137,75 ± 12,84 a	698,24 ± 82,07 a
Si2	7,66 ± 0,24 a	38,84 ± 5,11 b	150,83 ± 16,78 a	751,19 ± 160,02 a
Zn1	7,41 ± 0,33 a	42,97 ± 4,87 ab	141,16 ± 28,73 a	779,10 ± 87,81 a
Zn2	7,00 ± 0,19 a	50,60 ± 6,30 ab	133,50 ± 26,50 a	1001,67 ± 285,60 a
Si1+Zn1	7,50 ± 0,29 a	50,68 ± 4,88 ab	123,50 ± 17,65 a	832,25 ± 136,80 a
Si1+Zn2	7,50 ± 0,36 a	56,99 ± 5,04 a	119,16 ± 15,58 a	870,31 ± 76,27 a
Si2+Zn1	7,08 ± 0,29 a	49,97 ± 7,49 ab	109,66 ± 12,33 a	770,00 ± 155,02 a
Si2+Zn2	7,58 ± 0,49 a	51,83 ± 8,90 ab	133,50 ± 17,82 a	884,94 ± 135,38 a
FV			F	
FA	Ns	Ns	Ns	Ns
TRAT	Ns	**	Ns	Ns
FAX TRAT	Ns	Ns	Ns	Ns
CV (%)	9,30	27,12	31,18	38,37

Médias seguidas da mesma letra não se diferenciam entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. CV= coeficiente de variação. TRAT = tratamentos combinados e individuais de Zn e Si. Valores após o sinal de ± indicam o erro padrão (n=4). **= significativo a 1% e 5%. * significativo a 5%. Ns= não significativo. Controle (sem aplicação de silício e zinco); Si1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si); Si2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si); Zn1 (aplicação de 20 mg kg⁻¹ de Zn); Zn2 (aplicação de 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn2 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si2+Zn1 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn) e Si2+Zn2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn) exceto quando o silício foi aplicado via foliar, no qual foi fornecido uma concentração de 2,56 e 7,68 mg de Si vaso⁻¹ para os tratamentos Si1 e Si2, respectivamente].

O menor incremento no acúmulo de Cu foi notado nos tratamentos Si1, Si2 e controle e este diferenciou-se apenas ao tratamento que obteve maior incremento (Tabela 31).

Esse resultado foi semelhante ao verificado no experimento I. A literatura reporta que o Cu e o Zn competem pelos mesmos sítios de absorção (PÉREZ-NOVO et al., 2011)., provavelmente isso ocorreu no nesse experimento o que resultou no aumento do teor de Cu na parte aérea das plantas. O efeito do Si na redução da concentração de Cu nas plantas também é apontado na literatura (EL-BELTAGI et al., 2020) e isso corrobora com o efeito de redução dos teores de Cu na parte aérea das plantas de

milho nos tratamentos individuais Si1 e Si2.

Apenas o teor de Mn sofreu influência dos tratamentos combinados e individuais de Zn. Foi verificado maior teor de Mn na parte aérea no tratamento Si1, este teor foi diferente do encontrado nos tratamentos Si1+Zn1, Si1+Zn2 e Si2+Zn1 e semelhante a todos os demais tratamentos (Tabela 32).

Tabela 32- Teor e acúmulo de Mn da parte aérea em função das formas de aplicação de Si e dos tratamentos combinados de Si e Zn no milho. Experimento II.

Formas de aplicação (FA)	Mn	
	Teor	Acúmulo
	mg kg ⁻¹	µg planta ⁻¹
Via sulco	110,97 ± 9,19 a	630,55 ± 74,14 a
Via foliar	102,63 ± 11,25 a	629,39 ± 71,37 a
Área total	101,80 ± 6,23 a	671,53 ± 105,00 a
Tratamentos		
Controle	118,41 ± 8,52 ab	594,37 ± 84,57 a
Si1	124,66 ± 7,14 a	642,44 ± 75,36 a
Si2	114,83 ± 8,28 abc	572,79 ± 88,34 a
Zn1	105,83 ± 10,95 abc	597,85 ± 71,35 a
Zn2	101,58 ± 10,76 abc	737,88 ± 110,98 a
Si1+Zn1	97,75 ± 7,77 bc	644,93 ± 40,13 a
Si1+Zn2	91,25 ± 7,46 c	695,57 ± 104,20 a
Si2+Zn1	92,25 ± 9,27 c	631,08 ± 61,85 a
Si2+Zn2	99,66 ± 11,79 abc	677,51 ± 114,76 a
FV	F	
FA	Ns	Ns
TRAT	**	Ns
FAX TRAT	Ns	Ns
CV (%)	18,54	29,05

Médias seguidas da mesma letra não se diferenciam entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. CV= coeficiente de variação. TRAT = tratamentos combinados e individuais de Zn e Si. Valores após o sinal de ± indicam o erro padrão (n=4). **= significativo a 1% e 5%. * significativo a 5%. Ns= não significativo. Controle (sem aplicação de silício e zinco); Si1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si); Si2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si); Zn1 (aplicação de 20 mg kg⁻¹ de Zn); Zn2 (aplicação de 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn2 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si2+Zn1 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn) e Si2+Zn2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn) exceto quando o silício foi aplicado via foliar, no qual foi fornecido uma concentração de 2,56 e 7,68 mg de Si vaso⁻¹ para os tratamentos Si1 e Si2, respectivamente].

Foi possível perceber que a aplicação dos tratamentos combinados de Si e Zn causou uma redução da absorção de Mn pelas plantas (Tabela 32). O comportamento dos teores de Mn nas plantas de milho cultivadas em solo argiloso foi semelhante ao verificado no experimento I (Tabela 13). Isso indica que o Zn pode reduzir os teores de Mn nas plantas de milho.

4.2.5 Teor de silício e zinco no solo

4.2.5.1 Teor de silício no solo

Não houve diferença significativa para a interação entre os fatores FA x TRAT. Verificando cada fato isoladamente também não houve diferença significativa (Tabela 33).

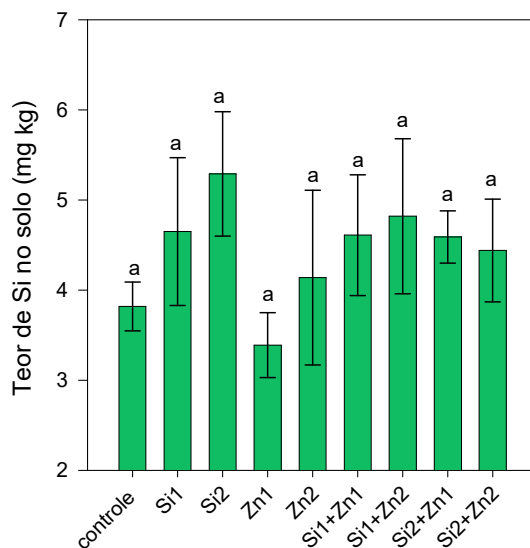
Tabela 33- Teor de Si no solo extraído pelo método cloreto de cálcio 0,01 mol L⁻¹ em função das formas de aplicação de Si no milho. Experimento II.

Formas de aplicação de Si(FA)	Teor
	Si
	mg dm ³
Via sulco	4,90 ± 0,66 a
Via foliar	4,36 ± 0,55 a
Área total	3,99 ± 0,62 a
FV	F
FA	Ns
TRAT	Ns
FAXTRAT	Ns
CV (%)	31,87

Médias seguidas da mesma letra não se diferenciam entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. CV= coeficiente de variação. TRAT = tratamentos combinados e individuais de Si e Zn. Valores após o sinal de ± indicam o erro padrão (n=4). **= significativo a 1% e 5%. * significativo a 5%. Ns= não significativo. Controle (sem aplicação de silício e zinco); Si1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si); Si2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si); Zn1 (aplicação de 20 mg kg⁻¹ de Zn); Zn2 (aplicação de 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn2 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si2+Zn1 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn) e Si2+Zn2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn) exceto quando o silício foi aplicado via foliar, no qual foi fornecido uma concentração de 2,56 e 7,68 mg de Si vaso⁻¹ para os tratamentos Si1 e Si2, respectivamente].

A Figura 10 apresenta os dados do teor de Si no solo em função dos tratamentos combinados e individuais de Si e Zn, apesar da análise de variância não ter encontrado diferença significativa entre os tratamentos, a barra de erro mostrou que o tratamento Si2 (5,29 mg kg⁻¹ de Si) apresentou teor de Si diferente do controle e Zn1(3,82 e 3,39 mg kg⁻¹ de Si, respectivamente). Os teores de Si encontrados no solo foi semelhante ao verificado por Camargo et al. (2007).

Figura 10- Teor de Si no solo extraído pelo método cloreto de cálcio $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ em função dos tratamentos combinados e individuais de Si e Zn. Experimento II.



Médias seguidas da mesma letra não se diferenciam entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. Barras de erro representam o erro padrão ($n=4$). Controle (sem aplicação de silício e zinco); Si1 (aplicação de 30 mg kg^{-1} de Si); Si2 (aplicação de 120 mg kg^{-1} de Si); Zn1 (aplicação de 20 mg kg^{-1} de Zn); Zn2 (aplicação de 60 mg kg^{-1} de Zn); Si1+Zn1 (aplicação de 30 mg kg^{-1} de Si e 20 mg kg^{-1} de Zn); Si1+Zn2 (aplicação de 30 mg kg^{-1} de Si e 60 mg kg^{-1} de Zn); Si2+Zn1 (aplicação de 120 mg kg^{-1} de Si e 20 mg kg^{-1} de Zn) e Si2+Zn2 (aplicação de 120 mg kg^{-1} de Si e 60 mg kg^{-1} de Zn) exceto quando o silício foi aplicado via foliar, no qual foi fornecido uma concentração de 2,56 e 7,68 mg de Si vaso⁻¹ para os tratamentos Si1 e Si2, respectivamente].

4.2.5.2 Teor de zinco no solo

Os teores de Zn do solo nos tratamentos que receberam concentrações de Zn foram considerados altos pelo Boletim 100 (RAIJ, 1997).

Houve interação entre as formas de aplicação de Si e tratamentos combinados e individuais de Si e Zn para a variável teor de Zn no solo. Dentro das formas de aplicação de Si, apenas o tratamento Si1+Zn2 apresentou diferença entre as médias. Notou-se menor teor de Zn no solo quando a aplicação de Si foi realizada no sulco de semeadura ($2,46 \text{ mg dm}^{-3}$ de Zn) e maior teor quando realizada via foliar ($14,66 \text{ mg dm}^{-3}$ de Zn). A aplicação de Si em área total apresentou média diferente das demais formas de aplicação de Si ($11,26 \text{ mg dm}^{-3}$ de Zn) (Figura 11).

Verificando os tratamentos combinados e individuais de Si e Zn percebeu-se diferença entre os tratamentos em todas as formas de aplicação de Si. Quando foi observado os tratamentos dentro da forma de aplicação de Si via sulco de semeadura notou-se menor média no teor de Zn no solo nos tratamentos controle e Si2 ($0,16 \text{ mg dm}^{-3}$ de Zn) e estes tratamentos tiveram teor de Zn no solo semelhantes aos

tratamentos Si1, Zn1, Si1+Zn1, Si1+Zn2 e Si2+Zn2 (Figura 11).

O maior teor de Zn do solo foi notado no tratamento Si2+Zn2 (14,90 mg dm⁻³ de Zn) e este diferenciou-se de todos os demais tratamentos. Comparando o tratamento individual de Zn1 (20 mg kg⁻¹ de Zn) com o controle (sem aplicação de Si e Zn), foi possível notar semelhança, e isso apontou que a aplicação de 20 mg kg⁻¹ de Zn não causou elevado incremento no teor de Zn do solo e verificando os tratamentos combinados Si1+Zn1 e Si2+Zn1 também foi notado semelhança com o controle e Zn1 (Figura 11).

Verificando os tratamentos combinados e individuais de Si e Zn percebeu-se diferença entre os tratamentos em todas as formas de aplicação de Si. Quando foi observado os tratamentos dentro da forma de aplicação de Si via sulco de semeadura notou-se menor média no teor de Zn no solo nos tratamentos controle e Si2 (0,16 mg dm³ de Zn) e estes tratamentos tiveram teor de Zn no solo semelhantes aos tratamentos Si1, Zn1, Si1+Zn1, Si1+Zn2 e Si+Zn2 (Figura 11).

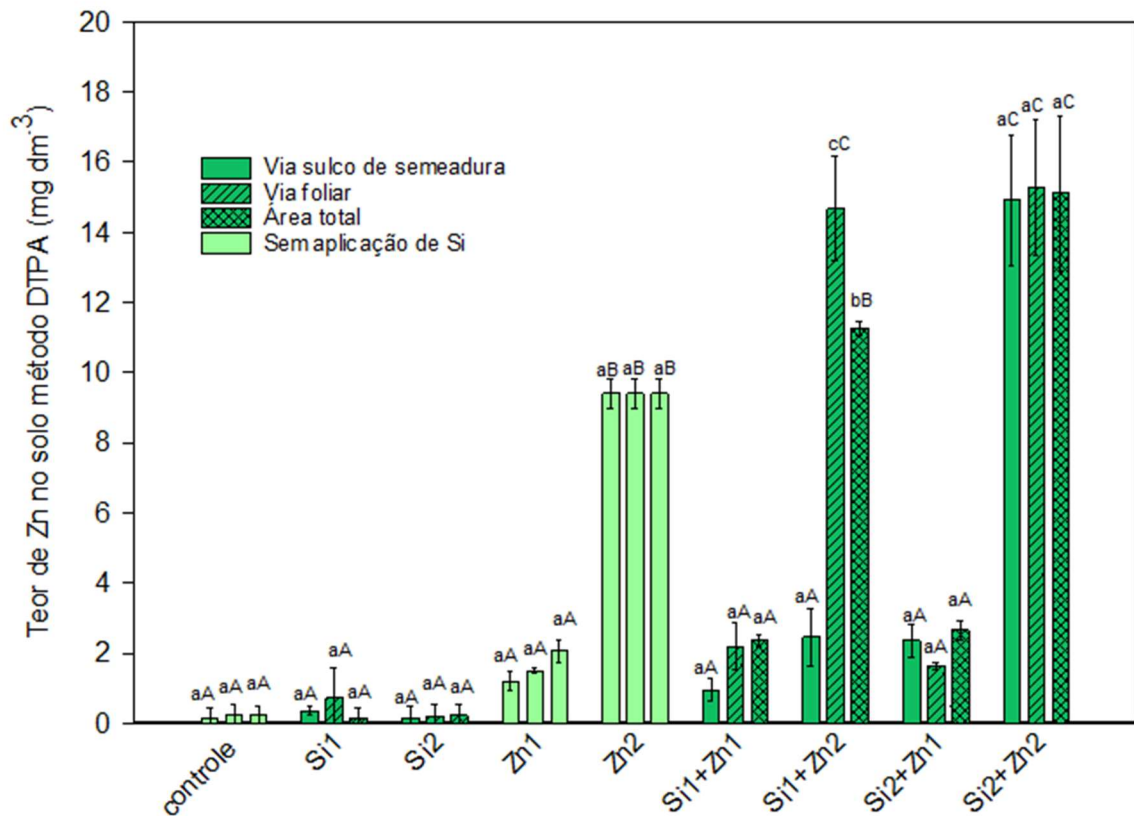
O maior teor de Zn do solo foi notado no tratamento Si2+Zn2 (14,90 mg dm⁻³ de Zn) e este diferenciou-se de todos os demais tratamentos. Comparando o tratamento individual de Zn1 (20 mg kg⁻¹ de Zn) com o controle (sem aplicação de Si e Zn), foi possível notar semelhança, e isso apontou que a aplicação de 20 mg kg⁻¹ de Zn não causou elevado incremento no teor de Zn do solo e verificando os tratamentos combinados Si1+Zn1 e Si2+Zn1 também foi notado semelhança com o controle e Zn1 (Figura 11).

Comparando o tratamento Zn2 com o controle notou-se diferença no teor de Zn do solo. O tratamento Zn2 apresentou teor médio de 9,40 mg dm⁻³ de Zn e foi maior que o teor encontrado no tratamento combinado Si1+Zn2 (2,46 mg dm⁻³ de Zn), isso indicou que o Si pode ter contribuído para a atenuação do teor de Zn do solo, o contrário ocorreu no tratamento combinado Si2+Zn2, o qual apresentou média superior ao tratamento individual de Zn2, apontando que essa combinação se comportou negativamente para a redução da disponibilidade de Zn no solo (Figura 11).

Quando foi observado o teor de zinco no solo em função dos tratamentos dentro da forma de aplicação de Si via foliar notou-se menor teor de Zn no solo com o tratamento individual Si2 (0,20 mg dm⁻³ de Zn) este teor assemelhou-se aos dos tratamentos controle, Si1, Zn1, Si1+Zn1 e Si2+Zn1. Os maiores teores de Zn no solo foram verificados nos tratamentos Si2+Zn2 e Si1+Zn1 (15,26 e 14,66 mg dm⁻³ de Zn,

respectivamente) e diferenciou-se e esses teores foram diferentes do notado nos demais tratamentos (Figura 11).

Figura 11- Desdobramento do teor de zinco (Zn) no solo extraído pelo método DTPA em função das formas de aplicação de aplicação de Si e tratamentos combinados e individuais de Si e Zn no milho. Experimento II.



Médias seguidas da mesma letra não se diferenciam entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. Letras minúsculas representam as formas de aplicação de Si, enquanto as maiúsculas indicam os tratamentos dentro de cada forma de aplicação de Si. Barras de erros representam o erro padrão (n=4). Controle (sem aplicação de silício e zinco); Si1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si); Si2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si); Zn1 (aplicação de 20 mg kg⁻¹ de Zn); Zn2 (aplicação de 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn2 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si2+Zn1 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn) e Si2+Zn2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn) exceto quando o silício foi aplicado via foliar, no qual foi fornecido uma concentração de 2,56 e 7,68 mg de Si vaso⁻¹ para os tratamentos Si1 e Si2, respectivamente].

Comparando o tratamento individual de Zn1 com o controle, notou-se que houve uma semelhança entre as médias, indicando que o Zn1, não aumentou a disponibilidade de Zn na solução do solo, ainda, quando se observou as médias dos teores de Zn aplicado os tratamentos combinados Si1+Zn1 e Si2+Zn1 foi possível notar que estes foram semelhantes ao tratamento controle e Zn1 (Figura 11).

Observando o tratamento Zn2 (9,40 mg dm⁻³ de Zn) verificou-se média do teor de Zn superior ao do tratamento controle, sendo diferente estatisticamente. Todavia, quando se comparou o tratamento Zn2 com os tratamentos combinados Si1+Zn2 e

Si₂+Zn₂ (15,26 e 14,66 mg dm⁻³ de Zn, respectivamente), foi notado que a aplicação de Si₂ via foliar pôde ter contribuído para maior teor de Zn disponível no solo (Figura 11).

Averiguando os tratamentos individuais e combinados de Si e Zn dentro da forma de aplicação de Si em área total foi possível verificar menor teor de Zn no solo com o tratamento Si₁ (0,16 mg dm⁻³ de Zn) e este não foi diferente dos teores de Zn no solo observados nos tratamentos controle, Si₂, Zn₁, Si₁+Zn₁, Si₂+Zn₁. O maior teor de Zn no solo foi observado no tratamento combinado Si₂+Zn₂ (15,10 mg dm⁻³ de Zn) e este foi diferente dos teores de Zn no solo encontrados nos demais tratamentos (Figura 11).

Verificando o tratamento individual Zn₁, observou-se comportamento semelhante ao notado nos tratamentos dentro das formas de aplicação de Si via sulco de semeadura e foliar. Quando se comparou o tratamento individual Zn₂, notou-se semelhança na média do teor de Zn no solo encontrado com o tratamento Si₁+Zn₂ (11,26 mg dm⁻³ de Zn), mostrando que a aplicação em conjunto do Si₁ não contribuiu para atenuação do teor de Zn no solo, e comparando o tratamento Si₂+Zn₂ com o Zn₂, foi identificado resultado semelhante de quando foi verificado os tratamentos dentro das formas de aplicação via sulco de semeadura e foliar. A combinação de Si₂+Zn₂ apresentou resultado negativo quanto a mitigação do Zn no solo, apresentando teor de Zn superior ao verificado no tratamento individual de Zn₂ (Figura 11).

Esse resultado foi diferente do encontrado por Zajaczkowska, Korzeniowska e Sienkiewicz-Cholewa (2020), esses autores não observaram redução dos teores de Zn no solo com aplicação das concentrações de Si aplicadas via solo ou via foliar. Entretanto, as concentrações de Zn no solo e de Si do experimento realizado por esses autores foram superiores as utilizadas neste experimento e ainda o solo possuía textura arenosa, diferente deste presente experimento.

O resultado encontrado nesse experimento indica que o comportamento do Si em solos com altos teores de Zn podem ser diferente em função do tipo de solo. Apesar de ser observado aumentos das concentrações de Zn no solo após a aplicação das concentrações de Zn, os teores de Zn disponível no solo ficaram abaixo do que foi fornecido, sendo menores do que o encontrado no experimento I (ver item 4.1.5.2), onde foi aplicado as mesmas concentrações de Zn no solo, esse efeito provavelmente ocorreu devido ao solo do experimento II possuir mais teor de argila, dessa forma o

Zn pode ter sido adsorvido pelos coloides da fração argila do solo ficando disponível em menor quantidade.

4.2.6 Atributos do solo (pH, V%, H+Al, P, K, Ca, Mg, S, B, Cu e Mn)

Não houve interação entre os fatores FA x TRAT em nenhum dos atributos do solo (Tabelas 34, 35 e 36). Verificando cada fator isolado, foi identificado no fator formas de aplicação de Si diferença significativa para as variáveis K (Tabela 34), S (Tabela 35), B, Cu e Mn (Tabela 36). Quando observado o fator tratamentos combinados e individuais de Si e Zn notou-se diferença significativa apenas para a variável K, as demais variáveis apresentaram médias semelhantes (Tabelas 34, 35 e 36).

Os teores de K e P no solo foram considerados muito baixo (RAIJ et al. 1997), isso era um resultado esperado, levando em consideração que solos que ainda não receberam manejo da fertilidade do solo tem baixa respostas as primeiras adubações.

A acidez do solo e V% estavam na média, Ca, Mg e S foram considerados altos, o Mn apresentou valor médio, enquanto o Cu apresentou teor considerado alto e o B apresentou valores abaixo do recomendado (RAIJ et al., 1997).

Era esperado que o pH sofresse modificações em função da aplicação dos tratamentos combinados e individuais de Si. Esse resultado foi diferendo do verificado por Zajaczkowska, Korzeniowska e Sienkiewicz-Cholewa (2020), que observou diferença nos valores do pH do solo em função da aplicação combinada e individual de Si e Zn.

Assim como na planta, era acreditado que o teor de P do solo fosse aumentado com a aplicação dos tratamentos individuais Si1 e Si2, levando em consideração que o silicato torna o fosfato mais disponível na solução do solo em função da competição pelos mesmos sítios de adsorção no complexo coloidal (PRADO; FERNANDES, 2001). É possível que esse efeito de aumento de disponibilidade de P ocorra somente com a aplicação de grandes quantidades de Si no solo, como quando é utilizado corretivos a base de Si para correção da acidez do solo.

O maior incremento do teor de potássio no solo foi visto quando a aplicação de Si foi realizada em sulco de semeadura e o menor incremento foi notado com a aplicação de Si via foliar (Tabela 34). Já era esperado maior eficiência do fornecimento de K com aplicações via sulco de semeadura, levando em consideração que a aplicação da adubação de K é recomendada via sulco de semeadura (RAIJ et.

al., 1997).

Tabela 34- Valores de pH, P, H+Al, K, Ca no solo em função das formas de aplicação de Si e dos tratamentos combinados e individuais de Si e Zn no milho. Experimento II.

Formas de aplicação (FA)	Variáveis				
	pH	P	H+Al	K	Ca
	CaCl ₂	mg dm ³	mmol _c dm ⁻³		
Via sulco	5,43 ± 0,09 a	5,44 ± 1,05 a	23,33 ± 1,48 a	0,61 ± 0,10 a	23,74 ± 1,65 a
Via foliar	5,40 ± 0,09 a	4,96 ± 1,10 a	23,44 ± 1,54 a	0,48 ± 0,05 b	23,85 ± 1,19 a
Área total	5,35 ± 0,09 a	5,70 ± 1,34 a	23,51 ± 1,54 a	0,51 ± 0,08 ab	24,07 ± 1,49 a
Tratamentos					
Controle	5,34 ± 0,16 a	6,66 ± 1,73 a	24,66 ± 2,21 a	0,55 ± 0,06 ab	23,33 ± 1,37 a
Si1	5,37 ± 0,08 a	6,11 ± 1,74 a	23,44 ± 2,01 a	0,85 ± 0,10 ab	22,55 ± 1,52 a
Si2	5,37 ± 0,10 a	5,44 ± 1,17 a	23,88 ± 1,43 a	0,75 ± 0,11 a	23,00 ± 0,93 a
Zn1	5,35 ± 0,09 a	5,00 ± 1,10 a	24,44 ± 1,84 a	0,50 ± 0,07 b	23,33 ± 1,21 a
Zn2	5,38 ± 0,07 a	4,88 ± 0,82 a	23,33 ± 1,37 a	0,44 ± 0,09 b	25,11 ± 2,33 a
Si1+Zn1	5,43 ± 0,05 a	5,55 ± 1,30 a	22,33 ± 1,05 a	0,44 ± 0,05 b	25,22 ± 1,59 a
Si1+Zn2	5,37 ± 0,08 a	4,88 ± 0,73 a	22,33 ± 1,57 a	0,45 ± 0,05 b	24,00 ± 1,23 a
Si2+Zn1	5,37 ± 0,09 a	5,11 ± 0,92 a	23,33 ± 1,26 a	0,51 ± 0,06 b	24,22 ± 1,90 a
Si2+Zn2	5,45 ± 0,09 a	4,66 ± 0,97 a	22,66 ± 0,95 a	0,56 ± 0,09 ab	24,22 ± 0,93 a
FV	F				
FA	Ns	Ns	Ns	**	Ns
TRAT	Ns	Ns	Ns	**	Ns
FA X TRAT	Ns	Ns	Ns	Ns	Ns
CV (%)	3,23	42,95	13,14	28,79	12,32

Médias seguidas da mesma letra não se diferenciam entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. CV= coeficiente de variação. TRAT = tratamentos combinados e individuais de Zn e Si. Valores após o sinal de ± indicam o erro padrão (n=4). **= significativo a 1% e 5%. * significativo a 5%. Ns= não significativo. Controle (sem aplicação de silício e zinco); Si1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si); Si2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si); Zn1 (aplicação de 20 mg kg⁻¹ de Zn); Zn2 (aplicação de 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn2 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si2+Zn1 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn) e Si2+Zn2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn) exceto quando o silício foi aplicado via foliar, no qual foi fornecido uma concentração de 2,56 e 7,68 mg de Si vaso⁻¹ para os tratamentos Si1 e Si2, respectivamente].

A aplicação de Si em área total foi igual as demais formas de aplicação. Quando se observou o teor de K no solo em função dos tratamentos combinados e individuais de Si e Zn notou-se maior incremento no teor de K no solo com o tratamento Si2 e esse tratamento foi semelhante ao controle, Si1 e Si2+Zn2. Os tratamentos Zn1, Zn2, Si1+Zn1, Si1+Zn2 e Si2+Zn1 apresentaram os menores incrementos de K no solo e foi diferente apenas do tratamento Si2 (Tabela 34). Os maiores teores de K de foram encontrados nos tratamentos onde foram aplicados os maiores teores de Si (Si2), esse efeito ocorreu devido o fornecimento indireto de K com aplicação de silicato de potássio nesses tratamentos.

A aplicação de Si em área total contribuiu para maior incremento de S no solo e apresentou média de teor superior ao encontrado com as aplicações de Si via sulco de semeadura e via foliar. As aplicações via foliar e sulco de semeadura não se diferenciaram quanto ao teor de S no solo (Tabela 35).

Tabela 35 – Teores de Mg, V% e S no solo em função das formas de aplicação de silício e dos tratamentos combinados e individuais de Si e Zn no milho. Experimento II.

Formas de aplicação (FA)	Variáveis		
	Mg	V	S
	mmol _c dm ³	%	mg dm ³
Via sulco	11,92 ± 0,91 a	60,77 ± 2,11 a	11,03 ± 1,90 b
Via foliar	12,14 ± 0,73 a	60,77 ± 1,94 a	11,51 ± 1,37 b
Área total	12,11 ± 0,86 a	60,70 ± 2,62 a	13,85 ± 1,64 a
Tratamentos			
Controle	12,00 ± 0,89 a	59,00 ± 2,98 a	14,33 ± 1,94 a
Si1	11,44 ± 0,84 a	59,88 ± 1,22 a	12,66 ± 2,06 a
Si2	11,88 ± 0,80 a	60,11 ± 1,96 a	11,44 ± 1,29 a
Zn1	12,11 ± 0,86 a	59,55 ± 3,02 a	11,88 ± 1,86 a
Zn2	12,66 ± 1,02 a	61,77 ± 3,15 a	12,00 ± 0,97 a
Si1+Zn1	12,33 ± 0,40 a	62,77 ± 1,35 a	10,88 ± 1,36 a
Si1+Zn2	11,88 ± 0,79 a	61,55 ± 2,34 a	11,55 ± 1,51 a
Si2+Zn1	11,88 ± 0,87 a	60,44 ± 2,13 a	11,77 ± 2,04 a
Si2+Zn2	12,11 ± 1,04 a	61,67 ± 1,85 a	12,66 ± 1,70 a
FV	F		
FA	Ns	Ns	**
TRAT	Ns	Ns	Ns
FA X TRAT	Ns	Ns	Ns
CV (%)	13,66	7,32	26,64

Médias seguidas da mesma letra não se diferenciam entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. CV= coeficiente de variação. TRAT = tratamentos combinados e individuais de Zn e Si. Valores após o sinal de ± indicam o erro padrão (n=4). ***= significativo a 1% e 5%. * significativo a 5%. Ns= não significativo. Controle (sem aplicação de silício e zinco); Si1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si); Si2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si); Zn1 (aplicação de 20 mg kg⁻¹ de Zn); Zn2 (aplicação de 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn2 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si2+Zn1 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn) e Si2+Zn2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn) exceto quando o silício foi aplicado via foliar, no qual foi fornecido uma concentração de 2,56 e 7,68 mg de Si vaso⁻¹ para os tratamentos Si1 e Si2, respectivamente].

A disponibilidade de S no solo está ligada principalmente aos processos de mineralização e imobilização da matéria orgânica (HOBUSS et al., 2007) para que esses processos ocorram de maneira rápida é necessário maior atividade dos microrganismos, acredita-se que a aplicação de Si em área total pode ter contribuído para maior atividade microbiana, entretanto, esta é uma hipótese que precisa ser

verificada, ou, pode ter ocorrido competição entre os íons sulfato e silicato pelos mesmos sítios de adsorção (POZZA et al., 2009).

O teor de B no solo foi maior quando o Si foi aplicado via sulco de semeadura e apresentou diferença do teor verificado com as aplicações de Si via foliar e em área total, estes apresentaram as menores médias de teores de B no solo. Esse resultado indica que em casos de solos com deficiência de B e que seja necessário aplicar Si, a aplicação de Si via sulco mostra ser mais eficiente no aumento da disponibilidade de B no solo (Tabela 36).

Tabela 36- Teor de B, Cu, Fe e Mn no solo em função das formas de aplicação de Si e dos tratamentos combinados e individuais de Si e Zn no milho. Experimento II.

	B	Cu	Mn
	mg dm ³		
Via sulco	0,19 ± 0,01 a	1,58 ± 0,06 a	4,39 ± 0,43 ab
Via foliar	0,16 ± 0,01 b	1,61 ± 0,04 a	4,68 ± 0,42 a
Área total	0,16 ± 0,01 b	1,56 ± 0,04 a	4,05 ± 0,34 b
Tratamentos			
Controle	0,16 ± 0,01 a	1,67 ± 0,05 a	4,30 ± 0,44 a
Si1	0,16 ± 0,01 a	1,52 ± 0,04 bc	3,96 ± 0,23 a
Si2	0,18 ± 0,02 a	1,48 ± 0,06 c	4,20 ± 0,28 a
Zn1	0,16 ± 0,02 a	1,57 ± 0,03 abc	4,23 ± 0,27 a
Zn2	0,18 ± 0,01 a	1,60 ± 0,04 abc	4,36 ± 0,69 a
Si1+Zn1	0,18 ± 0,01 a	1,58 ± 0,04 abc	4,64 ± 0,59 a
Si1+Zn2	0,16 ± 0,01 a	1,63 ± 0,03 ab	4,46 ± 0,54 a
Si2+Zn1	0,17 ± 0,02 a	1,66 ± 0,05 a	4,67 ± 0,25 a
Si2+Zn2	0,15 ± 0,01 a	1,67 ± 0,07 a	4,55 ± 0,30 a
FV		F	
FA	**	**	*
TRAT	Ns	Ns	Ns
FA X TRAT	Ns	Ns	Ns
CV (%)	14,44	5,91	18,64

Médias seguidas da mesma letra não se diferenciam entre si pelo teste de Tukey a 5% de significância. CV= coeficiente de variação. TRAT = tratamentos combinados e individuais de Zn e Si. Valores após o sinal de ± indicam o erro padrão (n=4). **= significativo a 1% e 5%. * significativo a 5%. Ns= não significativo. Controle (sem aplicação de silício e zinco); Si1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si); Si2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si); Zn1 (aplicação de 20 mg kg⁻¹ de Zn); Zn2 (aplicação de 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn1 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn); Si1+Zn2 (aplicação de 30 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn); Si2+Zn1 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 20 mg kg⁻¹ de Zn) e Si2+Zn2 (aplicação de 120 mg kg⁻¹ de Si e 60 mg kg⁻¹ de Zn) exceto quando o silício foi aplicado via foliar, no qual foi fornecido uma concentração de 2,56 e 7,68 mg de Si vaso⁻¹ para os tratamentos Si1 e Si2, respectivamente].

O teor de Cu no solo foi influenciado pelos tratamentos combinados e individuais de Si e Zn. Notou-se que o tratamento onde foi aplicado a maior concentração de Si obteve menor concentração de Cu (Tabela 36). A literatura reporta que o Si alivia a

toxicidade de Cu no solo, reduzindo a sua disponibilidade para as plantas (GU et al., 2011; NING et al., 2016). Entretanto foi notado que esse efeito foi diferente nos tratamentos combinados com maior concentração de Si e os dois níveis de Zn (Si₂+Zn₁ e Si₂+Zn₂) esses tratamentos foram semelhantes ao controle. Possivelmente esse efeito se deu devido a competição do Zn com o Cu na solução do solo. A literatura menciona que o Zn aumenta a disponibilidade de Cu (PÉREZ-NOVO et al., 2011).

O teor de Mn no solo também foi influenciado pelas formas de aplicação de Si, sendo maior quando houve a aplicação de Si via foliar e menor quando a aplicação ocorreu em área total. A aplicação via sulco de semeadura foi semelhante as demais formas de aplicação de Si (Tabela 36).

A literatura reporta que o Si alivia o efeito de toxidez causada pelo manganês em plantas (AKCAY; ERKAN, 2016; SARTO et al., 2019), esse resultado mostra que a aplicação de Si em área total pode contribuir para a redução da disponibilidade de Mn no solo.

4.2.7 Considerações finais: Experimento II

Os tratamentos individuais e combinados de Si e Zn influenciaram os parâmetros de índice relativo de clorofila (IRC), altura, área foliar, massa seca da folha (MSF), massa seca da parte aérea, teores e acúmulo de Zn, teor de K, Ca, Mn, Mg e acúmulo de P, N, Ca, S, B, Cu nas plantas jovens de milho.

No solo os tratamentos individuais de Si e Zn também influenciaram teor de K e Cu no solo.

A aplicação de Si via sulco de semeadura contribuiu para aumento do teor de K no solo.

A aplicação de Si em área total contribuiu para maior incremento de S no solo.

A aplicação de Si via foliar contribuiu para maior incremento do teor de Mn no solo, enquanto a aplicação de Si em área total reduziu o teor de Mn disponível no solo.

Houve interação entre as formas de aplicação de Si e tratamentos combinados e individuais para os parâmetros teores de P e Si e acúmulo de Si e K na parte aérea das plantas jovens de milho e teor de Zn no solo.

Notou-se diferença nos teores de Zn no solo no tratamento Si₁+Zn₂, a aplicação via foliar de Si aumentou o teor de Zn no solo, enquanto a aplicação via sulco de semeadura contribuiu para a mitigação do Zn disponível. Os demais tratamentos não

tiveram diferença entre as formas de aplicação para o teor de Zn.

Quando o Si foi fornecido via sulco de semeadura e em área total, notou-se redução do Zn disponível no solo no tratamento combinado Si1+Zn2. Com a aplicação de Si via foliar foi notado aumento do Zn disponível com a aplicação combinada de Si1+Zn2 e Si2+Zn2 e a aplicação de Si em área total e sulco de semeadura de Si na combinação Si2+Zn2 não reduziu o Zn disponível no solo.

Os maiores teores de Zn na parte aérea das plantas jovens de milho foram observados nos tratamentos Zn2 e Si2+Zn2, isso indicou que o Si2 não ajudou atenuar absorção de Zn pelas plantas de milho, quando estas foram submetidas a concentração de 60 mg kg⁻¹ de Zn, entretanto, percebeu-se leve atenuação do teor de Zn na parte aérea nos tratamentos Si1+Zn2, Si2+Zn1 e Si1+Zn1. Não foi notado atenuação no acúmulo de Zn no tratamento Zn2 (aplicação de 60 mg kg⁻¹ de Zn) na parte aérea das plantas com a aplicação de silício.

Percebeu-se leve atenuação do acúmulo de Zn na parte aérea nos tratamentos combinados Si1+Zn1 e Si2+Zn1.

No geral as plantas jovens de milho não tiveram redução no seu desenvolvimento quando submetidas a maiores concentrações de Zn.

5 CONCLUSÃO

Independentemente do tipo de solo, nem sempre o Si se comportou como mitigador dos teores de Zn no solo e na planta. As formas de aplicação influenciaram na mitigação da toxidez de Zn apenas no teor de Zn do solo argiloso.

A forma de aplicação de Si em área total no solo arenoso foi mais eficiente que as demais formas de aplicação de Si avaliadas para incrementos de área foliar, massa seca da parte aérea, raiz e caule, acúmulo de N, S, B, e Cu e teor de Cu na parte das plantas. A forma de aplicação via sulco de semeadura trouxe incrementos para o teor de K e V% no solo, e aumento do teor de N, enquanto a forma de aplicação de Si via foliar contribuiu para maior incremento de Mg na parte aérea.

A forma de aplicação de Si via sulco de semeadura do solo argiloso contribuiu para incremento do teor de K na parte aérea das plantas de milho. A aplicação de Si em área total no solo argiloso levou ao aumento do teor de S no solo e a forma de aplicação via foliar elevou os teores de Mn na parte aérea da planta.

REFERÊNCIAS

- ACCIOLY, A.M. A. et al. Silicato de cálcio como amenizante da toxidez de metais pesados. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, v.44, n.2, p.180-188, 2009.
- AHMED, A.-H.; LATIF, H. Phytoremediation of soil contaminated with zinc and lead by using *Zea mays* L. **Bangladesh Journal of Botany**, v. 44, n. 2, p. 293-298, 2018.
- AKCAY, U. C.; ERKAN, I. E. Silicon induced antioxidative responses and expression of BOR2 and two PIP family aquaporin genes in barley grown under boron toxicity. **Plant molecular biology reporter**, v. 34, n. 1, p. 318-326, 2016.
- ALCARDE, J.C. **Corretivo de acidez do solo: características e interpretações**. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos e Corretivos Agrícolas, 1992. 26 p. (Boletim Técnico, 6).
- ALOVISI, A. A. **Silicato de magnésio e bioativador na produtividade de Urochloa e de trigo**. 2018.73f. Dissertação de mestrado. Universidade Federal da Grande Dourados, 2018.
- AMBROSINI, V. G. et al, Reduction of copper phytotoxicity by liming: a study of the root anatomy of young vines (*Vitis labrusca* L.). **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 96, p. 270-280, 2015.
- AMBROSINI, V. G. et. al. Liming as an ameliorator of copper toxicity in black oat (*Avena strigosa* Schreb.). **Journal of Plant Nutrition**. 2016.
- ANWAAR, S. A. et al. Silicon (Si) alleviates cotton (*Gossypium hirsutum* L.) from zinc (Zn) toxicity stress by limiting Zn uptake and oxidative damage. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, n. 5, p. 3441-3450, 2015.
- ARAÚJO, E. O.; SILVA, M. A. C. Interação boro e zinco no crescimento, desenvolvimento e nutrição do algodoeiro. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Pernambuco, v. 7, n. 1, p. 720-727, 2012.
- ARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2nd ed. London: Academic Press, 1995. 889 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457/2016** – Amostras de solo - preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização: método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- BARBOSA, J. C.; MALDONADO JÚNIOR, W. Software AgroEstat: Sistema de análises estatísticas de ensaios agrônômicos. **Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias**, Jaboticabal, SP, Brasil, 2009.
- BARAN, A. Assessment of *Zea mays* Sensitivity to Toxic Content of Zinc in Soil. **Polish Journal of Environmental Studies**, v. 22, n. 1, 2013.

BARBOSA, N. C. et al. Formas de aplicação de silicato de cálcio e magnésio na cultura do sorgo em Neossolo Quartzarênico de Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 38, n. 4, p. 290-296, 2008.

BOCHICCHIO, R. et al. Root architecture and morphometric analysis of *Arabidopsis thaliana* grown in Cd/Cu/Zn-gradient agar dishes: A new screening technique for studying plant response to metals. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 91, p. 20-27, 2015.

BOKOR, B. et al. Silicon does not always mitigate zinc toxicity in maize. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 36, n. 3, p. 733-743, 2014.

BRASIL. **Decreto Federal nº 4.954, de 14 de janeiro de 2004**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, 2004.

BROADLEY, M. R. et al. Zinc in plants. **New phytologist**, v. 173, n. 4, p. 677-702, 2007.

CAMARGO, M. S.; KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S. Solubilidade do silício em solos: influência do calcário e ácido silícico aplicados. **Bragantia**, v. 66, p. 637-647, 2007.

CAMBROLLÉ, J. et al. Evaluation of zinc tolerance and accumulation potential of the coastal shrub *Limonium monopetalum* (L.) Boiss. **Environmental and experimental botany**, v. 85, p. 50-57, 2013.

CAMBROLLÉ, J. et al. Evaluating wild grapevine tolerance to copper toxicity. **Chemosphere**, v. 120, p. 171-178, 2015.

CARVALHO, W. A.; ESPÍNDOLA, C. R.; PACCOLA, A. A. Levantamento de solos da Fazenda Lageado-Estação Experimental "Presidente Médici". **Boletim Científico da Faculdade de Ciências Agrônômicas da UNESP**, n. 1, 1983.

CARVALHO, R. et al. Interações silício-fósforo em solos cultivados com eucalipto em casa de vegetação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 3, p. 557-565, mar. 2001.

CATEN, A. (2013). **Efeito de silicato e tensões de água no solo no crescimento de maracujazeiro amarelo**. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias, 105 f.

CETESB, SP. Decisão de Diretoria no 195-2005-E, de 23 de novembro de 2005. **DOE**, Poder Executivo, SP, 3/12/2005, seção 1, v.115, n.227, p.22-23. Retificação no DOE, 13/12/2005, v.115, n.233, p.42.

CHALMARDI, Z. K.; ABDOLZADEH, A.; SADEGHIPOUR, H. R. Silicon nutrition potentiates the antioxidant metabolism of rice plants under iron toxicity. **Acta physiologiae plantarum**, v. 36, n. 2, p. 493-502, 2014.

CLAESSEN, M.E.C. (Org.). **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. rev. atual. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPS, 1997. 212p. (Embrapa-CNPS. Documentos, 1).

CONTINI, E. et al. **Milho - Caracterização e Desafios Tecnológicos**. EMBRAPA, 2019. 45p.

CONAB. **Boletim da safra de grãos**. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Acesso em: fev. 2021.

CONAMA. Resolução no 420, de 28 de dezembro de 2009. **DOU n. 249**, 2009.

CUNHA, K. P. V.; NASCIMENTO, C. W. A.; SILVA, A. J. Silicon alleviates the toxicity of cádmium and zinc for maize (*Zea mays* L.) Grown on a contaminated soil. **J. Plant Nutr. Soil Sci.**, v. 171, p. 849-853, 2008.

CUNHA, K. P. V.; NASCIMENTO, C. W. A. Silicon effects on metal tolerance and structural changes in maize (*Zea mays* L.) grown on a cadmium and zinc enriched soil. **Water, air, and soil pollution**, v. 197, n. 1, p. 323-330, 2009.

DAYANANDAN, P.; KAUFMAN, P. B.; FRANKLIN, C. I. Detection of silica inplants. **American Journal of Botany**, v. 70, n. 7, p. 1079-1084, 1983.

DEMATTE, J. L. I. et al. Uso de silicatos em cana-de-açúcar. **Informações Agrônômicas**, v. 133, p. 7-12, 2011.

DONCHEVA, S. N. et al. Silicon amelioration of manganese toxicity in Mn-sensitive and Mn-tolerant maize varieties. **Environmental and Experimental Botany**, v. 65, n. 2-3, p. 189-197, 2009.

EBBS S. D.; KOCHIAN L.V. Toxicity of zinc and copper to Brassica species: implications for phytoremediation. **J Environ Qual**. V. 26, p.776–81, 1997.

ELINGS, A. Estimation of leaf area in tropical maize. **Agronomy Journal**, v. 92, n. 3, p. 436-444, 2000.

EPSTEIN, E. Silicon. **Annual review of plant biology**, v. 50, n. 1, p. 641-664, 1999.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. Londrina: Editora Planta, 2006. 403p.

FAGERIA, N. K. Níveis adequados e tóxicos de zinco na produção de arroz, feijão, milho, soja e trigo em solo de cerrado. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, Campina Grande, v. 4, n. 3, p. 390-395, 2000.

FASSBENDER, H. W. **Química de suelos com énfasis em suelos de América Latina**. 2 ed. San José: Instituto Interamericano de Cooperación para Agricultura, 1987.

FERRARI NETO, J. **Qualidade física e química do solo em função do sistema de**

produção e da aplicação superficial de silicato e calcário em experimento de longa duração. 2016. 184p. Tese de Doutorado. Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2016.

FERREIRA, D. F. **SISVAR**: sistema para análise de variância. Lavras: UFLA, 2003. (Software estatístico)

FREITAS, L. B. et al. Adubação foliar com silício na cultura do milho. **Revista Ceres**, v. 58, p. 262-267, 2011.

GALVEZ, L. et al. Effects of silicon on mineral composition of sorghum grown with excess manganese. **Journal of Plant Nutrition**, v. 12, n. 5, p. 547-561, 1989.

GARCÍA-GÓMEZ, C. et al. Comparative study of the phytotoxicity of ZnO nanoparticles and Zn accumulation in nine crops grown in a calcareous soil and an acidic soil. **Science of the total environment**, v. 644, p. 770-780, 2018.

GIROTTO, E. et al. Triggered antioxidant defense mechanism in maize grown in soil with accumulation of Cu and Zn due to intensive application of pig slurry. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 93, p. 145-155, 2013.

GJORGIEVA ACKOVA, D. Heavy metals and their general toxicity on plants. **Plant Science Today**, v. 5, n. 1, p. 15-19, 2018.

GU, H. et al. Mitigation effects of silicon rich amendments on heavy metal accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) planted on multi-metal contaminated acidic soil. **Chemosphere**, v. 83, p. 1234–1240, 2011

GUNES, A. et al. Silicon increases boron tolerance and reduces oxidative damage of wheat grown in soil with excess boron. **Biologia Plantarum**, v. 51, n. 3, p. 571-574, 2007.

GUÉVEL, M.H.; MENZIES, J. G.; BÉLANGER, R. R. Effect of root and foliar applications of soluble silicon on powdery mildew control and growth of wheat plants. **European Journal of Plant Pathology**, v. 119, n. 4, p. 429-436, 2007.

GU, H. et al. Silicon-mediated amelioration of zinc toxicity in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings. **Plant and Soil**, v. 350, n. 1, p. 193-204, 2012.

GU, H. et al. Mitigation effects of silicon rich amendments on heavy metal accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) planted on multi-metal contaminated acidic soil. **Chemosphere**, v. 83, p. 1234–1240, 2011.

GUTIERREZ, R. S., et al. Extração de silício em solos fertilizados com fosfato e silicato. **Pesqui. Agropecu. Trop.**, Goiânia, v. 41, n. 1, p. 01-07, 2011.

HAYSOM M.B.C.; CHAPMAN L.S. Some aspects of the calcium silicate trials at Mackay. **Proc. Austr. Sugar Cane Technol.** v. 42, p.117–122, 1975.

HOBUSS, C. et al. **Ciclo do enxofre.** Livro Virtual de Química. UFPEL. Pelotas,

2007.

HODSON, M. J. et al. Phylogenetic variation in the silicon composition of plants. **Annals of botany**, v. 96, n. 6, p. 1027-1046, 2005.

HOODA, P. S. **Trace Elements in Soils**. Ed. 1. United Kingdom: Wiley-Blackwell. 2010. 616 p.

HOSSEINI, S. et al. Effect of Zinc x Boron interaction on plant growth and tissue nutrient concentration of corn. **Journal of Plant Nutrition**, London, v. 30, n. 5, p. 773-781, 2007.

INAL, A.; PILBEAM, D. J.; GUNES, A. O silício aumenta a tolerância à toxicidade do boro e reduz os danos oxidativos na cevada. **Journal of Plant Nutrition**, v. 32, n. 1, p. 112-128, 2009.

JAMAMI, N. et al. Resposta da cultura do milho (*Zea mays* L.) à aplicação de boro e de zinco no solo. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 28, n. 1, p. 99-105, 2006.

KAYA, C. et al. Mitigation effects of silicon on maize plants grown at high zinc. **Journal of Plant Nutrition**, v. 32, n. 10, p. 1788-1798, 2009.

KACHINSKI, W. D.; VIDIGAL, J. C.; B.; ÁVILA, F. W. Zinco no solo, na planta e a saúde humana: uma revisão. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 7, p. e827973544-e827973544, 2020.

KELLER, C. et al. Effect of silicon on wheat seedlings (*Triticum turgidum* L.) grown in hydroponics and exposed to 0 to 30 μ M Cu. **Planta**, v. 241, n. 4, p. 847-860, 2015.

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; NOLLA, A. **Análise de silício: solo, planta e fertilizante**. Uberlândia: GPSi-ICIAG-UFU, 2004. 39 p. (Boletim Técnico, 2).

KORNDÖRFER, G. H.; DATNOFF, L. E. Adubação com silício: uma alternativa no controle de doenças de cana-de-açúcar e do arroz. **Info. Agronômicas**, n. 70, p 1-3, 1995.

LAÎNÉ, P. et al. Silicon promotes agronomic performance in *Brassica napus* cultivated under field conditions with two nitrogen fertilizer inputs. **Plants**, v. 8, n. 5, p. 137, 2019.

LEE, C. W.; CHOI, J.M.; PAK, C. H. Toxicidade de micronutrientes em gerânio de sementes (*Pelargonium × hortorum* Baley). **Journal of American Society for Horticultural Science**, v. 121, p. 77-82, 1996.

LIANG, Y.; WONG, J. W. C.; WEI, L. Silicon-mediated enhancement of cadmium tolerance in maize (*zea mays* L.) grown in cadmium contaminated soil. **Chemosphere**, v. 58, p.475-483, 2005.

LIMA FILHO, O. F. **História e uso do silicato de sódio na agricultura**. Dourados, MS: Embrapa Agropecuária Oeste, 2009.

LINCOLN, J. D. et al. Leaching assessments of hazardous materials in cellular telephones. **Environmental Science & Technology**, Berkeley, v. 41, p. 2572-2578, 2007.

LINHARES, L. A. et. al. Utilização dos modelos de Langmuir e de Freundlich na adsorção de cobre e zinco em solos Brasileiros. **Acta Agronômica**, v. 59(3), p. 303–315, 2010.

LIMA, V. I. **Crescimento e produção de gergelim cv. G3 em função de zinco e boro**. 2006. 72f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Paraíba, Areia, 2006.

LIMA NETO et al. Resposta de porta-enxertos de caramboleira à adubação com zinco. **Rev. Bras. Frutic.**, Jaboticabal - SP, v. 37, n. 4, p. 1074-1082, 2015.

LIU, C. et al. Effect of silicon on the alleviation of boron toxicity in wheat growth, boron accumulation, photosynthesis activities, and oxidative responses. **Journal of Plant Nutrition**, v. 40, n. 17, p. 2458-2467, 2017.

LONERAGAN, J. F. et al. Acúmulo de fósforo e toxicidade nas folhas em relação à oferta de zinco. **Soil Science of American Journal**, V.46 p.345–352 1982.

LU, Z. et al. Co-Amendment of S and Si Alleviates Cu Toxicity in Rice (*Oryza Sativa* L.) Grown on Cu-Contaminated Paddy Soil. **International journal of environmental research and public health**, v. 16, n. 1, p. 57, 2019.

MA, J. F.; TAKAHASHI, E. Interaction between calcium and silicon in water-cultured rice plants. **Plant and Soil**, v. 148, n. 1, p. 107-113, 1993.

MA, J. F. et al. Role of root hairs and lateral roots in silicon uptake by rice. **Plant Physiology**, v. 127, n. 4, p. 1773-1780, 2001.

MA, J.F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in plant science**, v.11, p.392-397, 2006.

MALAVOLTA, E. et al. **Avaliação do estado nutricional das plantas: Princípios e aplicações**. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319p.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 638p.

MAILLARD, A. et al. Silicon transcriptionally regulates sulfur and ABA metabolism and delays leaf senescence in barley under combined sulfur deficiency and osmotic stress. **Environmental and experimental botany**, v. 155, p. 394-410, 2018.

MASAROVIČ, D. et al. Effect of silicon application on *Sorghum bicolor* exposed to toxic concentration of zinc. **Biologia**, v. 67, n. 4, p. 706-712, 2012.

MEHRABANJOURANI, P. et al. Impacts of silicon nutrition on growth and nutrient status of rice plants grown under varying zinc regimes. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 27, n. 1, p. 19-29, 2015.

MAPODZEKE, J. M. et al. Modulation of Key Physio-Biochemical and Ultrastructural Attributes after Synergistic Application of Zinc and Silicon on Rice under Cadmium Stress. **Plants**, v. 10, n. 1, p. 87, 2021.

MAPODZEKE, J. M. et al. Effects of zinc and silicon on cadmium toxicity and mineral element translocation in two rice (*Oryza sativa*) genotypes. **Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)**, v. 44, n. 3, p. 294-310, 2018.

MANEGALE, C. L. M. et al. Silício: interação com o sistema solo-planta. **Journal of Agronomic Sciences**, Umuarama, v.4, n. especial, p.435-454, 2015.

MARQUES, M. C.; NASCIMENTO, C. W. A. Tolerância de mamona a zinco avaliada por fluorescência de clorofila e nutrição das plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 3, p. 850-857, 2014.

MASAROVIĆ, D. et al. Effect of silicon application on Sorghum bicolor exposed to toxic concentration of zinc. **Biologia**, v. 67, n. 4, p. 706-712, 2012.

MEHRABANJOURANI, P. et al. Impacts of silicon nutrition on growth and nutrient status of rice plants grown under varying zinc regimes. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 27, n. 1, p. 19-29, 2015.

MENEGATTI, R. D. et al. Diferentes concentrações de zinco no desenvolvimento de plantas de *Phaseolus vulgaris* L. **Evidência**, v. 17, n. 1, p. 23-32, 2017.

MIRANDA, R. A. Uma história de sucesso da civilização. **A Granja**, v. 74, n. 829, p. 24-27, 2018.

MOINUDDIN; IMAS, P. Effect of zinc nutrition on growth, yield, and quality of forage sorghum in respect with increasing potassium application rates. **Journal of plant nutrition**, v. 33, n. 14, p. 2062-2081, 2010.

NING, D. et al. In situ stabilization of heavy metals in multiple-metal contaminated paddy soil using different steel slag-based silicon fertilizer. **Environ Sci Pollut Res**, v. 23, p.23638–23647, 2016.

OLIVEIRA, L. A. **Silício em plantas de feijão e arroz: absorção, transporte, redistribuição e tolerância ao cádmio**. 2009. 157 f. Tese de Doutorado (Doutorado em Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

OTHMANI, A. et al. Effect of silicon supply methods on durum wheat (*Triticum durum* Desf.) response to drought stress. **Silicon**, p. 1-11, 2020.

PAIM, L. A. et al. Efeito do silício e do fósforo na disponibilidade de metais pesados

do solo pelo extrator Mehlich-1. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 27, n. 4, p. 780-787, 2003.

PÉREZ-NOVO, C. et al. Phosphorus effect on Zn adsorption–desorption kinetics in acid soils. **Chemosphere**, v. 83, n. 7, p. 1028-1034, 2011.

POZZA, A. A. A et al. Adsorção e dessorção aniônicas individuais por gibbsita pedogenética. **Química Nova**, v. 32, p. 99-105, 2009.

POZZA, A. A. A. et al. Retenção e dessorção competitivas de ânions inorgânicos em gibbsita natural de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, p. 1627-1633, 2007.

PULZ, A. L. et al. Influência de silicato e calcário na nutrição, produtividade e qualidade da batata sob deficiência hídrica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1651-1659, 2008.

PILON, C.; SORATTO, R. P.; MORENO, L. A. Effects of soil and foliar application of soluble silicon on mineral nutrition, gas exchange, and growth of potato plants. **Crop Science**, v. 53, n. 4, p. 1605-1614, 2013.

PINTO, S. I. C. et al. Silício como amenizador da fitotoxicidade de zinco em plantas jovens de *Eucalyptus urophylla* cultivadas em solução nutritiva. **Revista Árvore**, v. 33, n. 6, p. 1005-1014, 2009.

PINTO, M. C. et al. Avaliação dos parâmetros genéticos da cana-de-açúcar submetida à adubação com silício e ao estresse hídrico. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 12, p. 98919-98928, 2020.

PULZ L. A. et al. Influência de silicato e calcário na nutrição, produtividade e qualidade da batata sob deficiência hídrica. **R. Bras. Cien. Solo**, v. 32, p. 1651-1659, 2008.

PRADO, R.M.; FERNANDES, F.M. Efeito da escória de siderurgia e calcário na disponibilidade de fósforo de um Latossolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, p.1199-1204, 2001.

PRASAD, R.; SHIVAY, Y. S.; KUMAR, D. Interactions of zinc with other nutrients in soils and plants-A Review. **Indian Journal of Fertilisers**, v. 12, n. 5, p. 16-26, 2016.

RAIJ, B. V. et al. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Instituto Agrônomo/Fundação IAC, 1997.

RENGEL, Z. Availability of Mn, Zn and Fe in the rhizosphere. **Journal of soilscience and plant nutrition**, v. 15(2), p. 397–409, 2015.

RIVA, D. C. et al. Aspects of rice culture (*Oryza sativa* L.) from high lands to zinc growing doses. **Scientific Electronic Archives**, v. 12, n. 4, p. 63-67, 2019.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356p.

SARTO, M. V. M. et al. Effects of calcium and magnesium silicate on the absorption of silicon and nutrients in wheat. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 40, n. 1, p. 67-80, 2019.

SONG, A. et al. The alleviation of zinc toxicity by silicon is related to zinc transport and antioxidative reactions in rice. **Plant and Soil**, v. 344, n. 1, p. 319-333, 2011.

SOUZA, J. P. F. et al. Efeito de silicato de cálcio e magnésio no crescimento inicial de milho transgênico. **Journal of Neotropical Agriculture**, v. 2, n. 3, p. 13-17, 2015.

SANGSTER, A. G.; HODSON, M. J.; TUBB, H. J. Silicon deposition in higher plants. In: *Studies in Plant Science*. Elsevier, p. 85-113, 2001.

SANTOS, G. C. G. (2005). **Comportamento de B, Zn, Mn, e Pb em solo contaminado sob cultivo de plantas e adição de fontes de matéria orgânica como amenizantes do efeito tóxico**. Universidade de São Paulo, 2005.

SANTOS, M. S. et al. Silicon nutrition mitigates the negative impacts of iron toxicity on rice photosynthesis and grain yield. **Ecotoxicology and environmental safety**, v. 189, 2020.

SILVA, F. R. et al. Acumulação e translocação de zinco em mudas de espécies do gênero *Eucalyptus* e *Corymbia*. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v.19, n.11, p.1114–1120, 2015.

SILVA, A. P. R.; BOAS, R. L. V.; FERNADES, D. M. Silício no solo e na planta: Efeito de fontes e métodos de aplicação. In: congresso internacional de ciências agrárias. **Anais...2020**. Edição virtual, 2020.

SILVA, S. A. et al. Doses de silício na produtividade do milho (*Zea mays* L.) híbrido simples na região de Campo Grande–MS. **Revista Cultivando o Saber**, v. 3, n. 1, p. 171-178., 2010.

SILVA, R. F. et al. Potential association with seedlings *Pisolithus microcarpus* *Corymbia citriodora* in soil contaminated with zinc. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 1, p. 181-191, 2016.

SILVEIRA, M.L.; ALLEONI, L.R.F.; CHANG, A. Condicionadores químicos de solo e retenção e distribuição de cádmio, zinco e cobre em Latossolos tratados com bioossólido. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1087-1098, 2008.

ŠIMKOVÁ, L. et al. The effect of silicon on the activity and isozymes pattern of antioxidative enzymes of young maize roots under zinc stress. **Silicon**, v. 10, n. 6, 2018.

SCHALLER, J. et al. Silicon affects nutrient content and ratios of wetland plants.

Silicon, v. 8, n. 4, p. 479-485, 2016.

SONG, A. et al. The alleviation of zinc toxicity by silicon is related to zinc transport and antioxidative reactions in rice. **Plant and Soil**, v. 344, n. 1, p. 319-333, 2011.

TAIZ, L; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 3 ed. Porto Alegre: Arned, 2004.

TAVALLALI, V. Interactive effects of zinc and boron on growth, photosynthesis, and water relations in pistachio. **Journal of Plant Nutrition**, v. 40, n. 11, p. 1588-1603, 2017.

TIECHER, T. L. **Alterações fisiológicas em milho cultivado em solo com alto teor de cobre e submetido à aplicação de zinco**. 2014. 44 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do solo) – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2014.

TIECHER, T. L. et al. The potential of Zea mays L. in remediating copper and zinc contaminated soils for grapevine production. **Geoderma**, v. 262, p. 52-61, 2016.

TIECHER, T. L. et al. Physiological and nutritional status of black oat (*Avena strigosa* Schreb.) grown in soil with interaction of high doses of copper and zinc. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 106, p. 253-263, 2016.

USDA. United States Department of Agriculture. **Grain**: world markets and trade. Disponível em: <https://www.fas.usda.gov/data/grain-world-markets-and-trade>. Acesso em: fev. 2020.

VALE, D.W. et al. O. Nitrogênio e escória de siderurgia nos atributos químicos do solo e na nutrição da cana-de-açúcar. Revista da FZVA. **Uruguiana**, v. 17, n. 2, p. 199-220. 2010.

VIVANCOS, J. et al. Identification and characterization of silicon efflux transporters in horsetail (*Equisetum arvense*). **Journal of Plant Physiology**, v. 200, p. 82-89, 2016.

WALLACE, A.; ROMNEY, E. M.; MUELLER, R. T. Nitrogen-Silicon Interaction in Plants Grown in Desert Soil with Nitrogen Deficiency. **Agronomy Journal**, v. 68, n. 3, p. 529-530, 1976.

WALLACE, Arthur. Relationships among nitrogen, silicon, and heavy metal uptake by plants. **Soil Science**, v. 147, n. 6, p. 457-460, 1989.

XIE, Z. et al. Silicon improves maize photosynthesis in saline-alkaline soils. **The Scientific World Journal**, 2015.

YANG, Y. et al. Growth and physiological responses of grape (*Vitis vinifera* "Combier") to excesso zinc. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 33, n. 4, p. 1483-1491, 2011.

YIN, L. et al. Silicon-mediated changes in polyamine and 1-aminocyclopropane-1-carboxylic acid are involved in silicon-induced drought resistance in *Sorghum bicolor*

L. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 80, p. 268-277, 2014.

ZANÃO JÚNIOR, L. A. et al. Rice grown in nutrient solution with doses of manganese and silicon. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1629-1639, 2010.

ZAJACZKOWSKA, A.; KORZENIOWSKA, J.; SIENKIEWICZ-CHOLEWA, U. Effect of Soil and Foliar Silicon Application on the Reduction of Zinc Toxicity in Wheat. **Agriculture**, v. 10, n. 11, p. 522, 2020.

ZHAO, Y. et al. Influence of silicon on cadmium availability and cadmium uptake by rice in acid and alkaline paddy soils. **Journal of Soils and Sediments**, v. 20, p.2343–2353, 2020.

ZHANG, P. et al. Effect of amorphous silicon dioxide on cadmium behavior in the soil–rice plant system. **Moscow University Soil Science Bulletin**, v. 73, n. 1, p. 34-38, 2018.