

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ
CAMPUS DE MARECHAL CÂNDIDO RONDON
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
NÍVEL MESTRADO**

MARCOS VINÍCIUS MANSANO SARTO

**ADUBAÇÃO SILICATADA E SUA INFLUÊNCIA NOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO
SOLO E NUTRIÇÃO DO TRIGO**

MARECHAL CÂNDIDO RONDON – PARANÁ – BRASIL

FEVEREIRO/2014

MARCOS VINÍCIUS MANSANO SARTO

**ADUBAÇÃO SILICATADA E SUA INFLUÊNCIA NOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO
SOLO E NUTRIÇÃO DO TRIGO**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Nível Mestrado, para a obtenção do título de Mestre em Agronomia, Área de concentração Produção Vegetal.

ORIENTADORA: Prof^a. Dr^a. Maria do Carmo Lana

MARECHAL CÂNDIDO RONDON – PARANÁ – BRASIL

FEVEREIRO/2014

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca da UNIOESTE – Campus de Marechal Cândido Rondon – PR.,
Brasil)

S251a	Sarto, Marcos Vinícius Mansano Adubação silicatada e sua influência nos atributos químicos do solo e nutrição do trigo / Marcos Vinícius Mansano Sarto. - Marechal Cândido Rondon, 2014. 61 p. Orientadora: Prof. Dr. Maria do Carmo Lana Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Marechal Cândido Rondon, 2014. 1. Trigo. 2. Trigo - Fertilidade do solo. 3. Trigo - Adubação - Silicato de cálcio e magnésio. I. Universidade Estadual do Oeste do Paraná. II. Título. CDD 22.ed. 633.11 CIP-NBR 12899
-------	---

Ficha catalográfica elaborada por Marcia Elisa Sbaraini-Leitzke CRB-9/539



unioeste

Universidade Estadual do Oeste do Paraná

Campus de Marechal Cândido Rondon - CNPJ 78680337/0003-46

Rua Pernambuco, 1777 - Centro - Cx. P. 91 - <http://www.unioeste.br>

Fone: (45) 3284-7878 - Fax: (45) 3284-7879 - CEP 85960-000

Marechal Cândido Rondon - PR.



PARANÁ

GOVERNO DO ESTADO

Ata da reunião da Comissão Julgadora da Defesa de Dissertação do Engenheiro Agrônomo **MARCOS VINÍCIUS MANSANO SARTO**. Aos dezessete dias do mês de fevereiro de 2014, às 14h, sob a presidência da Prof.^a Dr.^a Maria do Carmo Lana, em sessão pública, reuniu-se a Comissão Julgadora da Defesa da Dissertação do Engenheiro Agrônomo Marcos Vinícius Mansano Sarto, discente do Programa de Pós-Graduação *stricto sensu* em Agronomia – Nível Mestrado e Doutorado com área de concentração em **"PRODUÇÃO VEGETAL"**, visando à obtenção do título de **"MESTRE EM AGRONOMIA"**, constituída pelos membros: Pesq. Dr. Luiz Antônio Zanão Júnior (Iapar), Prof.^a Dr.^a Edleusa Pereira Seidel (Unioeste) e Prof.^a Dr.^a Maria do Carmo Lana (Orientadora).

Iniciados os trabalhos, o candidato apresentou seminário referente aos resultados obtidos e submeteu-se à defesa de sua Dissertação, intitulada: **"Adubação silicatada e sua influência nos atributos químicos do solo e nutrição do trigo"**.

Terminada a defesa, procedeu-se ao julgamento dessa prova, cujo resultado foi o seguinte, observada a ordem de arguição:

Pesq. Dr. Luiz Antônio Zanão Júnior.....Aprovado
Prof.^a Dr.^a Edleusa Pereira Seidel.....Aprovado
Prof.^a Dr.^a Maria do Carmo Lana (Orientadora).....Aprovado

Apurados os resultados, verificou-se que o candidato foi habilitado, fazendo jus, portanto, ao título de **"MESTRE EM AGRONOMIA"**, área de concentração em **"PRODUÇÃO VEGETAL"**. Do que, para constar, lavrou-se a presente ata, que vai assinada pelos senhores membros da Comissão Julgadora.

Marechal Cândido Rondon, 17 de fevereiro de 2014.

Pesq. Dr. Luiz Antônio Zanão Júnior

Prof.^a Dr.^a Edleusa Pereira Seidel

Prof.^a Dr.^a Maria do Carmo Lana (Orientadora)

Aos meus amados pais, Salvador Antônio Sarto e Janice Mansano Sarto, pelos ensinamentos, dedicação, apoio, e principalmente, pelo exemplo de vida.

A minha querida irmã, Marcella Paula Mansano Sarto, pelo amor, confiança e apoio.

A família Wobeto, Romeu, Marta e Nathália, por todo o carinho, compreensão e afeto.

Aos meus amigos pela convivência, incentivos, e momentos de descontração.

OFEREÇO

*Ao meu amor de uma vida,
minha bênção de Deus,
Jaqueline Rocha Wobeto,
Que com amor e carinho me apoiou e incentivou transmitindo paz e harmonia.*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A DEUS por estar sempre ao meu lado, e por ter me concedido força, saúde e paz, principalmente nas horas mais difíceis de minha vida;

Ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Agronomia - PPGA, do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE, pela oportunidade concedida para a realização do curso;

A minha querida orientadora Prof^a Dr^a Maria do Carmo Lana pela orientação, atenção e amizade durante o período de execução deste trabalho;

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela concessão da bolsa de estudos;

A todo o pessoal do Laboratório de Fertilidade do Solo e Adubação, em especial atenção ao Leandro Rampim, ao Jean Rosset, ao Jucenei Frandoloso que sempre se prontificaram para realização das análises de laboratório;

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Agronomia - PPGA, da Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE, pelo apoio científico, e pelos ensinamentos transmitidos;

Aos colegas de curso Graciela, Piano, Jonas, Martios, Augustinho, Luiz, Paulo pela amizade e convivência fraterna;

Ao “irmão” de república Mitio Inagaki, companheiro de longas horas de estudo e bons momentos de descontração, além do apoio, incentivo e compreensão;

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho;

OBRIGADO!

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1 A Cultura do Trigo.....	14
2.2 Silício.....	15
2.2.1 Silício no solo.....	17
2.2.2 Silício na planta.....	19
2.2.3 Silício na cultura do trigo.....	21
2.2.4 Silicato de cálcio.....	22
3 ARTIGO 1: ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO E DESENVOLVIMENTO DO TRIGO EM FUNÇÃO DA ADUBAÇÃO SILICATADA.....	30
3.1 INTRODUÇÃO.....	31
3.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	32
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	34
3.4 CONCLUSÕES.....	41
AGRADECIMENTOS.....	41
REFERÊNCIAS.....	41
4 ARTIGO 2: USO DE SILICATO DE CÁLCIO E MAGNÉSIO NA NUTRIÇÃO MINERAL DO TRIGO.....	46
4.1 INTRODUÇÃO.....	47
4.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	48
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
4.4 CONCLUSÕES.....	60
AGRADECIMENTOS.....	60
REFERÊNCIAS.....	60

LISTA DE TABELAS

ARTIGO 1

Tabela 1. Atributos químicos e granulométricos dos solos LVef, PVAe e LVd coletados na camada de 0-0,2 m de profundidade.....	33
Tabela 2. Médias das concentrações de P, K, Cu, Zn, Fe e Mn no solo em função das doses de silicato de cálcio e magnésio, Marechal Cândido Rondon – PR, 2014.....	38

ARTIGO 2

Tabela 3. Atributos químicos e granulométricos dos solos LVef, PVAe e LVd coletados na camada de 0-0,2 m de profundidade.....	49
Tabela 4. Teor foliar médio dos macro e micronutrientes para as Normas DRIS, originado de população de alta produtividade na cultura de trigo em unidades de manejo em um sistema de agricultura de precisão e valores de referência para a faixa de suficiência dos teores de nutrientes foliares da cultura do trigo, segundo Embrapa (2009) e Raij (2011)	50
Tabela 5. Potencial de Resposta à Adubação de acordo com índices DRIS e IBNm	51
Tabela 6. Conteúdo de Si disponível no solo, Si acumulado na parte aérea do trigo, Si absorvido proveniente do fertilizante e Índice de Recuperação, em função das doses de silicato de cálcio e magnésio, Marechal Cândido Rondon – PR, 2014.....	53
Tabela 7. Valores médios de macro e micronutrientes no tecido foliar na cultura do trigo, em função das doses crescentes de silicato de cálcio e magnésio, Marechal Cândido Rondon – PR, 2014	55
Tabela 8. Índice DRIS da cultura do trigo em função das doses de silicato de cálcio, Marechal Cândido Rondon – PR, 2014	56

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO 1

- Figura 1. Valores médios de Si (A), pH CaCl₂ (B), H + Al (C), Al (D), Ca (E), Mg (F), CTC (G) e V% (H) no solo, após o cultivo com trigo, em função das doses de silicato de cálcio, Marechal Cândido Rondon – PR, 2014. **, * e ns, significativo a 1%, 5% e não significativo, respectivamente, pelo Teste F35
- Figura 2. Efeito das doses de silicato de cálcio na altura de plantas (A), massa de matéria seca da parte aérea (MSPA) (B), número de perfilho (C) e produção de grãos (D) da cultura do trigo, em função das doses de silicato de cálcio e magnésio, **, * e ns, significativo a 1%, 5% e não significativo, respectivamente, pelo Teste F39

ARTIGO 2

- Figura 3. Efeito das doses de silicato de cálcio e magnésio nos teores foliares de silício na folha (A) e no colmo (B) da cultura do trigo, **, * e ns, significativo a 1%, 5% e não significativo, respectivamente, pelo Teste F52
- Figura 4. Efeito das doses de silicato de cálcio e magnésio sobre os teores foliares de K na cultura do trigo, **, * e ns, significativo a 1%, 5% e não significativo, respectivamente, pelo Teste F57
- Figura 5. Efeito das doses de silicato de cálcio e magnésio sobre os teores foliares de Ca (A) e Mg (B) na cultura do trigo, **, * e ns, significativo a 1%, 5% e não significativo, respectivamente, pelo Teste F58
- Figura 6. Efeito das doses de silicato de cálcio e magnésio sobre os teores foliares de Zn (A) e Mn (B) na cultura do trigo, **, * e ns, significativo a 1%, 5% e não significativo, respectivamente, pelo Teste F59

RESUMO

ADUBAÇÃO SILICATADA E SUA INFLUÊNCIA NOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO E NUTRIÇÃO DO TRIGO

AUTOR: Marcos Vinícius Mansano Sarto

ORIENTADORA: Maria do Carmo Lana

A aplicação de silicato de cálcio e magnésio pode promover melhorias nos atributos químicos do solo e, conseqüentemente, melhorar a nutrição e aumentar a produtividade das culturas. Assim o presente trabalho teve como objetivos avaliar o efeito da aplicação de doses de silicato de cálcio e magnésio sobre os atributos químicos do solo, desenvolvimento e absorção de nutrientes pelo trigo em solos do estado do Paraná. O experimento foi realizado em casa de vegetação em vasos com três tipos de solos do estado do Paraná. O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso, em esquema fatorial 5 x 3, com quatro repetições. Os tratamentos constituíram da aplicação de 0, 1, 2, 4 e 6 Mg ha⁻¹ de silicato de cálcio e três solos: Latossolo Vermelho eutrófico (LVef), Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico (PVAe) e Latossolo Vermelho distroférrico (LVd). A adubação silicatada elevou os teores de Si, Ca e Mg e os valores de pH, CTC e V, reduziu a acidez potencial (H + Al) e o teor de Al do solo. A adubação silicatada não influenciou as variáveis agrônômicas do trigo cultivado nos solos LVef e PVAe, entretanto, no solo LVd, aumentou a massa da matéria seca da parte aérea, altura de plantas, número de perfilho e produção da cultura do trigo. A quantidade de Si acumulada pela parte aérea do trigo proveniente do silicato aplicado variou entre 28,2 %, 60,61 % e 74,14 %, respectivamente, para os solos LVef, PVAe e LVd. A adubação silicatada promove acréscimo nos teores de K, Ca e Mg e reduz os teores de Zn e Mn no tecido foliar do trigo. O monitoramento com o DRIS permitiu detectar efeito das doses de silicato de cálcio e magnésio nos solos no equilíbrio de nutrientes do tecido foliar da cultura do trigo.

Palavras-chave: Fertilidade do solo, Latossolo, silício, absorção, DRIS, *Triticum aestivum* L.

ABSTRACT

SILICATE FERTILIZATION AND ITS INFLUENCE IN CHEMICAL ATTRIBUTES OF SOIL AND NUTRITION OF WHEAT

AUTHOR: Marcos Vinícius Mansano Sarto

ADVISER: Maria do Carmo Lana

The application of calcium silicate and magnesium can promote improvements in soil chemical properties and, consequently, improve nutrition and increase crop productivity. Thus the present study aimed to evaluate the effect of doses of calcium silicate and magnesium on soil chemical properties, development and nutrient uptake by wheat in soils of the state of Paraná. The experiment was conducted in a greenhouse in pots with three soil types in the state of Paraná. The experimental design was randomized blocks, factorial 5 x 3, with four replications. Treatments consisted of application of 0, 1, 2, 4 and 6 Mg ha⁻¹ of calcium silicate and three soils: Red Latosol eutrophic (LVef), Red Yellow Argissoil eutrophic (PVAe) and Red Latosol distroferic (LVd). Silicon fertilization increased the contents of Si, Ca and Mg and pH, CTC and V reduced the potential acidity (H+Al) and Al content of the soil. Silicon fertilization did not influence the agronomic traits of wheat grown in soils LVef and PVAe, however, soil LVd increased the dry matter of shoots, plant height, number of tillers and yield of wheat crop. The amount of Si accumulated by the shoots of wheat from the silicate applied ranged from 28.2 %, 60.61 % and 74.14 %, respectively, for the LVef, PVAe and LVd soils. Silicon fertilization promotes increase of K, Ca and Mg and reduces the levels of Zn and Mn in the leaves of wheat. Monitoring with DRIS possible to detect the effect of doses of calcium silicate and magnesium in soil nutrient balance in the leaf tissue of wheat.

Keywords: Soil Fertility, Latosol, silicon, absorption, DRIS, *Triticum aestivum* L.

1 INTRODUÇÃO

O trigo (*Triticum aestivum* L.) é um dos cereais mais consumidos no mundo, juntamente com o milho e o arroz, sendo considerado alimento básico de aproximadamente um terço da população mundial, em virtude da sua diversidade de utilização, suas características nutricionais e sua facilidade de armazenamento (ZANÃO JÚNIOR et al., 2009; FIOREZE, 2011). No sul do Brasil, o trigo é a principal cultura de inverno em área ocupada, volume de produção e importância econômica (WELTER et al., 2005).

A produção nacional representa menos de 50% do consumo interno do cereal, fazendo com que o Brasil seja um dos principais países importadores de trigo no mundo (CONAB, 2013). Em razão desta produção insuficiente para a demanda, estudos visando elevar a produtividade nacional são necessários, incluindo aqueles envolvendo a nutrição e fertilização desta cultura (ZANÃO JUNIOR et al., 2009).

No Brasil, os solos tropicais e subtropicais, submetidos ao manejo intensivo, normalmente apresentam altos teores de alumínio (Al), baixa saturação por bases, alta capacidade de fixação de fósforo (P) e altos índices de acidez (MATICHENKOV e CALVERT, 2002). Além disso, cultivos sucessivos podem reduzir ainda mais o teor de silício disponível no solo, a ponto de ser necessária uma fertilização silicatada suplementar para a obtenção da produtividade máxima. Alguns solos, no entanto, contêm pouco silício disponível no seu estado nativo. Tais solos são tipicamente muito intemperizados, lixiviados, ácidos e com baixa saturação por bases (DATNOFF et al., 2001).

Os benefícios da aplicação de silicatos de Ca e Mg estão, normalmente associados ao aumento na disponibilidade de silício, à elevação do pH e ao aumento do Ca e Mg trocável do solo. Os silicatos podem também atuar nas reduções de toxicidade de Fe, Mn e Al para as plantas, além de aumentar a disponibilidade de fósforo no solo (KORNDÖRFER et al., 2002a).

Além de fornecer Ca, Mg e Si ao solo, outro aspecto importante dos efeitos dos silicatos sobre as propriedades do solo diz respeito à sua interação com o fósforo e com a adubação NPK. Lima-Filho et al. (1999) afirmaram que o uso de fertilizantes silicatados aumenta a eficiência da adubação NPK. Os silicatos apresentam boas propriedades de adsorção e promovem menor lixiviação de K^+ e de outros nutrientes móveis no solo.

No Brasil, trabalhos relatam que poáceas têm apresentado incremento na produtividade mediante o fornecimento de Si às plantas (KORNDÖRFER & DATNOFF,

1995), como no trigo, aveia (LIMA FILHO & TSAI, 2007), milho (MARCUSSE, 2010), sorgo (BARBOSA, et al., 2008), cana-de-açúcar (KORNDÖRFER et al., 2002b; MADEIROS et al., 2009) e arroz (PEREIRA et al., 2004; TOKURA et al., 2007, RAMOS et al., 2008).

A carência de estudos sobre o uso do silicato de cálcio na cultura do trigo, associado à falta de informações sobre as mudanças na nutrição mineral desta cultura, justifica o presente trabalho, que teve por objetivos avaliar os efeitos de doses crescentes de silicato de cálcio sobre atributos químicos do solo, teor de silício, macro e micronutrientes e desenvolvimento da cultura do trigo em solos do estado do Paraná.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A Cultura do Trigo

O trigo (*Triticum aestivum* L.) é uma planta de ciclo anual, cujos grãos são consumidos, na forma de pães, massas, bolos e biscoitos. Quando não atinge a qualidade exigida para consumo humano, os grãos são destinados à ração animal (EMBRAPA TRIGO, 2014). Esse cereal foi um dos primeiros vegetais cultivados pelo homem, entre 7.000 e 9.000 a.C., passando por amplo processo de expansão por todo o mundo, e por 8.000 anos tem sido à base da alimentação das principais civilizações da Europa, Ásia e África (VESOHOSKI et al., 2011).

O trigo tem sido cultivado no sudoeste da Ásia, seu centro de origem, há mais de 10.000 anos. Pertence à família *Poaceae*, tribo *Triticeae* (Hordeae), sub-tribo *Triticinae*, gênero *Triticum*. A sub-tribo compreende quinze espécies, reunidas em três grupos, denominados em função do seu número de cromossomos, sendo $n=7$, a série diplóide constituída por 14 cromossomos, tetraplóide por 28 cromossomos e hexaplóide por 42 cromossomos (SLEPER e POEHLMAN, 2006).

O gênero *Triticum* contém cerca de 30 espécies, metade delas sendo cultivada comercialmente e, as restantes, crescendo de forma silvestre. Mais de 90 % do trigo cultivado no mundo corresponde às espécies *Triticum aestivum vulgare* e *Triticum turgidum durum* (ABITRIGO, 2014). O *Triticum aestivum* L., conhecido como trigo comum, é a espécie de maior interesse comercial, dada a capacidade de panificação. Grãos da espécie *T. durum* não possuem as proteínas gliadina e glutenina e, por isso, não são adequadas à panificação. No entanto, superam as demais espécies na qualidade necessária à fabricação de macarrões (MOREIRA e SOUZA, 1999).

Dos cereais usados na alimentação humana, o trigo é um dos mais antigos e nobres em relação à qualidade e à quantidade de proteínas, constituindo importante componente na dieta alimentar humana. Também é empregado na elaboração de fármacos, na fabricação de cola, bem como na alimentação animal, como forragem, grão ou composição de ração (EMBRAPA TRIGO, 2014).

A produção mundial de trigo na safra 2012/2013 foi de 655,110 milhões de toneladas, sendo que os maiores países produtores foram: China (17,77 %), Índia (12,46 %) e os Estados Unidos (9,27 %). A produção nacional na safra 2012/2013 atingiu 4,8 milhões de toneladas (0,73 % da produção mundial), enquanto o consumo anual no país tem-se mantido em torno

de 10 milhões de toneladas (USDA, 2013), sendo que os Estados do Paraná, Rio Grande do Sul e Santa Catarina responderam por 90 % da produção total (EMBRAPA TRIGO, 2014).

Desta forma, a produção brasileira não tem sido suficiente para atender à demanda interna deste cereal, situação essa agravada pela elevada quantidade de grãos perdidos ou colhidos com qualidade inferior por causa do ataque de pragas, germinação na espiga e redução de matéria seca que acontecem pelo retardo na colheita (GUTKOSKI et al., 2008). A falta de incentivo à produção, a pequena área cultivada e os baixos tetos de produtividade também cooperam para o déficit anual na produção brasileira de trigo. Contudo, a cultura do trigo no Brasil vem alcançando, a cada dia, maior importância frente aos países produtores e exportadores, alicerçada nos ganhos de produtividade, na rentabilidade e na melhoria da qualidade industrial (TIBOLA et al., 2008; BOSCHINI, 2010).

O interesse em maximizar o rendimento de trigo tem estimulado o uso de um manejo intensivo nessa cultura. Esse manejo integra a adoção de determinadas práticas, como época de semeadura, espaçamento e densidade de semeadura adequada, aumento do nível de fertilidade do solo e controle de doenças, insetos e de acamamento de plantas (RODRIGUES e TEIXEIRA, 2003).

2.2 Silício

A palavra silício provém do latim *silex*, rocha constituída de sílica (dióxido de silício) amorfa hidratada e sílica microcristalina, a qual era utilizada, pela sua dureza, na confecção de utensílios e armas na Era Pré-Metálica ou Paleolítica (LIMA FILHO e TSAI, 2007). Ocorre principalmente como mineral inerte das areias, quartzo (SiO_2 puro), caulinita, micas, feldspatos e em outros argilominerais silicatados (MARSCHNER, 1995). O Si tem sido utilizado na forma de fertilizantes em vários países, como Brasil, Japão, Ilhas Maurícias, Estados Unidos (EUA), Austrália e África do Sul. No Japão, já se utiliza esse elemento no cultivo de arroz há seis décadas. Os EUA incorporaram a adubação com Si nas culturas do arroz e da cana-de-açúcar, utilizando, principalmente, o silicato de cálcio e magnésio, um subproduto da indústria siderúrgica e da produção de fósforo elementar (RODRIGUES et al., 2011).

O silício é o segundo elemento mais abundante da crosta terrestre com 27 % em massa, superado apenas pelo oxigênio. O silício não é encontrado na sua forma elementar na natureza, devido à sua alta afinidade pelo oxigênio. É encontrado somente em formas

combinadas, como a sílica e minerais silicatados, tais como alumínio (aluminossilicatos), magnésio (talco), cálcio (wolastonita), magnésio e ferro (olivina) e muitos outros, além da presença quase constante do hidrogênio. Silicatos que estão no nosso dia a dia, como o vidro e a areia, contêm somente hidrogênio como cátion acompanhante, com uma notação geral simplificada de SiO_2 (SRIPANYAKORN et al., 2005).

Cerca de 80 % dos minerais das rochas ígneas e metamórficas são silicatos, enquanto em rochas sedimentares o conteúdo é menor (JACKSON, 1964). Os silicatos são sais nos quais a sílica é combinada com oxigênio e outros elementos, como Al, Mg, Ca, Na, Fe, K e outros, em mais de 95 % das rochas terrestres (cerca de 87 % em massa), meteoritos, em todas as águas, atmosfera (pó silicoso), vegetais e animais (LIMA FILHO et al., 1999).

O silício não é considerado essencial, do ponto de vista fisiológico e metabólico para o crescimento e desenvolvimento das plantas (EPSTEIN, 1999). Mesmo assim, o aumento de sua disponibilidade ao sistema radicular de algumas espécies tem revelado, em alguns casos, efeitos benéficos em diversas culturas, especialmente, quando submetidas a algum tipo de estresse, seja ele de natureza biótica ou abiótica (GONG et al., 2005; HATTORI et al., 2005).

Uma relação incompleta, mas mesmo assim extensa, com os processos, estruturas e características das plantas que podem ser influenciados pelo silício, todos documentados na literatura, mostra o significado deste elemento na vida e no rendimento das plantas (SHIA e WANG, 1998), dentre eles está o aumento da resistência a pragas e doenças, aumento do crescimento e da produtividade, aumento da força mecânica do colmo e resistência ao acamamento, maior penetração da luz no dossel da planta por manter as folhas mais eretas, aumentando a eficiência fotossintética, aumento da atividade radicular, promovendo a absorção de água e nutrientes, principalmente nitrogênio, fósforo e potássio, e o poder de oxidação das raízes, redução da lixiviação de P, N e K de áreas cultivadas, neutralização do alumínio tóxico do solo, bem como diminui a toxidez causada pelo manganês e outros metais pesados, diminuição da transpiração excessiva, aumentando da resistência a veranicos, promovendo a formação de nódulos em leguminosas, aumento da proteção contra temperaturas extremas, altas ou baixas, e ao estresse salino, aumento da massa individual das sementes e a fertilidade dos grãos de pólen, aumento da produção de carboidratos e açúcares (SHI et al, 2001).

No Brasil, o Si foi recentemente incluído como micronutriente benéfico na Legislação para Produção e Comercialização de Fertilizantes e Corretivos, conforme o Decreto Lei nº. 4.954, de 14 de janeiro de 2004, autorizando a sua comercialização de forma isolada ou em

mistura com outros nutrientes (SENA e CASTRO, 2010). De acordo com a Instrução Normativa nº. 5, de 23 de fevereiro de 2007, no Anexo II, foram aprovados para comercialização os produtos fertilizantes minerais contendo Si (MAPA, 2013).

2.2.1 Silício no solo

Nos solos, o silício solúvel ou disponível às plantas tem origem nos processos de intemperização dos minerais primários e, particularmente, dos minerais secundários como os argilo-silicatos. O silício (Si) está presente na solução do solo como ácido silícico ou monossilícico (H_4SiO_4), em grande parte na forma não dissociada, que é facilmente absorvida pela planta. De modo geral, as soluções dos solos apresentam teores de Si dissolvidos variando entre 2,8 e 16,8 mg L^{-1} , sendo que, o equilíbrio dinâmico do elemento no solo depende do pH (EPSTEIN, 1999).

A absorção do silício da solução do solo ocorre de forma passiva pela maioria das gramíneas, com o elemento acompanhando o fluxo de massa da água que penetra nas raízes das plantas, sendo não seletivo. Seu transporte na planta é feito pelo xilema, e a sua distribuição na parte aérea que depende da taxa de transpiração desses órgãos (YOSHIDA, 1965 citado por FARIA, 2000).

As principais fontes de ácido silícico presentes na solução do solo são a decomposição de resíduos vegetais, dissociação do ácido silícico polimerizado, liberação de Si dos óxidos e hidróxidos de Fe e Al, dissolução de minerais cristalinos e não cristalinos, adição de fertilizantes silicatados e a água de irrigação (WERBER e ROTH, 1983; TAKAHASHI, 1995; BARBOSA FILHO et al., 2000). Os principais drenos incluem a precipitação do Si em solução formando minerais, a polimerização do ácido silícico, lixiviação, adsorção em óxidos e hidróxidos de Fe e Al, e a absorção pelas plantas.

A concentração média de Si na litosfera é de 27 %, variando entre 23 e 35 % nos solos, onde ocorre principalmente no mineral inerte das areias, o quartzo (SiO_2), bem como na caulinita e em outros elementos de argila (RAIJ, 1991).

A concentração e a disponibilidade de silício na solução do solo são dependentes da rocha de origem, do grau de intemperismo, do pH do solo e o teor de sesquióxidos e de outras partículas adsorventes. As principais formas de silício no solo, passíveis de ser absorvidas pelas plantas, são o ácido monossilícico (H_4SiO_4) e o ácido polissilícico, incluindo silício

adsorvido, quer seja solúvel ou precipitado junto com óxidos cristalinos de Al, Fe e Mn (TAKAHASHI, 1995).

Embora o conteúdo de silício nos solos minerais seja normalmente alto, pouco dele está disponível para as plantas, devido à sua baixa solubilidade (ESSER, 2002; KORNDÖRFER, 2006). Além disso, cultivos sucessivos podem reduzir ainda mais o teor desse elemento disponível no solo, a ponto de ser necessária uma fertilização silicatada suplementar para a obtenção da produtividade máxima. Alguns solos, no entanto, contêm pouco silício disponível no seu estado nativo. Tais solos são tipicamente muito intemperizados, lixiviados, ácidos e com baixa saturação por bases (DATNOFF et al., 2001).

No Brasil, os solos tropicais e subtropicais, submetidos ao manejo intensivo, apresentam altos teores de alumínio (Al), baixa saturação por bases, alta capacidade de fixação de fósforo (P) e altos índices de acidez (MATICHENKOV e CALVERT, 2002). Durante a acidificação, ocorre a liberação de íons H^+ para a solução do solo, visando manter o equilíbrio iônico no interior das células das raízes das plantas, através do mecanismo antiporte, que permite absorver cátions como Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ (TAIZ e ZEIGER, 2009), reduzindo os teores destes cátions no solo, a exportação destes cátions colabora para diminuir a produtividade das culturas, em decorrência da diminuição da fertilidade do solo (RAIJ, 1996).

De acordo com Carvalho et al. (2000), o silicato de cálcio ($CaSiO_3$) apresenta reações semelhantes à do calcário, que eleva o pH do solo e, pode ainda disponibilizar o ânion silicato ($H_3SiO_4^-$). A hidrólise do ânion silicato promove a liberação de hidroxilas (OH^-), que neutralizando os H^+ elevando o pH do solo. Com isso, ocorre a precipitação do Al^{3+} na forma de hidróxido de Al ($Al(OH)_3$), de baixa solubilidade que é inativo na solução do solo e, portanto, não tóxica para as plantas (KORNDÖRFER e NOLLA, 2003).

Além do fornecimento de nutrientes (Ca^{2+} , Mg^{2+} e Si) ao solo, outro aspecto importante no estudo da adubação silicatada nos atributos químicos do solo, é a interação do Si com o P e com outros nutrientes, como o nitrogênio (N) e o potássio (K) (MARAFON e ENDRES, 2011). O uso de fertilizantes silicatados, que normalmente apresentam boas propriedades de adsorção, aumenta a eficiência da adubação NPK, proporcionando uma menor lixiviação de potássio e outros nutrientes móveis no horizonte superficial. Com o aumento no teor de silicato no solo, ocorrem reações químicas de troca entre o silicato e fosfatos. Desta maneira há a formação de silicatos de cálcio, alumínio e ferro, por exemplo, com a liberação do íon fosfato, aumentando o teor de fósforo na solução do solo. Estudos

indicam, também, a possibilidade do silício aumentar a translocação interna do fósforo para a parte aérea da planta (SAVANT, 1997a; TAKAHASHI, 1995; EPSTEIN, 1999).

Os solos argilosos apresentam maior quantidade de filossilicatos (minerais de argila que liberam Si e Al^{3+}) e maior quantidade de Si em solução quando comparados aos arenosos, apesar destes serem ricos em quartzo (SiO_2), já que este é um mineral de difícil decomposição química (DEMATTE et al., 2011). Berthelsen et al. (2002) classificaram os solos quanto ao teor de silício extraído com CaCl_2 0,01 mol L^{-1} em quatro classes: 1 - muito baixa (0-5 mg kg^{-1}); 2 - baixa (5-10 mg kg^{-1}), 3 - limitante (10-20 mg kg^{-1}) e 4 - adequada (> 20 mg kg^{-1}) em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. Korndörfer et al. (1999b) classificaram os níveis de silício no solo, extraído em ácido acético 0,5 mol L^{-1} , como: baixo (< 6 mg dm^{-3}), médio (de 6 a 24 mg dm^{-3}) e alto (> 24 mg dm^{-3}). Os níveis críticos de Si em solos cultivados com cana-de-açúcar são de 20 mg kg^{-1} extraídos com ácido acético 0,5 mol L^{-1} e de 6 a 8 mg kg^{-1} com CaCl_2 0,01 mol L^{-1} .

2.2.2 Silício na planta

A família das gramíneas (*Poaceae*), que inclui importantes culturas como trigo, arroz, cana-de-açúcar e milho, apresenta grande capacidade de acumular silício, a qual varia de acordo com o genótipo considerado (BARBOSA FILHO et al., 2001). Nessas culturas, o teor de Si pode se igualar ou até mesmo exceder os teores de macronutrientes primários (EPSTEIN, 1999; RAFI et al., 1997). Plantas, de um modo geral, contêm quantidades de Si variando de 0,1 a 10% do total de sua matéria seca.

O silício é absorvido pela planta na forma de ácido monossilícico (H_4SiO_4) juntamente com a água por fluxo de massa e se acumula principalmente nas áreas de máxima transpiração como nos tricomas e espinhos, como ácido silícico polimerizado (sílica amorfa). São consideradas plantas acumuladoras de silício, aquelas que possuem teor foliar acima de 1 %, e não acumuladoras plantas com teor de silício menor que 0,5 % (Ma et al., 2001).

O teor de silício na massa seca permite dividir as plantas superiores em três grupos: acumuladoras, intermediárias e não acumuladoras (MIYAKE, 1992). As acumuladoras apresentam teor de SiO_2 entre 100 a 150 g kg^{-1} , as intermediárias, 10 a 50 g kg^{-1} e, as não acumuladoras, teores menores que 5 g kg^{-1} . As gramíneas são acumuladoras típicas, nas quais os teores de Si atingem de 10 a 20 vezes mais do que em dicotiledôneas.

A relação entre a absorção do silício e o crescimento vegetal foi investigada pela primeira vez há mais de cem anos. O silício é um nutriente em diatomáceas, que o absorvem ativamente, provavelmente através do co-transporte com o sódio. A falta de silício afeta negativamente a síntese de DNA e de clorofila nestes organismos (WERNER, 1977; RAVEN, 1983). A essencialidade do silício para as plantas superiores, porém, foi demonstrada apenas para algumas espécies, apesar de ser um constituinte majoritário dos vegetais (EPSTEIN, 1994; MARSCHNER, 1995). Chen & Lewin (1969) comprovaram a essencialidade do silício para membros da família *Equisetaceae* (“cavalinha” ou “rabo de cavalo”).

A comprovação da essencialidade do silício é muito difícil de ser obtida, devido à sua ubiquidade na biosfera. O silício está presente em quantidades significativas mesmo em sais nutrientes, água e ar altamente purificado (WERNER e ROTH, 1983). Apesar disso, o fornecimento de Si é benéfico para muitas espécies vegetais e, em determinadas circunstâncias, para a maioria das plantas superiores (MARSCHNER, 1995). O Si pode estimular o crescimento e a produção vegetal por várias ações indiretas, como a diminuição do auto-sombreamento, deixando as folhas mais eretas; decréscimo na suscetibilidade ao acamamento, maior rigidez estrutural dos tecidos; proteção contra estresses abióticos, como a redução da toxidez de Al, Mn, Fe e Na; diminuição na incidência de patógenos, e aumento na proteção contra herbívoros, incluindo os insetos fitófagos (EPSTEIN, 1994; MARSCHNER, 1995).

Culturas acumuladoras de Si, principalmente, beneficiam-se da adubação com este elemento, particularmente em solos altamente intemperizados e dessilicatados, aumentando ou mantendo elevadas produtividades. Em arroz, postula-se a essencialidade agrônômica do Si, em vista dos diversos benefícios advindos com a nutrição deste elemento. Estes benefícios incluem o aumento no crescimento e na produção, interações positivas com fertilizantes nitrogenados, fosfatados e potássicos, aumento na resistência a estresses bióticos (doenças e pragas) e abióticos (seca, salinidade, acamamento), e aumento na produtividade em solos problemáticos, como os solos orgânicos e solos ácidos com níveis tóxicos de Al, Fe e Mn (SAVANT et al., 1997b).

A deposição de silício absorvido é influenciada por vários fatores: idade da planta, tipo de localização dos tecidos envolvidos e absorção através das raízes, além da transpiração. A variação ampla dos teores de silício no tecido vegetal é resultado tanto da fisiologia das diferentes espécies, quanto do ambiente onde as plantas se desenvolvem (CHAGAS, 2004).

Existem na planta três locais reconhecidos de deposição de silício: a parede celular, o lúmen celular e os espaços intercelulares nos tecidos das raízes, caule ou na camada extracelular da cutícula (SANGSTER et al., 2001).

2.2.3 Silício na cultura do trigo

Quantidades apreciáveis de silício podem ser encontradas nos vacúolos como estruturas cristalizadas, em precipitados no citoplasma e sobre o tonoplasto, tendo quase sempre como um produto final a sílica gel. O fato de o trigo concentrar silício dentro da célula, no xilema na sua forma solúvel e a sua absorção ser muito mais rápida do que a da água, mostra que existe um mecanismo ativo de transporte, através das membranas das células radiculares, dependente de energia (OKUDA e TAKAHASHI, 1962; MA et al., 2001; NEUMANN & FIGUEIREDO, 2002; CASEY et al., 2004).

A absorção e acumulação de silício na parte aérea do trigo é determinada, também, pela transpiração, crescimento (DUDA et al., 2001) e disponibilidade do elemento no substrato. Aumento de temperatura aumenta o teor de silício nos tecidos do trigo (SU et al., 2002), já que aumenta a transpiração. A silicificação nas gramíneas ocorre nas raízes e na parte aérea, incluindo folhas, colmos e, mais intensamente, nas inflorescências. Os depósitos de silício ocorrem nos tecidos estruturais, vasculares, de armazenamento e na epiderme, como constatado em plântulas de trigo. A silicificação das paredes das células da endoderme das raízes de trigo ocorre de maneira bastante rápida. Uma vez silicificados os sítios da endoderme radicular, a maior parte do silício é transportado para a parte aérea da planta (SANGSTER et al., 2001).

Mendonça et al. (2013) estudando o acúmulo de silício e compostos fenólicos na parte aérea de plantas de trigo após a adubação silicatada utilizando como fontes caulim e cinza de casca de arroz, via solo, observaram acúmulo linear de silício nas folhas e colmos de plantas de trigo, com consequente aumento no teor de fenóis totais, e aumento na produtividade do trigo, até a dose de 1720 kg ha⁻¹.

Lima Filho e Tsai (2007) avaliando o efeito do silício no crescimento e produção de três cultivares de trigo e duas de aveia branca em condições hidropônicas, verificaram que a suplementação de silício, modificou positivamente o crescimento e a produção de grãos da aveia branca e, principalmente, do trigo.

Cultivos sucessivos tendem a diminuir os teores de silício no solo, por isso se faz necessária a reposição desse elemento para um bom desenvolvimento das plantas (KORNDÖRFER, 2002a).

2.2.4 Silicato de cálcio

Em regiões temperadas, os teores totais de silício, excedem os dos sesquióxidos de alumínio e ferro, enquanto nos solos de regiões tropicais ocorre o contrário. Os solos tropicais, que são altamente intemperizados, podem apresentar, em alguns casos, quantidade de silício cinco a dez vezes menores que em solos de regiões temperadas (FOY, 1992).

Apesar da grande abundância do silício na crosta terrestre (MARSCHNER, 1995), a grande maioria das classes de solos, que já passaram por processo de dessilicatação, a exemplo dos Latossolos, Organossolos e Neossolos Quartzarênicos, apresentam baixos teores solúveis deste elemento (SAVANT et al., 1997; KORNDÖRFER et al., 1999a).

A maioria dos solos cultivados em regiões tropicais do Brasil apresenta baixo pH e níveis elevados e tóxicos de Al e Mn para as plantas. Isso gera menor disponibilidade de nutrientes, tais como Ca, Mg e P, resulta em menor exploração do volume de solo pelas raízes e, assim, menor produtividades são obtidas quando não são realizadas práticas de correção da acidez do solo (FORTES, 2006).

Os materiais corretivos de acidez do solo são produtos capazes de neutralizar (diminuir ou eliminar) a acidez e ainda elevar as quantidades de nutrientes no mesmo, principalmente Ca e Mg. Dentre os materiais mais utilizados na correção da acidez dos solos, destacam-se os óxidos, hidróxidos, silicatos e carbonatos de Ca e Mg (MALAVOLTA, 1981).

O calcário é conhecido como o produto mais utilizado na agricultura para esta função. É um produto obtido pela moagem da rocha calcária, tendo como constituintes o carbonato de cálcio (CaCO_3) e o carbonato de magnésio (MgCO_3). Além disso, esse material atua como corretivo de acidez e fornecedor de Ca e Mg (ALCARDE, 1992).

Porém, novos materiais estão sendo estudados, a exemplo dos silicatos e agregados siderúrgicos (escórias) proveniente de siderúrgicas produtoras de ferro gusa e aço (PRADO, 2000).

Os silicatos de cálcio e magnésio são constituídos basicamente de CaSiO_3 e MgSiO_3 . Quando aplicados no solo, aumentam a disponibilidade de Si, elevam o pH e aumentam o Ca

e Mg trocável do solo, reduzindo também a toxicidade por Fe, Mn e Al para as plantas e aumentando a disponibilidade de P no solo (KORNDÖRFER, 2002a).

A utilização de resíduos siderúrgicos tem demonstrado uma alternativa viável para a correção da acidez do solo, destacando-se as escórias de siderurgia, subprodutos da indústria do ferro e do aço que são fontes abundantes e baratas de silicatos, tendo como constituintes principais os silicatos de cálcio e de magnésio (MALAVOLTA et al., 2002a). As escórias são originadas do processamento em altas temperaturas, geralmente acima de 1400° C, resultantes da reação do calcário com a sílica presente no minério de ferro (MADEIROS et al., 2009).

Os silicatos de cálcio e magnésio possuem composição similar e agem de forma semelhante aos calcários, podendo substituí-los com eficiência, de forma que pode apresentar teores relativamente elevados de CaO e MgO, favorecer a correção da acidez do solo e fornecer bases de forma semelhante aos calcários, além de comportar-se como fonte de micronutrientes, silício (Si) e de outros elementos essenciais às plantas cultivadas (ALCARDE, 1992; KORNDÖRFER, 2002a).

As principais características que devem ser avaliadas na escolha de uma fonte de silício para a agricultura são: solubilidade, disponibilidade, as propriedades físicas, a concentração de elementos contaminantes e a relação custo benefício (GASCHO, 2001).

REFERÊNCIAS

ABITRIGO. **Associação Brasileira da Indústria do trigo**. Disponível em: <<http://www.abitrigo.com.br/derivados.asp>> Acesso em 02 de janeiro de 2014.

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).

BARBOSA, N. C.; VENÂNCIO, R.; ASSIS, M. H. S.; PAIVA, J. B.; CARNEIRO, M. A. C.; PEREIRA, H. S. 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.

BARBOSA FILHO, M. P.; SNYDER, G. H.; PRABHU, A. S.; DATNOFF, L. E.; KORNDÖRFER, G. H. Importância do silício para a cultura do arroz. **Informações Agronômicas**. v. 89:1-8. Encarte Técnico, 2000.

BARBOSA FILHO, M. P.; SNYDER, G. H.; FAGERIA, N. K. et al. Silicato de cálcio como fonte de silício para o arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 25, p. 325-30, 2001.

BERTHELSEN, S.; NOBLE, A.; KINGSTON, G. et al. Effect of Ca-silicate amendments on soil chemical properties under a sugarcane cropping system. In: SILICON IN AGRICULTURE CONFERENCE, 2., 2002, Tsuruoka. **Proceedings...** Tsuruoka: Japanese Society of Soil Science & Plant Nutrition, 2002. 57 p.

BOSCHINI, A. P. M. **Produtividade e qualidade de grãos de trigo influenciados por nitrogênio e lâminas de água no Distrito Federal**, 2010. 55 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

CARVALHO, R.; FURTINE NETO, A.E.; NILTON, C. & FERNANDES, L.A. Dessorção de fósforo por silício em solos ácidos. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 24:69-74, 2000.

CASEY, W. H.; KINRADE, S. D.; KNIGHT, C. T. G.; RAINS, D. W.; EPSTEIN, E. Aqueous silicate complexes in wheat, *Triticum aestivum* L. **Plant Cell and Environment**, Oxford, v. 27, n. 1, p. 51-54, 2004.

CHAGAS, R. C. S. **Avaliação de fontes de silício para as culturas do arroz e milho**. Piracicaba, 280p. Tese (doutorado) Centro de Energia Nuclear na agricultura, Universidade de São Paulo. 2004.

CHEN, C.H.; LEWIN, J. Silicon as a nutrient element for *Equisetum arvense*. **Canadian Journal of Botany**, v. 47, p. 125-131, 1969.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento de safra brasileira: grãos, quarto levantamento, janeiro 2013**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&t=>> Acesso em: 18 março 2013.

DATNOFF, L.E.; SNYDER, G.H.; KORNDORFER, G.H. (Ed.). **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier Science, 2001. p. 17-39.

DEMATTE, J.L.I.; PAGGIARO, C.M.; BELTRAME, J.A.; RIBEIRO, S.S. Uso de silicatos em cana-de-açúcar. **Informações Agrônomicas**, n. 133, p. 7-12, 2011.

DUDA, R.; GUTSER, R.; SCHMIDHALTER, U. Characterizing site specific differences in water availability. In: INTERNATIONAL PLANT NUTRITION COLLOQUIUM, 14., 2001, Hannover. **Plant nutrition: food security and sustainability of agro-ecosystems through basic and applied research**. Dordrecht: Kluwer Academic, p. 390-391, 2001.

EMBRAPA TRIGO. *Trigo*. Disponível em: <<http://www.cnpt.embrapa.br/culturas/trigo/index.htm>>. Acesso em: 03 janeiro 2014.

EMBRAPA TRIGO. *Trigo*. Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p_do90_3.htm>. Acesso em: 05 janeiro 2014.

EMBRAPA TRIGO. Disponível em: <<http://www.cnpt.embrapa.br/culturas/trigo/publicacoes.htm>>. Acesso em: 03 janeiro 2013.

EPSTEIN, E. Silicon. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 50, p. 641-664, 1999.

EPSTEIN, E. The anomaly of silicon in plant biology. **Proceedings of National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 91, p. 11-17, 1994.

ESSER, K.B. Can the application of fused calcium silicate to rice contribute to sustained yields and higher pest resistance? **Outlook on Agriculture**, Biggleswade, v. 31, n. 3, p. 199-201, 2002.

FARIA, R. **Efeito da acumulação de silício e a tolerância das plantas de arroz de sequeiro ao déficit hídrico do solo**. Lavras, 2000.47p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Solos, Universidade Federal de Lavras.

FIGUEIREDO, S. L. **Comportamento produtivo do trigo em função da densidade de semeadura e da aplicação de reguladores vegetais**. 2011. 74 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, SP, 2011.

FORTES, C. A. **Correção do solo com silicato de cálcio e magnésio para produção de gramíneas forrageiras**. 2006. 137f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2006.

FOY, C. D. Soil chemical factors limiting plant root growth. **Advances in Soil Science**, New York, v. 19, n. 1, p. 97–149, 1992.

GASCHO, G. J. Silicon sources for agriculture. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. (Ed.) **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier, 2001. cap. 12, p. 197-207.

GONG, H.; ZHU, X.; CHEN, K.; WANG, S.; ZHANG, C. Silicon alleviates oxidative damage of wheat plants in pots under drought. **Plant Science**, v. 169, p. 313-321, 2005.

GUTKOSKI, L. C.; DURIGON, A.; MAZZUTTI, S. et al. Efeito do período de maturação de grãos nas propriedades físicas e reológicas de trigo. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 28, n. 4, p. 888-894, 2008.

HATTORI, T.; INANAGA, S.; ARAKI, H.; AN, P.; MORITA, S.; LUXOVÁ, M.; LUX, A. Application of silicon enhanced drought tolerance in sorghum bicolor. **Plant Physiology**, v. 123, p. 459-466, 2005.

JACKSON, M. L. Chemical composition of soils. In: BEAR, S.E. (ed.). **Chemistry of the soil**. 2.ed. New York: Reinhold, p. 171-141, 1964.

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. **Silicatos de cálcio e magnésio na agricultura**. Uberlândia: UFU/ICAG, 2002a. 23 p. (Boletim técnico, 1).

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. Papel do silício na produção de cana-de-açúcar. **STAB**, Piracicaba, v. 21, n. 1, p. 6-9, 2002b.

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

KORNDÖRFER, A.P. **A importância do silício nas relações entre herbívoros e *Davilla elliptica* (Dilleniaceae) St. Hill no cerrado**. 2006. 31 p. Dissertação (Mestrado em Ecologia e Conservação de Recursos Naturais) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

KORNDÖRFER, G. H.; ARANTES; V. A.; CORRÊA; G. F.; SNYDER, G. H. Efeito do silicato de cálcio no teor de silício no solo e na produção de grãos de arroz de sequeiro. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 3, p. 623, 1999a.

KORNDÖRFER, G. H.; COELHO, N. M.; SNYDER, G. H. et al. Avaliação de métodos de extração de silício em solos cultivados com arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 23, v. 1, p. 101-106, 1999b.

KORNDÖRFER, G.H. & NOLLA, A. Efeito do silício no crescimento e desenvolvimento de plantas. In: SIMPÓSIO SOBRE SÍLÍCIO NA AGRICULTURA, 2., Lavras, 2003. **Anais**. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2003.

LIMA FILHO, O. F. de. TSAI, S. M. **Crescimento e produção do trigo e da aveia branca suplementados com silício**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento Embrapa Agropecuária Oeste 41. 2007. 34 p.

LIMA FILHO, O. F. de; LIMA, M. T. G. de, TSAI, S. M. O silício na agricultura. **Informações Agronômicas**, (Encarte Técnico), Piracicaba, n. 87, p. 1-7, 1999.

MA, J. F.; GOTO, S.; TAMAI, K.; ICHII, M. Role of root hairs and lateral roots in silicon uptake by rice. **Plant Physiology**, Washington, DC, v. 127, n. 4, p. 1773–1780, 2001.

MADEIROS L.B; VIEIRA A.O; AQUINO B.F Micronutrientes e silício nas folhas da cana-de-açúcar: escória siderúrgica aplicado no solo. **Engenharia Ambiental**, 6:27-37, 2009.

MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola: adubos e adubação**. 3. ed. São Paulo: Agronômica Ceres, 1981. 594 p.

MALAVOLTA, E.; PIMENTEL-GOMES, F.; ALCARDE, J. C. **Adubos e adubações: adubos minerais e orgânicos, interpretação da análise do solo, prática da adubação**. São Paulo: Nobel, 2002. 220 p.

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/fertilizantes/legislacao>> Acesso: 26/12/2013.

MARAFON, A. C.; ENDRES, L. Adubação silicatada em cana-de-açúcar. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2011. 48 p. (Embrapa Tabuleiros Costeiros. Documentos, 165).

MARCUSSI S.A. **Escória de siderurgia como material corretivo e fonte de silício para a cultura do milho no estado de São Paulo**. Dissertação (Graduação), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2010.

MARSCHNER, H. **Mineral Nutrition of higher plants**. 2 ed. New York: Academic Press, 1995. 887p.

MATICHENKOV, V. V.; CALVERT, D. V. Silicon as a beneficial element for sugarcane. **Journal of the American Society of Sugarcane Technologists**, Baton Rouge, v. 22, p. 21-30, 2002.

MENDONÇA, A. O.; TAVARES, L. C.; BRUNES, A. P.; MONZÓN, D. L. R.; VILLELA, F. A. Acúmulo de silício e compostos fenólicos na parte aérea de plantas de trigo após a adubação silicatada. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 29, n. 5, p. 1154-1162, 2013.

MIYAKE, Y. The effect of silicon on the grow of the different groups of rice (*Oryza sativa*) plants. **Scientific Report of the Faculty of Agriculture**, v. 8, p. 101-105, 1992.

MOREIRA, J.C.S; SOUSA, C.N.A. Resultados do 26º elite durum wheat yield trial. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 1999 (Comunicado técnico on line n.6) Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/p_co06.htm> Acesso em 12 de dezembro de 2013.

NEUMANN, D.; FIGUEIREDO, C. de. A novel mechanism of silicon uptake. **Protoplasma**, New York, v. 220, n. 1/2, p. 59-67, 2002.

OKUDA, A.; TAKAHASHI, E. Studies on the physiological role of silicon in crop plants: Some specific behaviors of rice plants in silicic acid uptake. **Journal of Science and Soil Manure**, Tokyo, v. 33, p. 217-221, 1962.

PEREIRA, H. S.; KORNDORFER, G. H.; VIDAL, A. A. and CAMARGO, M. S. Silicon sources for rice crop. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 61, n. 5, p. 522-528, 2004.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M. Escória de siderurgia e calcário na correção da acidez do solo cultivado com cana-de-açúcar em vaso. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 57, n. 4, p. 739-744, 2000.

PRADO, R.M.; FERNANDES, F.M.; NATALE, W. **Uso agrícola da escória de siderurgia no Brasil**: estudos na cultura da cana-de-açúcar. Jaboticabal: FUNEP, 2001. 67p.

RAFI, M.M.; EPSTEIN, E.; FALK, R.H. Silicon deprivation causes physical abnormalities in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Journal of Plant Physiology**, Stuttgart, v.151, p.497-501, 1997.

RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Agronômica Ceres; Associação Brasileira para a Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1991. 343 p.

RAIJ, B. Van; CANTARELA, H.; QUAGGIO, J. A. et al. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**, 2. ed. Campinas: IAC, 1996. 285 p. (Boletim Técnico, 100).

RAMOS, L. A.; KORNDÖRFER, G. H.; NOLLA, A. Acúmulo de silício em plantas de arroz do ecossistema de várzea submetido à aplicação de diferentes fontes. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 3, p. 751-757, 2008.

RAVEN, J. A. The transport and function of silicon in plants. **Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society**, v. 58, p. 179-207, 1983.

RODRIGUES, O.; TEIXEIRA, M.C.C.; Efeito da adubação nitrogenada, arranjo de plantas e redutor de crescimento no acamamento e em características de cevada. Passo Fundo: **Embrapa Trigo**, 2003.

RODRIGUES, F. A.; OLIVEIRA, L. A.; KORNDÖRFER, A. P. et al. Silício: um elemento benéfico e importante para as plantas. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 134, p. 14-20, 2011.

SANGSTER, A.G.; HODSON, M. J.; PARRY, D.W. Silicon deposition and anatomical studies in the inflorescence bracts of four *Phalaris* species with their possible relevance to carcinogenesis. **New Phytologist**. v. 93, p. 105-122, 2001.

SAVANT, N. K.; SNYDER, G. H.; DATNOFF, L. E. Silicon management and sustainable rice production. **Advances in Agronomy**, v. 58, p. 151-199, 1997a.

SAVANT, N.K.; DATNOFF, L.E.; SNYDER, G.H. Depletion of plant-available silicon in soils: a possible cause of declining rice yields. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.28, p.1245-1252, 1997b.

SENA, M. C.; CASTRO, S. H. Legislação e fiscalização do uso de silício na agricultura. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE SILÍCIO NA AGRICULTURA, 5., 2010, Viçosa. **Anais...**, Viçosa, MG: UFV, DFP, 2010. p. 183-202.

SHI, Z.J.; PAN, G.Q.; ZHOU, Q.; XIE, Y.C.; MENG, Q.T. A study on the application of silicon fertilizer to cotton. **China Cotton**, Beijing, v.28, n.7, p.17-18, 2001.

SHIA, S.Y.; WANG, Q.S. Studies on the effect of silicon fertilizer on cotton. **China Cotton**, Beijing, v.25, n.8, p.6-7, 1998.

SLEPER, D. A.; POEHLMAN, J. M. **Breeding field crops**. Ames: Blackwell Pub Iowa, 2006. 424 p.

SRIPANYAKORN, S. JUGDAOHSINGH, R.; THOMPSON, R. P. H.; POWELL, J. J. Dietary silicon and bone health. **Nutrition Bulletin**, v. 30, p. 222-230, 2005.

SU, R. Z.; LIU, Z. M.; LI, J.; AI, J. Study on silica distribution of wheat straw surface. **Scientia Silvae Sinicae**, Beijing, v. 38, n. 6, p. 99-102, 2002.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 848 p.

TAKAHASHI, E. Uptake mode and physiological functions of silica. In: MATSUO, T.; KUMAZAWA, K.; ISHII, R.; ISHIHARA, K.; HIRATA, H. **Science of the rice plant: physiology**. Tokyo: Food and Agriculture Policy Research Center, cap. 5, p. 420-433, 1995.

TIBOLA, C. S.; FERNANDES, J. M. C.; LORINI, I. et al. **Produção integrada de trigo – safra 2007**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2008. 10p.

TOKURA, A. M.; NETO, A. E. F.; CURI, N.; CARNEIRO, L. F.; ALOVIS, A. A. Silício e fósforo em diferentes solos cultivados com arroz de sequeiro. **Acta Scientiarum - Agronomy**, Maringá, v. 29, n. 1, p. 9-16, 2007.

USDA - UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE, Foreign Agricultural Service. **Production, Supply and Distribution Online: Custom Query**. USDA, 2013.

VESOHOSKI, F.; MARCHIORO, V. S.; FRANCO, F. D. A. et al. Componentes do rendimento de grãos em trigo e seus efeitos diretos e indiretos na produtividade. **Revista Ceres**, v. 58, n. 3, p. 337-341, 2011.

WELTER, B. **Tecnologias de produção para a cultura do trigo**. Passo Fundo: Plantio Direto Eventos, 2005.

WERNER, D. Silicate metabolism. In: WERNER, D. **The biology of diatoms**, Oxford: Blackwells Scientific, p.110-149, 1977.

WERNER, D.; ROTH, R. **Silica metabolism**. In: LÄUCHLI, A.; BIELESKI, R.L. (ed.). Encyclopedia of plant physiology. New Series, Berlin: Springer-Verlag, v.15B, p.682-694, 1983.

ZANÃO JÚNIOR, L. A.; COELHO, P. H. M.; FONTES, R. L. F.; ÁVILA, V. T.; E KAWAMURA, I. K. Severidade da mancha-marrom em trigo cultivado com diferentes formas de nitrogênio e doses de manganês. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33 n. 5, p. 1199-1206, 2009.

YOSHIDA, S. Chemical aspects of the role of silicon in physiology of the rice plant. **Bulletin of the National Institute Agronomic Science of Japan Serie B**, v. 15, p. 1-58, 1975.

3 ARTIGO 1: ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO E DESENVOLVIMENTO DO TRIGO EM FUNÇÃO DA ADUBAÇÃO SILICATADA

AUTOR: Marcos Vinícius Mansano Sarto

ORIENTADORA: Maria do Carmo Lana

RESUMO

A aplicação de silicato de cálcio e magnésio pode promover melhorias nos atributos químicos do solo e, conseqüentemente, aumentar a produtividade das culturas. Neste trabalho objetivou-se avaliar o efeito da aplicação de doses de silicato de cálcio e magnésio sobre os atributos químicos de diferentes classes de solos e desenvolvimento do trigo. O experimento foi realizado em casa de vegetação em vasos com três tipos de solos do estado do Paraná. O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso, em esquema fatorial 5 x 3, com quatro repetições. Os tratamentos constituíram da aplicação de 0, 1, 2, 4 e 6 Mg ha⁻¹ de silicato de cálcio e três solos: Latossolo Vermelho eutrófico (LVef), Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico (PVAe) e Latossolo Vermelho distroférico (LVd). Avaliou-se o efeito do silicato de cálcio e magnésio sobre os atributos químicos do solo: Si, pH, H + Al, P, K, Ca, Mg, Al, Cu, Zn, Fe, Mn, CTC e V, e o desenvolvimento do trigo: massa de matéria seca da parte aérea, altura de planta, número de perfilho e produção. A adubação silicatada elevou os teores de Si, Ca e Mg e os valores de pH, CTC e V, reduziu a acidez potencial (H + Al) e o teor de Al do solo. Não houve efeito da aplicação do silicato de cálcio e magnésio nos teores de P, K, Cu, Zn, Fe e Mn nos solos avaliados. A adubação silicatada não influenciou as variáveis agrônômicas do trigo cultivado nos solos LVef e PVAe, entretanto, no solo LVd, aumentou a massa da matéria seca da parte aérea, altura de plantas, número de perfilho e produção da cultura do trigo.

Palavras-chave: Fertilidade do solo, Latossolo, silício, *Triticum aestivum* L.

SOIL CHEMICAL PROPERTIES AND DEVELOPMENT OF WHEAT CROP DUE TO SILICON FERTILIZATION

ABSTRACT

The application of calcium silicate and magnesium can promote improvements in chemical soil and consequently increase crop productivity. This study aimed to evaluate the effect of doses of calcium silicate on soil chemical properties and development of wheat crop. The experiment was conducted in a greenhouse in pots with three soil types in the state of Paraná. The experimental design was a randomized block design in a factorial 5 x 3, with four replications. Treatments consisted of application of 0, 1, 2, 4 and 6 Mg ha⁻¹ of calcium silicate and three soils: Red Latosol eutrophic (LVef), Red Yellow Argis soil eutrophic (PVAe) and Red Latosol distroferric (LVd). We evaluated the effect of calcium and magnesium silicate on soil chemical properties: Si, pH, H + Al, P, K, Ca, Mg, Al, Cu, Zn, Fe, Mn, CTC and V, and development wheat: dry matter of shoots, plant height, number of tillers and production. Silicon fertilization increased leaf Si, Ca, and Mg and pH, CTC and V reduced the potential acidity (H + Al) and Al content of the soil. There was no effect of the application of calcium

and magnesium silicate in the levels of P, K, Cu, Zn, Fe and Mn in soils evaluated. Silicon fertilization did not influence the agronomic traits of wheat grown in soils LVef and PVAe, however, soil LVd increased the dry weight of shoots, plant height, tiller number and yield of wheat crop.

Keywords: Soil fertility, Latosol, silicon, *Triticum aestivum* L.

3.1 INTRODUÇÃO

O trigo (*Triticum aestivum* L.) é uma cultura de grande importância no cenário mundial, sendo a principal fonte energética na alimentação da população de muitos países, com produção mundial superior a 650 milhões de toneladas por ano (USDA, 2013). O Brasil concentra sua produção na região sul do país, a qual é responsável por mais de 90% da produção nacional, sendo que o estado do Paraná apresenta a maior área plantada seguido do Rio Grande do Sul (ZYLBERSZTAJN et al., 2004). Porém, a produção nacional representa menos de 50 % do consumo interno do cereal, fazendo com que o Brasil seja um dos principais países importadores de trigo no mundo (CONAB, 2013).

Um dos grandes desafios da agricultura moderna baseia-se no aumento de produtividade das áreas agrícolas existentes. Assim, torna-se importante a realização de estudos que contribuam para a minimização dos efeitos que possam causar a diminuição do rendimento e a depreciação da qualidade desse cereal, como a ocorrência de pragas e doenças, problemas com a fertilidade do solo e nutrição mineral das plantas.

No Brasil, os solos tropicais e subtropicais, submetidos ao manejo intensivo apresentam altos teores de alumínio (Al), baixa saturação por bases, alta capacidade de fixação de fósforo (P) e altos índices de acidez (MATICHENKOV; CALVERT, 2002). Durante a acidificação do solo, ocorre a liberação de íons H^+ para a solução do solo, visando manter o equilíbrio iônico no interior das células das raízes das plantas, através do mecanismo antiporte, que permite absorver cátions como Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ (TAIZ; ZEIGER, 2009), com isso reduz a disponibilidade destes cátions no solo, colaborando para diminuir a produtividade das culturas, em decorrência da diminuição da fertilidade do solo (RAIJ, 1996).

Assim a correção desses solos torna-se imprescindível para o aumento na produtividade. Os silicatos de cálcio e magnésio, constituídos basicamente de $CaSiO_3$ e $MgSiO_3$, apresentam reações semelhantes às do calcário, que eleva o pH do solo e, disponibiliza o ânion silicato ($H_3SiO_4^-$). Esses silicatos estão associados ao aumento na disponibilidade de Si, elevação do pH e aumento do Ca e Mg trocável do solo, indiretamente

propiciando incremento na disponibilidade de fósforo e podendo, ainda, atuar na redução da toxicidade de Fe, Mn e Al para as plantas (PRADO et al., 2002).

Mesmo não sendo considerado elemento essencial e sim benéfico, a importância da aplicação de Si, para as plantas está relacionada principalmente ao aumento do crescimento e produção vegetal através de ações indiretas como folhas mais eretas, diminuição do auto-sombreamento, maior rigidez estrutural dos tecidos e assim reduzindo o acamamento, proteção contra estresses tanto abióticos, como frio e salinidade, e redução dos efeitos tóxicos de ferro, manganês, alumínio (MA; TAKAHASHI, 1991), assim como estresses bióticos, atuando na proteção contra patógenos e insetos fitófagos (EPSTEIN, 1994; MARSCHNER, 1995).

A toxicidade de alumínio em plantas é um problema para a agricultura em solos ácidos. Alguns trabalhos demonstraram que, sob determinadas condições, a adição de Si pode minimizar a toxicidade do alumínio. De maneira que a aplicação de silicatos pode aumentar a resistência das plantas ao excesso de alumínio (WIESE; NIKOLIC; RÖMHELD, 2007).

Desta forma, trabalhos relatam que poáceas têm apresentado incremento na produtividade mediante o fornecimento de Si às plantas (KORNDÖRFER; DATNOFF, 1995), como no trigo, aveia (LIMA FILHO; TSAI, 2007), milho (MARCUSSE, 2010), sorgo (BARBOSA et al., 2008), cana-de-açúcar (KORNDÖRFER; PEREIRA; CAMARGO, 2002; MADEIROS; VIEIRA; AQUINO, 2009) e arroz (PEREIRA et al., 2004; TOKURA et al., 2007, RAMOS; KORNDÖRFER; NOLLA, 2008). Esse incremento na produtividade pode estar relacionado a mudanças nos atributos químicos do solo. Diante disso, objetivou-se avaliar os efeitos de doses de silicato de cálcio sobre atributos químicos do solo e o desenvolvimento do trigo em três solos do estado do Paraná.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação, na Estação Experimental de Cultivo Protegido Mário Cesar Lopes, da Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Unioeste, *campus* de Marechal Cândido Rondon – PR, no período de maio a agosto de 2012.

O experimento foi implantado em vasos de polietileno de 8,5 dm³, contendo 8 dm³ de solo peneirado em malha de 5 mm. Os solos utilizados para o preenchimento dos vasos foram classificados como Latossolo Vermelho eutrófico (LVef), Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico (PVAe) e Latossolo Vermelho distrófico (LVd), segundo Embrapa (2013), de

textura argilosa, arenosa e argilosa, respectivamente, sendo retirado da camada arável (0 - 0,2 m), em área de sistema plantio direto, coletado nos municípios de Marechal Cândido Rondon, Goioerê e Cascavel no estado do Paraná. Os atributos químicos e granulométricos são apresentados na tabela 1.

Tabela 1. Atributos químicos e granulométricos dos solos LVef, PVAe e LVd coletados na camada de 0-0,2 m de profundidade

Solo	pH	V	P	MO	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Al ³⁺	H+Al	SB	CTC
	CaCl ₂	- % -	mg dm ⁻³	g dm ⁻³	-----cmol _c dm ⁻³ -----						
LVef	5,3	60,0	37,1	26,0	4,8	1,8	0,15	0,0	4,6	6,8	11,4
PVAe	6.2	63,0	40,7	22,0	2,5	0,7	0,20	0,0	2,0	3,4	5,4
LVd	4,1	30,1	22,5	39,6	4,0	0,5	0,20	2,4	10,7	4,7	15,4
Micronutrientes											
Solo	Cu	Zn		Fe		Mn		Si	Argila	Silte	Areia
	----- mg dm ⁻³ -----				----- g kg ⁻¹ -----						
LVef	15	132		41,1		3,9		19,3	549	368	83
PVAe	9,9	247		28,5		5,4		18,0	100	43	857
LVd	8,2	110		35,4		8,2		15,8	535	430	35

(P, K, Micronutrientes) Extrator Mehlich - 1; (Si) Extrator ácido acético; (Al, Ca, Mg) Extrator KCl 1 mol L⁻¹; (H+Al) pH SMP (7,5);(pH) Extrator CaCl₂, Análise realizada no Laboratório de Fertilidade do solo e nutrição mineral de Plantas da UNIOESTE. Campus Marechal Cândido Rondon, PR.

O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso, em esquema fatorial 5 x 3, sendo o primeiro fator cinco doses de silicato de cálcio e magnésio: 0, 1, 2, 4 e 6 Mg ha⁻¹ e o segundo, três solos: LVef, PVAe e LVd, com quatro repetições. Como fonte de silício foi utilizado silicato de cálcio e magnésio, com nome comercial Agrossilício® em pó, oriundo de uma escória da produção do aço inox (Acesita), tratada pela Recmix do Brasil. Este produto contém: 25 % de cálcio, 6 % de magnésio e 10,5 % de silício e PRNT de 88 %.

Antes da semeadura efetuou-se a aplicação do silicato de cálcio em todo o volume do vaso, conforme os tratamentos. Os vasos permaneceram incubados por 15 dias com 60 % do volume total de poros (VTP) ocupado por água (FREIRE et al., 1980). No momento da semeadura, foi realizada a adubação básica de acordo com Raij et al. (1997), aplicando-se 30 kg ha⁻¹ N, 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 45 kg ha⁻¹ de K₂O na forma de ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio, respectivamente. Após 30 dias da semeadura, realizou-se a adubação de cobertura, aplicando-se 45 kg ha⁻¹ de N, na forma de ureia.

Foram utilizadas cinco sementes de trigo por vaso, cultivar BRS Pardela, e após nove dias foi realizado o desbaste, deixando três plantas por vaso. Os vasos foram irrigados diariamente, procurando manter a umidade do solo próximo à capacidade de campo.

Ao final do ciclo da cultura, foram coletada amostras dos solos, para avaliação dos valores de pH CaCl_2 (1:2,5 solo/ CaCl_2 suspensão $0,01\text{mol L}^{-1}$), $\text{H}+\text{Al}$ (SMP), $\text{P}_{\text{Mehlich-1}}$, $\text{K}_{\text{Mehlich-1}}$, Ca_{KCl} , Mg_{KCl} , $\text{Cu}_{\text{Mehlich-1}}$, $\text{Zn}_{\text{Mehlich-1}}$, $\text{Fe}_{\text{Mehlich-1}}$, $\text{Mn}_{\text{Mehlich-1}}$ de acordo com Embrapa (2009), $\text{Si}_{\text{Ac. Acético}}$ de acordo com Korndorfer, Pereira e Camargo (2004), e obtidos os valores de capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V%).

Na maturação (115 dias após a emergência das plantas), a cultura foi avaliada quanto à massa de matéria seca da parte aérea (MSPA, g/vaso), altura de planta (cm), número de perfilho (n° /vaso) e produção por vaso (g/vaso).

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância pelo teste F, e quando houve efeito significativo, seguiu-se a aplicação de estudos de regressão polinomial (PIMENTEL-GOMES; GARCIA, 2002), com auxílio do programa estatístico Saeg 8.0 (SAEG, 1999).

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As análises do solo realizadas ao final do experimento, após o término do ciclo da cultura, demonstraram que houve alterações nos atributos químicos do solo (Figura 1).

Os teores de Si variaram segundo o tipo de solo (Figura 1A). Os resultados mostraram incremento nos três solos, nos teores de Si disponível com a aplicação de silicato de cálcio e magnésio. O Si extraído, variou de 19-42; 18-31 e 16-25 mg dm^{-3} , respectivamente, para os solos LVef, PVAe e LVd. Tais dados corroboram com os resultados de Souza et al. (2008), que estudando a substituição do carbonato de cálcio pelo silicato de cálcio nos atributos químicos do solo relataram aumento de Si no solo decorrente da aplicação do silicato de cálcio em comparação ao carbonato.

A aplicação de silicato de cálcio e magnésio elevou de forma linear positiva os valores de pH CaCl_2 , apresentando valores iniciais de 5,3; 6,5 e 4,05 aumentando para 7,2; 7,3 e 5,9 na dose mais elevada, nos solos LVef, PVAe e LVd, respectivamente (Figura 1B). A neutralização da acidez do solo com o uso de silicatos também foi obtido por vários autores como Prado, Fernandes e Natale (2003); Carvalho-Pupatto, Bull e Crusciol (2004); Melo, (2005); Korndörfer et al. (2010).

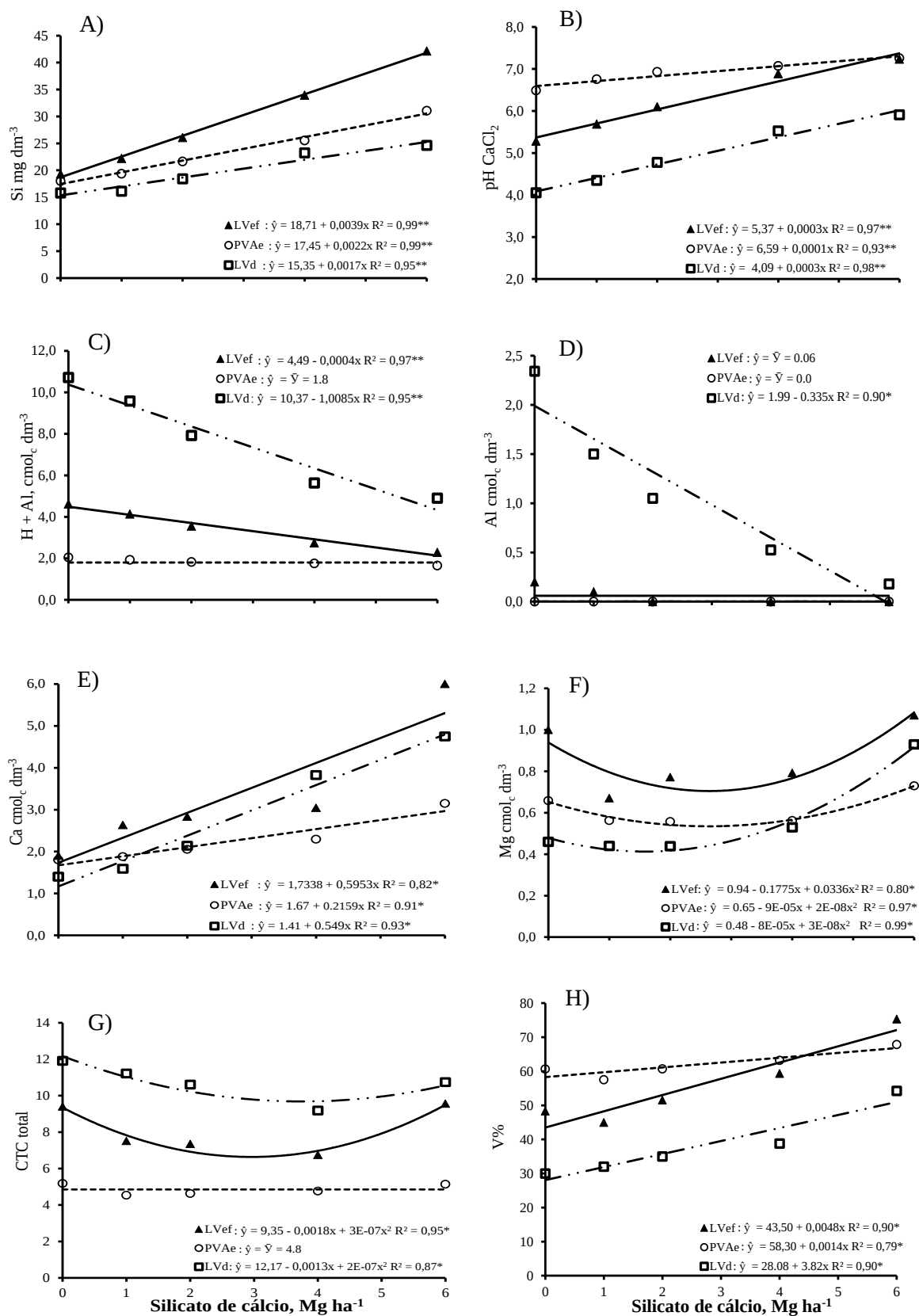


Figura 1. Valores médios de Si (A), pH CaCl_2 (B), H + Al (C), Al (D), Ca (E), Mg (F), CTC (G) e V% (H) no solo, após o cultivo com trigo, em função das doses de silicato de cálcio, Marechal Cândido Rondon – PR, 2014. **, * e ns, significativo a 1%, 5% e não significativo, respectivamente, pelo Teste F

Este efeito do silicato no solo ocorreu principalmente pela presença da base silicato SiO_3^{2-} , gerada pela reação das escórias no solo (ALCARDE, 1992), que interfere positivamente no pH. A hidrólise do ânion silicato promove a liberação de hidroxilas (OH^-), que neutralizando os H^+ elevando o pH do solo (CARVALHO et al., 2000).

Ramos et al. (2006) estudando diferentes formas de correção do pH em amostras de um Neossolo Quartzarênico, observaram que os silicatos foram mais eficientes que o gesso e o calcário na correção da acidez do solo. Faria (2000), constatou um aumento progressivo no pH do solo com aplicação de 6 Mg ha^{-1} de fontes de silicato, em que o pH aumentou, em média, de 4,2 para 4,8 em Neossolo Quartzarênico, e de 4,6 para 5,1, em um Latossolo Vermelho Distrófico típico com a aplicação de silicato de cálcio.

Além de elevar o pH, o silicato promoveu redução na acidez potencial ($\text{H} + \text{Al}$) dos solos LVEf e LVd (Figura 1C). Os valores de $\text{H} + \text{Al}$ decresceram de 4,6 e 10,7 para 2,3 e 4,9 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, na dose de 6 Mg ha^{-1} , ou seja, houve diminuição da acidez potencial em decorrência da elevação do pH devido à reação do SiO_3^{2-} no solo, que pode ter formado H_2SiO_3^- , reduzindo o H^+ presente na solução do solo (ALCARDE, 1992).

Prado, Fernandes e Natale (2003), verificaram redução da acidez potencial trocável nas profundidades de 0-0,2 e 0,2-0,4 m tanto com o uso de calcário calcítico quanto com escória siderúrgica na cultura da cana-de-açúcar, assim como Barbosa Filho (2004), Sobral et al. (2011) em arroz. Prates et al. (2011) ao avaliarem lodo de esgoto e silicato de cálcio evidenciaram o poder neutralizante da acidez pelo silicato de cálcio na camada de 0-0,2 m.

A concentração de Al no solo LVd, foi afetada pelas doses de silicato de cálcio e magnésio, diminuindo de 2,34 para 0,18 $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ (Figura 1D). Segundo Korndörfer et al. (2010), o aumento nos valores de pH do solo provoca maior concentração de oxidrilas, as quais são capazes de precipitar o Al^{3+} , reduzindo seu teor no solo, como foi constatado no solo LVd.

Com a hidrólise do ânion silicato ocorre a liberação de hidroxilas (OH^-), que neutraliza os H^+ elevando o pH do solo (CARVALHO et al., 2000). Promovendo a precipitação do Al^{3+} na forma de hidróxido de Al ($\text{Al}(\text{OH})_3$), de baixa solubilidade sendo inativo na solução do solo e, portanto, não tóxico para as plantas (KORNDÖRFER; NOLLA, 2003). Segundo Hodson e Sangster (1999), em pH próximo da neutralidade o alumínio e o silício podem formar hidroxialuminossilicatos (HAS), os quais podem reduzir a toxicidade de alumínio.

A aplicação de silicato de cálcio e magnésio influenciou de forma distinta a concentração de Ca, sendo que no solo LVEf apresentou ponto de mínima na dose $2,22 \text{ Mg ha}^{-1}$ de silicato de cálcio com a concentração de $2,27 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ de cálcio neste solo (Figura

1E). Contudo, para os solos PVAe e LVd, os teores de Ca passaram de 1,18 e 1,40 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ na testemunha, para 3,15 e 4,75 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ na dose de 6 Mg ha^{-1} , nos solos PVAe e LVd, respectivamente.

Também houve resposta de forma quadrática ao incremento das doses de silicato de cálcio nos teores de Mg nos três solos (Figura 1F), indicando um ponto de mínima na dose 2,64; 2,62 e 1,60 Mg ha^{-1} de silicato de cálcio com a concentração de 0,70; 0,53 e 0,54 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ de Mg nos solos LVef, PVAe e LVd, respectivamente.

Este resultado demonstra que a fonte de silício utilizada foi eficiente, reagindo no solo e disponibilizando silício, cálcio e magnésio. Esse aumento era esperado pelo fato do produto reagir rápido no solo e possuir na sua composição química 23 % de SiO_2 , 36 % de CaO e 9 % de MgO , o que favorece o incremento destes elementos na solução do solo, de acordo com resultados observados por Vale et al. (2010), Korndörfer et al. (2010), Rocha, Prado e Almeida (2011) e Sobral et al. (2011).

A capacidade de troca de cátions (CTC) indicou ponto de mínima com 2,96 e 3,75 Mg ha^{-1} de silicato de cálcio, alcançando valor de 6,65 e 9,68 $\text{cmol}_c \text{dm}^{-3}$ para os solos LVef e LVd, respectivamente (Figura 1G). O solo LVd apresenta elevado valor de CTC total, mas uma parcela significativa das cargas negativas do solo está adsorvendo íons H^+ , como observado na acidez potencial desse solo. Entretanto, o comportamento do solo PVAe, em não influenciar a SB e CTC total do solo, pode ser explicado pelo alto valor inicial de pH e baixo tamponamento do solo arenoso, em que o efeito do corretivo diminui quando o pH atinge valores elevados.

A saturação por bases (V%) aumentou linearmente com a aplicação de silicato de cálcio (Figura 1H), passando de 48,3, 60,7 e 30,1% no tratamento testemunha para, 75,3, 67,8 e 54,2% na dose máxima de silicato de cálcio 6 Mg ha^{-1} nos solos LVef, PVAe e LVd, respectivamente. A elevação dos valores de V% está relacionada ao aumento do pH e, ao mesmo tempo, incremento dos teores de Ca e Mg, resultados encontrados também por Korndörfer et al. (2010).

Com relação ao solo LVd, o baixo índice de V% significa que há valor reduzido de cátions no solo, como Ca, Mg e K saturando as cargas negativas dos colóides e que a maioria delas estão sendo ocupadas pela acidez potencial (Figura 1C).

Prates et al. (2011) verificaram de maneira geral que, a CTC total, a CTC efetiva e a saturação por bases foram maiores com a incorporação de silicato de cálcio ao solo, em razão das adições de cálcio contidas neste resíduo. Salienta-se que o uso desta fonte pode ser

aplicado como corretivo de solo, com a vantagem de possuir Si em sua composição, o que torna as plantas menos suscetíveis a estresse (GUNES et al., 2008).

Com relação à concentração de P, K, Cu, Zn e Mn no solo, não houve efeito significativo com a aplicação de silicato de cálcio (Tabela 2).

Tabela 2. Médias das concentrações de P, K, Cu, Zn, Fe e Mn no solo em função das doses de silicato de cálcio e magnésio, Marechal Cândido Rondon – PR, 2014

Silicato de cálcio	P			K			Cu		
	LVef	PVAe	LVd	LVef	PVAe	LVd	LVef	PVAe	LVd
Mg ha ⁻¹	-----mg dm ⁻³ -----			-----cmolc dm ⁻³ -----			-----mg dm ⁻³ -----		
0	37,73	49,42	54,97	0,13	0,20	0,19	16,75	4,65	6,60
1	66,26	42,55	48,29	0,15	0,16	0,15	15,83	6,48	6,00
2	35,35	53,91	37,68	0,19	0,16	0,15	16,6	7,05	5,93
4	41,47	52,84	23,27	0,17	0,17	0,16	16,87	5,67	5,55
6	48,68	77,74	36,17	0,19	0,20	0,15	17,00	5,95	5,67
Teste F	0,63 ^{ns}			0,56 ^{ns}			0,38 ^{ns}		
CV (%)	53,01			21,58			12,42		

Silicato de cálcio	Zn			Fe			Mn		
	LVef	PVAe	LVd	LVef	PVAe	LVd	LVef	PVAe	LVd
Mg ha ⁻¹	-----mg dm ⁻³ -----								
0	14,23	18,23	10,70	46,00	24,13	38,17	7,77	15,28	8,48
1	20,90	7,37	11,23	48,38	32,23	39,81	20,90	7,03	16,85
2	11,25	14,17	7,00	55,65	28,23	41,56	11,25	14,35	9,03
4	13,78	5,73	17,27	60,82	28,00	40,07	13,78	9,50	18,28
6	14,83	17,50	29,20	55,90	41,60	41,73	14,83	14,50	26,13
Teste F	0,88 ^{ns}			0,93 ^{ns}			1,2 ^{ns}		
CV (%)	68,68			14,92			62,46		

**, * e ns, significativo a 1%, 5% e não significativo, respectivamente, pelo Teste F.

Segundo Prado et al. (2004), os efeitos distintos da aplicação do silicato de cálcio sobre a liberação de micronutrientes para o solo podem ser atribuídos, muitas vezes, às variações decorrentes da origem da matéria prima empregada e do tipo de processo industrial utilizado pela siderúrgica, o que influencia a composição química do resíduo, a que se somam outras variáveis, como a dose, a forma de incorporação e os atributos físico-químicos inerentes a cada solo.

A massa de matéria seca da parte aérea (MSPA), altura de planta, número de perfilho e produção, das plantas cultivadas nos solos LVef e PV Ae sob as doses de silicato de cálcio e magnésio não foram influenciadas (Figura 2). Provavelmente devido aos níveis de Si no solo estarem próximos a faixa considerada adequada (Tabela 1), não sendo um fator limitante para o desenvolvimento da cultura. Korndörfer et al. (1999) cita que os valores de Si, no solo, extraídos com ácido acético $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ inferiores a 20 mg dm^{-3} , ou ainda de 6 a 8 mg dm^{-3} extraídos em $\text{CaCl}_2 \text{ } 0,05 \text{ mol L}^{-1}$ em geral indicam a necessidade de adubação com Si. De acordo com os mesmos autores, estes solos apresentam boa resposta à aplicação de silício, e acima desses valores, as repostas tendem a ser mais discretas.

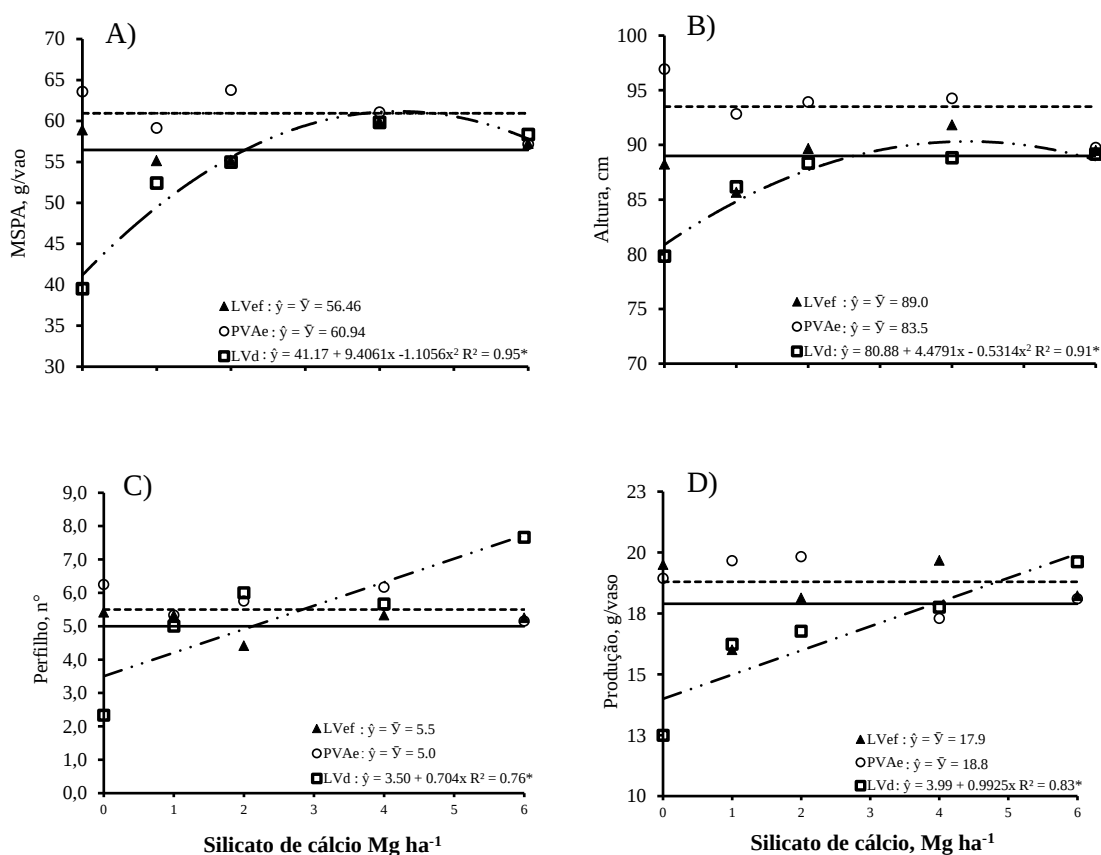


Figura 2. Efeito das doses de silicato de cálcio na altura de plantas (A), massa de matéria seca da parte aérea (MSPA) (B), número de perfilho (C) e produção de grãos (D) da cultura do trigo, em função das doses de silicato de cálcio e magnésio, **, * e ns, significativo a 1%, 5% e não significativo, respectivamente, pelo Teste F

Em gramíneas forrageiras, Korndörfer et al. (2010) verificaram que as doses de silicato não afetaram a produção de massa de matéria seca, tanto no primeiro como no segundo corte, em cultivo realizado em Latossolo Vermelho Amarelo distrófico. A ausência

de efeito neste caso pode ser explicada, em parte, devido às condições nas quais estas espécies foram estudadas, isto é, não foram submetidas ao ataque de pragas e doenças ou a déficit hídrico.

Entretanto as plantas cultivadas no solo LVd, apresentaram aumento significativo nos valores de massa de matéria seca da parte aérea, altura de planta, número de perfilho e produção (Figura 2). Estes resultados demonstraram que o silicato, normalmente, tem efeito mais expressivo em solos de baixa fertilidade, se comparados com aos solos corrigidos, como o LVef e PVAe. Tal fato evidencia que os efeitos benéficos do Si na adubação se manifestam positivamente, principalmente quando as plantas estão sujeitas a algum tipo de estresse, seja ele biótico ou abiótico (KORNDÖRFER et al., 1999).

O silicato aplicado no solo afetou significativamente a massa de matéria seca da parte aérea das plantas cultivadas no solo LVd, apresentando ponto de máxima para massa de matéria seca obtida com a dose de $4,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ produzindo $61,14 \text{ g/vaso}$. A altura de planta também foi incrementada com as doses de silicato aplicadas ao solo LVd, com a maior altura de plantas de $90,31 \text{ cm}$ obtido com a dose máxima de $4,2 \text{ Mg ha}^{-1}$.

A aplicação de silicato de cálcio também influenciou o número de perfilho (Figura 2C), respondendo de forma linear ao incremento das doses de silicato de cálcio, a qual apresentou um aumento de 2,3 para 7,7 perfilhos por planta com a dose de 6 mg ha^{-1} de silicato de cálcio.

Ao observar os resultados da produção de grãos do trigo cultivado no solo LVd (Figura 2D), observa-se que a aplicação de silicato na dose de 6 Mg ha^{-1} proporcionou aumento de 12,5 para $19,6 \text{ g/vaso}$, aumento de 56,8%, na produção de grãos, em relação à testemunha. Isso pode ser explicado pelos baixos valores de pH, V% e alto teor de Al presentes nesse solo, que quando submetido as doses de silicato, apresentou melhorias nos atributos químicos do solo (Figura 1), melhorando as condições para o desenvolvimento da cultura.

Resultados semelhantes foram obtidos por Barbosa et al. (2008), para a cultura do sorgo. Além de incrementos na produtividade, os autores observaram que o fornecimento de Si proporcionou maior crescimento radicular em profundidade e melhor distribuição de raízes no perfil do solo, motivo pelo qual colabora no aumento de produção.

Com os baixos valores de pH, V % e a presença de Al trocável no LVd, pode ter restringido o crescimento das raízes, em consequência, ocorreu redução do volume de solo explorado pelas raízes, impossibilitando que as plantas desenvolvessem todo seu potencial produtivo, principalmente pelo pequeno crescimento radicular, que impede que a planta

busque água em camadas mais profundas do solo, assim, tornam-se mais suscetíveis ao estresse hídrico, limitando a absorção de nutrientes e o potencial produtivo das plantas (JANSEN; BROADLEY; ROBBRECHT, 2002; CHAFFAI; MARZOUK; FERJANI, 2005). Desta forma, houve efeito positivo da aplicação das doses de silicato de cálcio e magnésio, pois aumentou o pH, neutralizou a acidez potencial e o Al^{+3} , forneceu Ca e Mg.

A resposta do trigo cultivado no solo LVd, submetido a doses de silicato de cálcio e magnésio, é conhecida, em função da melhoria do ambiente radicular, uma vez que o solo utilizado era ácido e com alto teor de Al, e o silicato de cálcio, promoveu a neutralização da acidez do solo e redução do Al, o que possibilita a proliferação intensa das raízes, com reflexos positivos no crescimento, perfilhamento e produção da planta.

3.4 CONCLUSÕES

A aplicação de silicato de cálcio e magnésio no solo promoveu aumento dos teores de Si, Ca e Mg dos valores de pH, CTC e V%, e reduziu a acidez potencial ($H + Al$) e o teor de Al do solo.

Não houve efeito da aplicação do silicato de cálcio e magnésio nos teores de P, K, Cu, Zn, Fe e Mn nos solos avaliados.

A adubação silicatada não influenciou as variáveis agronômicas do trigo cultivado nos solos LVef e PVAe. No solo não corrigido (LVd) a aplicação de silicato de cálcio promoveu aumento da massa de matéria seca da parte aérea, altura de plantas, número de perfilho e produção do trigo.

AGRADECIMENTOS

A CAPES e ao CNPq pela concessão de auxílio financeiro para realização da pesquisa.

REFERÊNCIAS

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).

BARBOSA FILHO, M. P.; ZIMMERMANN, F. J. P.; SILVA, O. F. Influência da escória silicatada na acidez do solo e na produtividade de grãos do arroz de terras altas. **Ciência Agrotécnica**, Lavras, v. 28, n. 2, p. 323-331, 2004.

BARBOSA, N. C.; VENÂNCIO, R.; ASSIS, M. H. S.; PAIVA, J. B.; CARNEIRO, M. A. C.; PEREIRA, H. S. Formas de aplicação de silicato de cálcio e magnésio na cultura do sorgo em neossolo quartzarênico de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 38, n. 4, p. 290-296, 2008.

CHAFFAI, R. R.; MARZOUK, B.; FERJANI, E. E. Aluminum mediates compositional alterations of polar lipid classes in maize seedlings. **Phytochemistry**, v. 66, p. 1903-1912, 2005.

CARVALHO, R.; FURTINE NETO, A. E.; NILTON, C.; FERNANDES, L. A. Dessorção de fósforo por silício em solos ácidos. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 69-74, 2000.

CARVALHO-PUPATTO, J. G.; BULL, L. T.; CRUSCIOL, C. A. Atributos químicos do solo, crescimento radicular e produtividade do arroz de acordo com a aplicação de escórias. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 12, p. 1213-1218, 2004.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. *Acompanhamento de safra brasileira: grãos, quarto levantamento, janeiro 2013*. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&t=>> Acesso em: 18 março 2013.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3. ed. Rio de Janeiro, 2013. 353p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 2. ed. Brasília, Informação Tecnológica, 2009. 628p.

EPSTEIN, E. A anomalia de silício em biologia vegetal. **Proceedings of National Academy of United States of America**, Washington, v. 91, n. 1, p. 11-17, 1994.

FREIRE, J. C.; RIBEIRO, M. A. V.; BAHIA, V. G.; LOPES, A. S.; AQUINO, L. H. Resposta do milho cultivado em casa de vegetação a níveis de água em solos da região de Lavras (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 4, n. 1, p. 5-8, 1980.

GUNES, A.; PILBEAM, D. J.; INAL, A.; COBAN, S. Influence of silicon on sunflower cultivars under drought stress, I: Growth, antioxidant mechanisms, and lipid peroxidation. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 39, n. 13-14, p. 1885-1903, 2008.

JANSEN, S.; BROADLEY, M.; ROBBRECHT, E. Aluminum hyperaccumulation in angiosperms: A review of its phylogenetic significance. **The Botanical Review**, v. 68, n. 2, p. 235-269, 2002.

HODSON, M. J.; SANGSTER, A. G. Aluminium/silicon interactions in conifers. **Journal of Inorganic Biochemistry**, v. 76, n. 2 p. 89-98, 1999.

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. Papel do silício na produção de cana-de-açúcar. **STAB**, Piracicaba, v. 21, n. 1, p. 6-9, 2002.

KORNDÖRFER, G. H.; NOLLA, A. Efeito do silício no crescimento e desenvolvimento de plantas. In: SIMPÓSIO SOBRE SÍLÍCIO NA AGRICULTURA, 2., Lavras, 2003. **Anais**. Lavras, Universidade Federal de Lavras, 2003.

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. **Análise de silício: solo, planta e fertilizantes**. Uberlândia; GPSi/ICIAG/UFU, 2004.

KORNDÖRFER, P. H.; SILVA, G. C.; TEIXEIRA, I. R.; SILVA, A. G.; FREITAS, R. S. Efeito da adubação silicatada sobre gramíneas forrageiras e características químicas do solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 40, n. 2, p. 119-125, 2010.

KORNDÖRFER, G. H.; COELHO, N. M.; SNYDER, G. H.; MIZUTANI, C. T. Avaliação de métodos de extração de silício para solos cultivados com arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, n.1, p.101-106, 1999.

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

LIANG, Y. C.; SUN, W.; ZHU, Y. G.; CHRISTIE, P. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: a review. **Environmental Pollution**, v. 147, p. 422-428, 2007.

LIMA FILHO, O. F.; TSAI, S. M. **Crescimento e produção do trigo e da aveia branca suplementados com silício**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento Embrapa Agropecuária Oeste 41. 2007. 34 p.

MA, J.; TAKAHASHI, E. Effect of silicate on phosphate availability for rice in a P-deficient soil. **Plant and Soil**, v. 133, n. 2, p. 151-155, 1991.

MADEIROS L. B; VIEIRA A. O.; AQUINO B. F. Micronutrientes e silício nas folhas da cana-de-açúcar: escória siderúrgica aplicado no solo. **Engenharia Ambiental**, v. 6, n. 1, p. 27-37, 2009.

MARCUSSI S. A. **Escória de siderurgia como material corretivo e fonte de silício para a cultura do milho no estado de São Paulo**. Dissertação (Graduação), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2010.

MARSCHNER, H. Mineral nutrition of higher plants. 2. ed. London: **Academic**, 1995. 889p.

MATICHENKOV, V. V.; CALVERT, D. V. Silicon as a beneficial element for sugarcane. **Journal of the American Society of Sugarcane Technologists**, Baton Rouge, v. 22, p. 21-30, 2002.

MELO, S. P. **Silício e fósforo para o estabelecimento do capim-Marandu num Latossolo Vermelho-Amarelo**. 2005. 110f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

NEUMAM, D.; NIEDEN, U. Silicon and heavy metal tolerance of higher plants. **Phytochemistry**, v. 56, p. 685–692, 2001.

PEREIRA, H. S.; KORNDORFER, G. H.; VIDAL, A. A.; CAMARGO, M. S. Silicon sources for rice crop. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 61, n. 5, p. 522-528, 2004.

PIMENTEL-GOMES, F.; GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais**: exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos. Piracicaba: FEALQ, 2002, 309p.

PRADO, R. M.; COUTINHO, E. L. M.; ROQUE, C. G.; PEREZ VILLAR, M. L. Avaliação da escória de siderurgia e de calcários como corretivos da acidez do solo no cultivo da alfafa. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** [online]. v.37, n.4, p. 539-546, 2002.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M.; NATALE, W. Efeito residual da escória de siderurgia como corretivo de acidez do solo na soqueira de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 287-296, 2003.

PRATES, F. B. de S.; SAMPAIO, R. A.; SILVA, W. J.; FERNANDES, L.A.; ZUBA JUNIO, G. R.; SATURNINO, H.M. Crescimento e teores de macronutrientes em pinhão manso adubado com lodo de esgoto e silicato de cálcio e magnésio. **Revista Caatinga (Online)**, v. 4, p. 101-112, 2011.

RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A.M.C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas: IAC, 1996. 285p. (IAC. Boletim Técnico, 100).

RAMOS, L. A.; NOLLA, A.; KORNDORFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. Reatividade de corretivos de acidez e condicionadores de solo em colunas de lixiviação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 5, p. 849-857, 2006.

RAMOS, L. A.; KORNDÖRFER, G. H.; NOLLA, A. Acúmulo de silício em plantas de arroz do ecossistema de várzea submetido à aplicação de diferentes fontes. **Bragantia**, Campinas, v. 67, n. 3, p. 751-757, 2008.

ROCHA, L. C. M.; PRADO, R. M.; ALMEIDA, T. B. F. Efeito residual da escória de siderurgia como fonte de silício para cultura do sorgo. **Revista da FZVA**, Uruguaiana, v. 18, n. 2, p. 101-115, 2011.

SAEG. **Sistema para análises estatísticas**. Versão 8.0. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1999.

SOBRAL, M. F.; NASCIMENTO, C. W. A; CUNHA, K. P. V.; FERREIRA, H. A.; SILVA, A. J.; SILVA, F. B. V. Escória de siderurgia e seus efeitos nos teores de nutrientes e metais pesados em cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 8, p. 867-872, 2011.

SOUZA R. F.; FAQUIN V.; CARVALHO R.; TORRES P. R. F.; POZZA A. A. A. Atributos químicos de solos influenciados pela substituição do carbonato por silicato de cálcio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1563-1572, 2008.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 4. ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 848 p.

TOKURA, A. M.; NETO, A. E. F.; CURI, N.; CARNEIRO, L. F.; ALOVIS, A. A. Silício e fósforo em diferentes solos cultivados com arroz de sequeiro. **Acta Scientiarum - Agronomy**, Maringá, v. 29, n. 1, p. 9-16, 2007.

USDA - UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Disponível em: <http://www.fas.usda.gov/psdonline/psdQuery.aspx>. Acesso em: 18 março 2013.

VALE, D. W.; PRADO, R. M.; BASTOS, J. C. H. G.; CAZETTA, J. O. Nitrogênio e escória de siderurgia nos atributos químicos do solo e na nutrição da cana-de-açúcar. **Revista da FZVA**. Uruguaiana, v. 17, n. 2, p. 199-220. 2010.

ZYLBERSZTAJN, D.; NEVES, M. F.; ROSSI, R. M.; FERRAZ, R. M. M.; CASTRO, L. T.; MARINO, M. K.; MIZUMOTO, F. M.; CONEJERO, M. A.; FERREIRA, T. F.; ORATI, R. A. **Estratégias para o trigo no Brasil**. São Paulo: Atlas, 2004, 224 p.

WIESE, H.; NIKOLIC, M.; RÖMHELD, V. Silicon in plant nutrition – effects on zinc, manganese and boron leaf concentrations and compartmentation. In: SATTELMACHER, B.; HORST, W. J. (Ed.). **The apoplast of higher plants: compartment of storage, transport and reactions**. London: Springer, p. 33-47, 2007.

4 ARTIGO 2: USO DE SILICATO DE CÁLCIO E MAGNÉSIO NA NUTRIÇÃO MINERAL DO TRIGO

AUTOR: Marcos Vinícius Mansano Sarto

ORIENTADORA: Maria do Carmo Lana

RESUMO

O trigo é uma planta acumuladora de silício, e o silicato pode influenciar a absorção de nutrientes pela planta e, consequentemente, o balanço nutricional da cultura. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da aplicação de doses de silicato de cálcio e magnésio no aproveitamento de silício e absorção de nutrientes pelo trigo em solos do estado do Paraná. O experimento foi realizado em casa de vegetação em vasos com três tipos de solos. O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso, em esquema fatorial 5 x 3, com quatro repetições. Os tratamentos constituíram da aplicação de 0, 1, 2, 4 e 6 Mg ha⁻¹ de silicato de cálcio e magnésio e três solos: Latossolo Vermelho eutroférico (LVef) e Latossolo Vermelho distroférico (LVd) de textura argilosa e Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico (PVAe) de textura arenosa. Avaliou-se o efeito do silicato de cálcio e magnésio no teor foliar de: Si, N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Zn, Fe e Mn. A aplicação de silicato de cálcio e magnésio aumenta os teores de Si nas folhas e colmos do trigo. A quantidade de Si acumulada pela parte aérea do trigo proveniente do silicato aplicado variou entre 28,2 %, 60,61 % e 74,14 %, respectivamente, para os solos LVef, PVAe e LVd. A adubação silicatada promove acréscimo nos teores de K, Ca e Mg e reduz os teores de Zn e Mn no tecido foliar do trigo. O monitoramento com o DRIS permitiu detectar efeito das doses de silicato de cálcio e magnésio nos solos no equilíbrio de nutrientes do tecido foliar da cultura do trigo.

Palavras-chave: Absorção de silício, DRIS, *Triticum aestivum* L.

USE OF SILICATE CALCIUM AND MAGNESIUM IN MINERAL NUTRITION OF WHEAT

ABSTRACT

The accumulator is wheat plant silicon and silicate may influence the absorption of nutrients by the plant and therefore the nutritional balance of the culture. The objective of this study was to evaluate the effect of increasing doses of calcium silicate in the use of silicon and nutrition of wheat in soils of the state of Paraná. The experiment was conducted in a greenhouse in pots with three soils of Paraná. The experimental design was randomized blocks, factorial 5 x 3, with four replications. Treatments consisted of application of 0, 1, 2, 4 and 6 Mg ha⁻¹ of calcium silicate and three soil: Red Latosol eutrophic (LVef), Red Yellow Argissole eutrophic (PVAe) and Red Latosol Distroferric (LVd). We evaluated the effect of calcium silicate in foliar of: Si, N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Zn, Fe and Mn. The application of calcium silicate increases the Si content of the leaves and stalks of wheat. The amount of Si accumulated by the shoots of wheat from the silicate applied ranged from 28.2%, 60.61% and 74.14%, respectively, for the LVef, PVAe and LVd soils. The application of calcium silicate promotes increase of K, Ca and Mg and reduces the levels of Zn and Mn in the leaves of wheat. Monitoring with DRIS possible to detect the effect of doses of calcium silicate and magnesium in soil nutrient balance in the leaf tissue of wheat.

Key-words: Absorption of silicon, DRIS, *Triticum aestivum* L.

4.1 INTRODUÇÃO

O trigo (*Triticum aestivum* L.) é uma cultura de grande importância no cenário mundial, sendo a principal fonte energética na alimentação da população de muitos países. Com produção mundial na safra 2012/2013 de 655,110 milhões de toneladas, é o segundo grão mais produzido no mundo (USDA, 2013). No Brasil, há interesse socioeconômico de aumentar a produção de trigo, pois além do atendimento à demanda nacional de grãos e não importação do cereal, seu cultivo fornece palhada para as culturas de verão, como soja e milho (MENDONÇA, et al., 2013), importante para o sistema de rotação de culturas implantado na agricultura brasileira.

A família das gramíneas (*Poaceae*), que inclui importantes culturas como trigo, cana-de-açúcar, milho e arroz, apresenta grande capacidade de acumular silício (Si), que varia de acordo com o genótipo considerado (BARBOSA FILHO et al., 2001). Nessas culturas, o teor de Si pode se igualar ou até mesmo exceder os teores de macronutrientes primários (EPSTEIN, 1999; RAFI et al., 1997).

A importância da aplicação de Si, mesmo não sendo considerado elemento essencial, e sim benéfico para as plantas, está relacionada principalmente ao aumento do crescimento e produção vegetal, através de várias ações indiretas como facilitar emissão de folhas mais eretas, diminuição do sombreamento, maior rigidez estrutural dos tecidos, redução do acamamento, proteção contra estresses tanto abióticos como a redução da toxidez de ferro, manganês, alumínio e sódio, quanto estresses bióticos, como aumento na proteção contra patógenos e insetos fitófagos (EPSTEIN, 1994; MARSCHNER, 1995).

A deposição de Si nas folhas das plantas contribui para melhorar a distribuição e prevenir a toxidez por manganês (Mn) nos tecidos, reduzir a perda de água por transpiração, reduzir efeitos adversos causados pelo excesso de nitrogênio (N) (MA & TAKAHASHI, 2002). Os silicatos também promovem a resistência das plantas às condições de estresse salino e/ou hídrico, garantindo a integridade e estabilidade da membrana celular (ZUCARINI, 2008).

Além do fornecimento de nutrientes (Ca, Mg e Si) ao solo, outro aspecto importante das investigações dos efeitos de silicatos sobre as propriedades do solo diz respeito à sua interação com o fósforo e com a adubação NPK. Lima-Filho et al. (1999) afirmaram que o uso de fertilizantes silicatados aumenta a eficiência da adubação NPK. Os silicatos apresentam boas propriedades de adsorção e promovem menor lixiviação de potássio (K^+) e de outros nutrientes móveis no solo.

O Sistema Integrado de Diagnóstico e Recomendação (DRIS), desenvolvido por Beaufils (1973), confronta a relação entre a concentração dos nutrientes da cultura com os obtidos em populações de máximos rendimentos, o que é chamado normas DRIS para estes nutrientes e culturas. Este método avalia mais precisamente as interações nutricionais através do Índice de Balanço Nutricional, informando a ordem de limitação dos nutrientes, tanto por deficiência, quanto por excesso, além da intensidade da exigência (MARTINS et al., 2005).

Süner e Galantini (2012) utilizaram o sistema integrado de diagnóstico e recomendação (DRIS) para monitorar a interferência da adubação fosfatada no balanço nutricional na cultura do trigo em diferentes solos e relatam que a metodologia DRIS foi sensível para detectar o equilíbrio nutricional em relação ao P em plantas de trigo. O método DRIS é um instrumento complementar e útil para avaliar não só a disponibilidade de P, mas o equilíbrio deste nutriente com os outros.

Dessa forma, acredita-se que aplicação do silicato de cálcio e magnésio influencia a absorção de silício e outros nutrientes aumentando a eficiência nutricional das plantas. Entretanto, ainda são escassos os trabalhos na literatura nacional que avaliam o aproveitamento de silício e a absorção de nutrientes pela cultura do trigo em função da adubação silicatada. Diante deste contexto, objetivou-se avaliar os efeitos de doses de silicato de cálcio e magnésio no aproveitamento de silício, absorção de macro e micronutrientes e balanço nutricional na cultura do trigo cultivado em solos do estado do Paraná.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em casa de vegetação, na Estação Experimental de Cultivo Protegido Mário Cesar Lopes, da Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Unioeste, *campus* de Marechal Cândido Rondon – PR, no período de maio a agosto de 2012.

O experimento foi conduzido em vasos de polietileno de 8,5 dm³, contendo 8 dm³ de solo peneirado em malha de 5 mm. Os solos utilizados para o preenchimento dos vasos foram classificados como Latossolo Vermelho eutrófico (LVef) e Latossolo Vermelho distrófico (LVd) de textura argilosa e Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico (PVAe) de textura arenosa, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos - SBCS (EMBRAPA, 2013), sendo retirado da camada arável (0 – 0,2 m), em área de sistema plantio direto, coletado nos municípios de Marechal Cândido Rondon, Cascavel e Goioerê, respectivamente, no estado do Paraná. Os atributos químicos e granulométricos são apresentados na tabela 3.

Tabela 3. Atributos químicos e granulométricos dos solos LVef, PVAe e LVd coletados na camada de 0-0,2 m de profundidade

Solo	pH	V	P	MO	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Al ³⁺	H+Al	SB	CTC
	CaCl ₂	- % -	mg dm ⁻³	g dm ⁻³	-----cmol _c dm ⁻³ -----						
LVef	5,3	60,0	37,1	26,0	4,8	1,8	0,15	0,0	4,6	6,8	11,4
PVAe	6.2	63,0	40,7	22,0	2,5	0,7	0,20	0,0	2,0	3,4	5,4
LVd	4,1	30,1	22,5	39,6	4,0	0,5	0,20	2,4	10,7	4,7	15,4
Micronutrientes											
Solo	Cu		Zn		Fe		Mn	Si	Argila	Silte	Areia
	-----mg dm ⁻³ -----										
			</								

(P, K, Micronutrientes) Extrator Mehlich-1; (Al, Ca, Mg) Extrator KCl 1 mol L⁻¹; (H+Al) pH SMP (7,5); (pH) Extrator CaCl₂ (EMBRAPA, 2009). (Si) Extrator ácido acético (Korndorfer et al., 2004). Análise realizada no Laboratório de Fertilidade do solo e nutrição mineral de Plantas da UNIOESTE. *Campus* Marechal Cândido Rondon, PR.

O delineamento experimental utilizado foi de blocos ao acaso, em esquema fatorial 5 x 3, sendo o primeiro fator cinco doses de silicato de cálcio e magnésio: 0, 1, 2, 4 e 6 Mg ha⁻¹ e o segundo, três solos: LVef, PVAe e LVd, com quatro repetições. Como fonte de silício foi utilizado o silicato de cálcio e magnésio, com nome comercial Agrossilício®, oriundo de uma escória da produção do aço inox (Acesita), tratada pela Recmix do Brasil. Este produto contém: 25 % de cálcio, 6 % de magnésio e 10,5 % de silício e PRNT de 88 %.

Antes da semeadura efetuou-se a aplicação do silicato de cálcio e magnésio em todo o volume do vaso, conforme os tratamentos. Os vasos permaneceram incubados por 15 dias com 60 % do volume total de poros (VTP) ocupado por água (FREIRE et al., 1980). No momento da semeadura, foi realizada a adubação básica de acordo com Raij et al. (1997), aplicando-se 30 kg ha⁻¹ N, 60 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 45 kg ha⁻¹ de K₂O na forma de ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio, respectivamente. Após 30 dias da semeadura, realizou-se a adubação de cobertura, aplicando-se 45 kg ha⁻¹ de N, na forma de ureia.

Foram utilizadas cinco sementes de trigo por vaso, cultivar BRS Pardela, e após nove dias foi realizado desbaste, deixando três plantas por vaso. Os vasos foram irrigados diariamente, procurando manter a umidade do solo próximo a sua capacidade de campo.

Na maturação (115 dias após a emergência), as plantas de todos os tratamentos foram colhidas e separadas em folhas e colmos, secas em estufa de circulação forçada de ar durante três dias a 65 ± 2 ° C, moídas em moinho tipo willye e em seguida realizado a digestão ácida nítrico-perclórica 3:1. As concentrações de K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn, e Zn nas folhas foram determinadas por espectrometria de absorção atômica de chama (EAA), sendo o P

determinado por colorimetria, N por digestão de ácido sulfúrico e destilação por arraste de vapores (EMBRAPA, 2009), e Si com digestão por peróxido de hidrogénio e hidróxido de sódio e posteriormente por colorimetria (KORNDORFER et al., 2004).

O silício absorvido pelas plantas proveniente do fertilizante foi obtido pela diferença entre o silício acumulado na parte aérea e o silício acumulado pela testemunha, e a recuperação média de silício pelas plantas foi obtida pela divisão do silício absorvido proveniente do fertilizante pelo silício aplicado x 100.

O teor dos macro e micronutrientes no tecido foliar, com exceção do Si, foram utilizados para avaliar o balanço nutricional com o sistema integrado de diagnose e recomendação (DRIS) (BEAUFILS, 1973), a partir de Normas DRIS calculadas para população de alta produtividade na cultura de trigo em unidades de manejo em um sistema de agricultura de precisão (RAMPIM, 2014), de forma que o teor médio dos nutrientes da população de alta produtividade é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4. Teor foliar médio dos macro e micronutrientes para as Normas DRIS, originado de população de alta produtividade na cultura de trigo em unidades de manejo em um sistema de agricultura de precisão e valores de referência para a faixa de suficiência dos teores de nutrientes foliares da cultura do trigo, segundo Embrapa (2009) e Raij (2011)

Local	Produtividade U.M.	N	P	S	K	Ca
	--- kg ha ⁻¹ ---	----- g kg ⁻¹ -----				
		Norma DRIS - População alta produtividade ⁽¹⁾				
Rampim (2014)	2965,4	35,3	2,3	3,2	15,3	6,0
Embrapa (2009) e Raij (2011)	Faixa de Suficiência	20-34	2,1-3,3	1,5-3	15-30	2,5-10

Local	Produtividade U.M.	Mg	Cu	Zn	Mn	Fe
	-- kg ha ⁻¹ --	-g kg ⁻¹ -	----- mg kg ⁻¹ -----			
		Norma DRIS - População alta produtividade ⁽¹⁾				
Rampim (2014)	2965,4	1,1	6,4	18,2	129,1	190,4
Embrapa (2009) e Raij (2011)	Faixa de Suficiência	1,5-4,0	5-25	20-70	25-150	10-300

⁽¹⁾ Obtida pela média ±0,5 desvio-padrão da produtividade de 127 unidades de manejo

Os Índices DRIS e índice de balanço nutricional médio (IBNm) foram avaliados pelo potencial de resposta à adubação (PRA) (LANA et al., 2010a), no qual determina classes de resposta à adubação (Tabela 5).

Tabela 5. Potencial de Resposta à Adubação de acordo com índices DRIS e IBNm

Maior Limitação	Índice DRIS	Módulo do Índice DRIS	Potencial de Resposta à adubação ⁽¹⁾
por deficiência			
Sim	< 0	> IBNm	Positiva (P)
Não	< 0	> IBNm	Positiva ou nula (PZ)
Indiferente	≤ 0	≤ IBNm	Nula (Z)
por excesso			
Indiferente	≥ 0	≤ IBNm	Nula (Z)
Não	> 0	> IBNm	Negativa ou nula (NZ)
Sim	> 0	> IBNm	Negativa (N)

⁽¹⁾ Classe 1: Resposta Positiva (P) – tem probabilidade de ocorrer quando o índice DRIS do nutriente mais negativo for maior, em módulo, que o IBNm (Índice de Balanço Nutricional Médio). Classe 2: Resposta Positiva ou Nula (PZ) – tem probabilidade de ocorrer quando o índice DRIS do nutriente for maior em módulo que o IBNm e não for o mais negativo. Classe 3: Resposta Nula (Z) – tem probabilidade de ocorrer quando o índice DRIS do nutriente em módulo for menor ou igual ao IBNm. Classe 4: Resposta Negativa ou Nula (NZ) – tem probabilidade de ocorrer quando o índice DRIS do nutriente for maior em módulo que o IBNm, porém sem ser o índice DRIS de maior valor. Classe 5: Resposta Negativa (N) – tem probabilidade de ocorrer quando o índice DRIS do nutriente for maior que o IBNm e maior que todos os índices DRIS (LANA et al., 2010)

Os dados obtidos foram submetidos à análise de variância pelo teste F, e quando significativo, seguiu-se a aplicação de estudos de regressão polinomial (PIMENTEL-GOMES & GARCIA, 2002), com auxílio do programa estatístico Saeg 8.0 (SAEG, 1999).

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A aplicação de silicato de cálcio e magnésio proporcionou aumento significativo no teor de Si nas folhas do trigo (Figura 3). Verificou-se aumento do teor de silício nas folhas de 27; 21,3 e 22,6 g kg⁻¹ para 36,4; 49 e 33,5 g kg⁻¹ com a aplicação de 6 Mg ha⁻¹, nas plantas cultivadas nos solos LVef, PVAe e LVD, respectivamente (Figura 1A). A maior concentração de Si foi observada nas folhas, em torno de 49 g kg⁻¹, quando comparado com os teores de Si no colmo, em torno de 20 g kg⁻¹ nas plantas cultivadas no solo PVAe.

Corroborando com resultados obtidos por Korndörfer et al. (2010), em estudo para avaliar a aplicação superficial de doses de silicato de cálcio sobre as concentrações de Si na parte aérea de gramíneas forrageiras relataram que as concentrações de Si nas folhas, foram duplicadas, quando comparadas à testemunha, com a dose máxima de Si (2 Mg ha⁻¹). Segundo os mesmos autores o aumento da concentração de Si, na parte aérea, indicaria que a fonte de Si utilizada foi reativa e eficiente na disponibilização de Si ao solo e a planta.

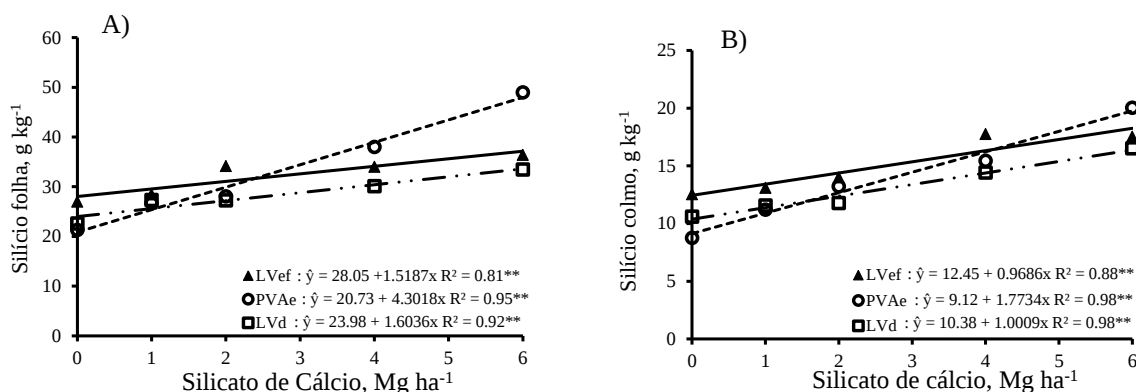


Figura 3. Efeito das doses de silicato de cálcio e magnésio nos teores foliares de silício na folha (A) e no colmo (B) da cultura do trigo, **, * e ns, significativo a 1%, 5% e não significativo, respectivamente, pelo Teste F

Lima Filho e Tsai (2007) também observaram absorção de silício de maneira exponencial em três cultivares de trigo e duas de aveia com o Si adicionado à solução nutritiva até a dose de 100 mg L⁻¹, e concluíram que as duas gramíneas, trigo e aveia, possuem alta capacidade de absorção de silício, indicando a possibilidade de absorverem quantidades mais elevadas, caso houvesse um incremento na disponibilidade do elemento no substrato.

Verificou-se aumento do teor de silício nos colmos de 12,5; 8,8 e 10,6 g kg⁻¹ para 17,5; 20 e 16,5 g kg⁻¹ nas plantas cultivadas nos solos LVef, PVAe e LVd, respectivamente (Figura 3B). A deposição de silício no colmo das plantas pode promover aumento da resistência ao acamamento, visto que essa característica é importante para a colheita mecanizada do trigo. A seleção de variedades com alto potencial para absorção de Si pode minimizar os problemas com tombamento das plantas, reduzindo perdas na colheita mecanizada (MA e TAKAHASHI, 2002).

A recuperação média de silício pelas plantas, nos três solos estudados foi de 28,20; 60,61 e 74,14 %, para os solos LVef, PVAe e LVd, respectivamente (Tabela 6). Em função das doses de silicato, o índice de recuperação de Si variou de 19,68 a 48,38 no LVef, de 47,77 a 78,68 no PVAe e de 42,08 a 128,2 7% no LVd. As plantas cultivadas no solo PVAe e LVd apresentaram maior capacidade de recuperação de Si (índice de recuperação de 60,61 e 74,14), isto é, mais da metade do total de Si absorvido pelas plantas foi proveniente do fertilizante silicatado.

Tabela 6. Conteúdo de Si disponível no solo, Si acumulado na parte aérea do trigo, Si absorvido proveniente do fertilizante e Índice de Recuperação, em função das doses de silicato de cálcio e magnésio, Marechal Cândido Rondon – PR, 2014

Si aplicado	Si "disponível" no solo	Si acumulado nas folhas	Si absorvido proveniente do fertilizante*	Índice de Recuperação**	Média
LVef					
----- g/vaso -----			----- % -----		
0	0,24	1,523	-	-	28,20
0,42	0,28	1,605	0,083	19,68	
0,84	0,33	1,929	0,406	48,38	
1,68	0,42	1,920	0,397	23,62	
2,52	0,53	2,055	0,532	21,12	
PVAe					
0	0,23	1,299	-	-	60,61
0,42	0,24	1,629	0,330	78,68	
0,84	0,27	1,711	0,412	49,05	
1,68	0,32	2,101	0,803	47,77	
2,52	0,39	2,985	1,687	66,93	
LVd					
0	0,20	0,893	-	-	74,14
0,42	0,20	1,432	0,539	128,27	
0,84	0,23	1,498	0,605	72,04	
1,68	0,29	1,803	0,910	54,15	
2,52	0,31	1,953	1,060	42,08	

*Si absorvido proveniente do fertilizante = Si acumulado na parte aérea – Si acumulado pela testemunha;

**Índice de Recuperação (%) = (Si absorvido proveniente do fertilizante / Si aplicado) x 100

Korndörfer et al. (1999) avaliando o efeito do silicato de cálcio como fonte de Si para a cultura do arroz de sequeiro, em quatro solos representativos da região do cerrado, verificaram maior recuperação desse elemento em solos com maiores teores de argila. Os solos argilosos apresentam maior quantidade de filossilicatos (minerais de argila que liberam Si^{4+} e Al^{3+}) e maior quantidade de Si em solução quando comparados aos arenosos, apesar destes serem ricos em quartzo (SiO_2), já que este é um mineral de difícil decomposição química (DEMATTE et al., 2011).

No presente trabalho, foi observado alta recuperação de Si nos solos com maior quantidade de argila como observado para o solo LVef e LVd com 28,2 e 74,14 % do Si absorvido pela planta foi proveniente do fertilizante, entretanto, no solo PVAe de textura arenosa também houve um alto índice de recuperação de silício pelas plantas de 60,61 %. Isso

pode ser explicado devido às condições em que foi conduzido o experimento, onde as plantas receberam água diariamente, proporcionando alta interação das partículas do silicato com a fase sólida do solo, proporcionando alta reatividade do silicato nos solos. Segundo Souza et al., (2010) solos com baixos teores de argila, matéria orgânica e baixa capacidade de retenção de água, apresentam menor interação das partículas do silicato com a fase sólida do solo, explicando, portanto, a baixa reatividade do silicato aplicado.

Analisando os teores dos nutrientes obtidos no tecido foliar ao final do experimento, foi possível monitorar o balanço nutricional com o índice DRIS para cada nutriente em conjunto com o IBNm da cultura do trigo, a partir das normas DRIS proposta por Rampim (2014). Observou-se que houve alteração no balanço nutricional na cultura do trigo em função da adubação silicatada (Tabela 8).

Os nutrientes N, P, S, Cu e Fe não foram influenciados pelos tratamentos (Tabela 7). Estes resultados foram semelhantes aos observados por Prado et al. (2002a), exceto para Ca e Mg, ao estudarem o efeito da aplicação de doses de escória de siderurgia e de calcário na absorção de nutrientes pela cana-de-açúcar, não observaram resposta nos teores de N, P, K, Ca, Mg e S na planta. Os teores de nutrientes nas folhas obtidos neste experimento situam-se na faixa classificada como média e adequada para a cultura, com exceção do N e S que se apresentaram abaixo, e o Fe e Mn acima da faixa adequada para esses nutrientes na cultura trigo de acordo com Embrapa (2009) e Raij (2011).

A faixa adequada para o N fica entre 20-34 g kg⁻¹, e as plantas cultivadas nos solos LVef, PVAe e LVd apresentaram teores médios de 18,18; 18,34 e 23,12 mg kg⁻¹, respectivamente. Para o S a faixa adequada do nutriente fica entre 1,5-3,0 g kg⁻¹, e as plantas apresentaram valores médios de 1,19; 1,11 e 1,15 mg kg⁻¹ nos solos LVef, PVAe e LVd, respectivamente. Assim o N e S apresentaram potencial de resposta à adubação positiva em todos os solos (Tabela 8), indicando provável resposta da cultura ao fornecimento destes nutrientes. Sobretudo, os baixos teores desses nutrientes no tecido foliar podem ter ocorrido pela translocação destes para o grão, uma vez que a coleta das folhas para análise foi realizado no final do ciclo da cultura.

Reis et al. (2005), estudando a absorção e translocação de macronutrientes por três cultivares de arroz, observaram que cerca de 60 % do nitrogênio total da parte aérea foi para os grãos, o que reflete a translocação da maior parte do nitrogênio das folhas para o grão.

Tabela 7. Valores médios de macro e micronutrientes no tecido foliar na cultura do trigo, em função das doses crescentes de silicato de cálcio e magnésio, Marechal Cândido Rondon – PR, 2014

Silicato de cálcio	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Zn	Fe	Mn
Mg ha ⁻¹	-----g kg ⁻¹ -----					-----mg kg ⁻¹ -----				
	LVef									
0	18,68	2,54	22,45	12,36	3,03	1,19	8,9	37,50	609,32	288,05
1	15,41	2,67	23,04	13,79	3,68	1,17	9,4	25,91	708,81	202,27
2	15,30	2,54	23,62	12,96	3,84	1,20	7,2	20,33	787,00	180,54
4	19,70	2,45	22,83	15,63	4,11	1,20	4,2	18,04	688,49	169,54
6	21,80	2,25	21,69	16,10	4,68	1,18	7,2	11,17	663,99	140,15
Regressão	ns	ns	ns	L*	L**	ns	ns	L**	ns	L**
	PVAe									
0	20,22	3,17	23,84	12,84	3,44	1,10	3,0	34,79	515,77	64,80
1	15,94	2,85	25,43	12,98	4,05	1,10	4,1	31,68	476,63	57,79
2	17,15	3,06	24,32	13,05	4,37	1,13	6,6	24,00	423,28	50,05
4	19,93	3,44	26,25	13,92	4,87	1,11	5,3	20,50	435,28	58,75
6	18,44	2,57	23,88	14,51	5,94	1,09	5,6	17,85	482,54	51,46
Regressão	ns	ns	ns	L*	L**	ns	ns	L**	ns	ns
	LVd									
0	22,21	2,61	33,61	8,53	2,57	1,13	6,1	62,12	482,20	591,54
1	22,23	1,97	30,39	10,01	2,84	1,14	7,1	41,74	448,69	486,14
2	20,90	2,00	27,93	11,09	2,78	1,12	5,1	29,26	455,04	437,38
4	27,19	2,30	28,13	11,23	3,26	1,16	7,7	26,40	435,17	273,12
6	23,05	2,03	27,10	13,10	4,25	1,18	4,2	22,07	370,79	227,11
CV (%)	29,7	15,5	8,12	10,3	17,0	3,1	36	30,3	15,2	24,5
Regressão	ns	ns	L**	L**	L**	ns	ns	L**	ns	L**

* e ** significativo em nível de 5% e 1%, respectivamente, pelo teste F; ^{ns} não significativo em nível de 5% pelo teste F.

O teor de K nas folhas apresentou efeito significativo nas plantas cultivadas no solo LVd, ajustando modelo linear decrescente, com o aumento das doses, houve decréscimo na concentração de K nas folhas (Figura 4). O menor teor de K absorvido pelas plantas no solo LVd, influenciou o índice DRIS de K neste solo (Tabela 8), em que na testemunha o PRA era nula (Z) e com o incremento das doses acarretou em resposta negativa ou nula (NZ) nas demais doses, mesmo com o menor teor de K nas folhas o índice DRIS para esse nutriente foi alto, tornando o nutriente limitante por excesso, isso ocorreu provavelmente pelos menores valores do IBNm, que diminuiu comparado com a testemunha.

Tabela 8. Índice DRIS da cultura do trigo em função das doses de silicato de cálcio, Marechal Cândido Rondon – PR, 2014

Silicato de cálcio	Índice DRIS										
	N	P	K	Ca	Mg	S	Mn	Zn	Fe	Cu	IBNm
Mg ha ⁻¹	----- LVef -----										
0	-133,04	-15,57	26,72	22,78	45,61	-133,56	40,27	56,3	85,38	5,11	56
1	-172,24	0,95	38,91	32,23	68,91	-133,33	14,54	21,85	118,56	9,63	61
2	-188,12	-13,63	39,64	28,1	73,9	-138,47	-4,95	72,41	137,07	-5,94	70
4	-107,91	-12,04	36,32	44,61	86,41	-119,13	1,8	-13,8	118,27	-34,52	57
6	-86,61	-21,1	32,32	46,86	104,07	-121,27	-0,03	-66,16	115,47	-3,56	60
----- PVAe -----											
0	-87,68	25,92	45,75	39,65	79,27	-124,23	-77,46	60,31	91,52	-53,06	68
1	-135,24	19,9	67,65	42,29	104,35	-122,08	-91,21	56,2	88,2	-30,07	76
2	-111,37	29,99	57,51	41,09	112,77	-114,28	-109,34	23,25	71,87	-1,48	67
4	-84,51	35,66	56,86	37,35	120,71	-123,79	-93,14	0,74	66,9	-16,78	64
6	-105,9	4,02	57,13	46,57	170,92	-126,83	-115,11	-8,21	91,05	-13,62	74
----- LVd -----											
0	-132,97	-43,36	68,47	-1,61	29,54	-180,69	117,22	115,78	49,46	-21,86	76
1	-96,31	-69,72	66,51	10,45	39,81	-150,91	94,49	66,31	47,43	-8,06	65
2	-155,99	-43,41	78,03	23,21	48,83	-133,91	98,67	41,14	63,9	-20,47	71
4	-55,53	-32,33	51,55	17,01	49,83	-124,84	34,26	16,7	44,47	-1,12	43
6	-100,67	-35,4	69,02	32,96	92,41	-110,81	29,65	10,83	42,07	-30,06	55

Potencial de resposta à adubação:

 Positiva (P)	 Positiva ou nula (PZ)	 Nula (Z)	 Negativa ou nula (NZ)	 Negativa (N)
--	---	--	---	--

Segundo Malavolta et al. (1997), os cátions K⁺ e Ca²⁺ competem pelo mesmo sítio de absorção nas raízes das plantas. Assim, a redução no teor de K, na parte aérea do trigo cultivado no solo LVd, pode ter ocorrido pela competição com o cálcio ligado ao silicato (CaSiO₃) aplicado ao solo na forma de silicato de cálcio e magnésio.

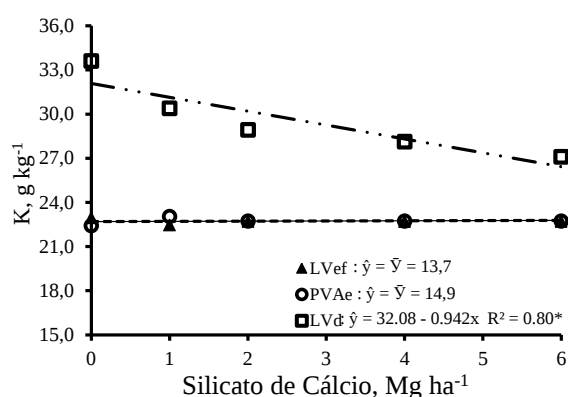


Figura 4. Efeito das doses de silicato de cálcio e magnésio sobre os teores foliares de K na cultura do trigo, **, * e ns, significativo a 1%, 5% e não significativo, respectivamente, pelo Teste F

As concentrações de Ca e Mg também foram influenciadas pelas doses de silicato nos três solos estudados, apresentando incremento linear (Figura 5). O índice DRIS para o Ca indicou PRA nula (N) para os três solos avaliados, indicando equilíbrio nutricional para este nutriente (Tabela 8). Já para o Mg o índice DRIS apresentou PRA nula na testemunha e com o aumento da adubação silicatada esse índice PRA foi negativa (N), indicando excesso deste nutriente absorvido pela planta, provavelmente pelos altos teores de Mg nos solos LVef e PV Ae (Tabela 1), e pelo incremento deste nutriente fornecido pelo adubo silicatado.

Prado et al. (2003) ao avaliarem o efeito residual de uma escória siderúrgica em um Latossolo Vermelho Amarelo cultivado com cana-de-açúcar, obteve incremento na concentração Ca e Mg na profundidade de 0-0,2 m. O acréscimo nos teores de Ca e Mg podem ser resultantes da composição química do material utilizado, oriundo do processo de fundição do aço, onde o Ca e o Mg oriundo silicato, participam das reações (FIRME, 1986). Essa maior disponibilidade destes nutrientes para as plantas provenientes do silicato de cálcio pode explicar o aumento da concentração de cálcio e magnésio na folha do trigo.

Prado et al. (2002b) também observaram incremento na absorção de Ca e Mg na parte aérea da alface em função da aplicação de escória de siderurgia e dos calcários magnesiano e dolomítico em um Latossolo Vermelho Distrófico, relatando que os corretivos são fonte de Ca e Mg, os quais, elevaram as concentrações no solo com reflexos nos teores dos referidos nutrientes na parte aérea da planta.

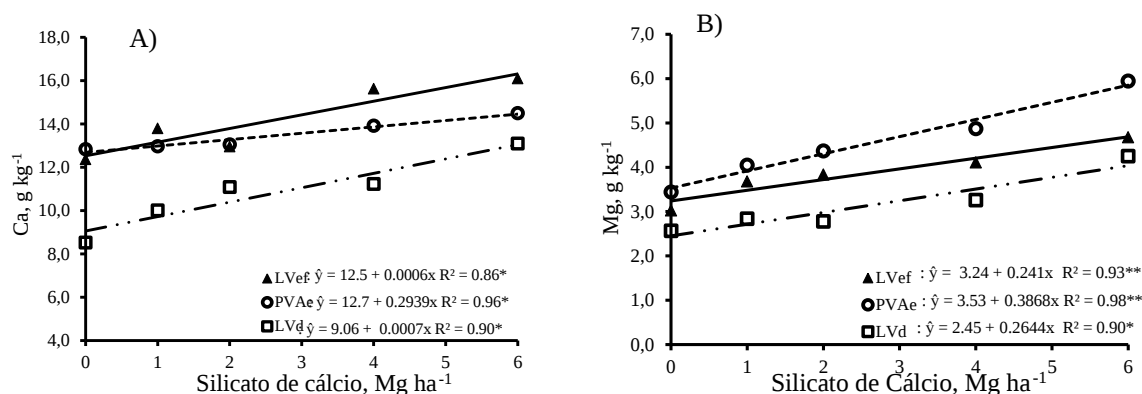


Figura 5. Efeito das doses de silicato de cálcio e magnésio sobre os teores foliares de Ca (A) e Mg (B) na cultura do trigo, **, * e ns, significativo a 1%, 5% e não significativo, respectivamente, pelo Teste F

Em relação aos teores de Cu, Zn, Fe e Mn do tecido foliar, houve diferença significativa para os teores de Zn e Mn. Os valores de Zn e Mn diminuíram com o aumento das doses (Figura 6). Estes resultados confirmam os obtidos por Morais et al. (2009) exceto para o Mn, ao avaliarem o efeito do silicato de cálcio e do sulfato de cobre no teor nutricional do feijoeiro, observaram que as doses de silicato de cálcio não apresentaram efeito significativo na concentração de Cu, Fe e Mn na parte aérea, entretanto, observaram redução dos teores de Zn.

Os teores de Fe e Mn foram superiores à faixa adequada para a cultura do trigo (EMBRAPA, 2009; RAIJ, 2011). A faixa adequada para o Fe fica entre 10-300 mg kg⁻¹, as plantas cultivadas nos solos LVef, PVAe e LVD apresentaram teores de 691,5; 466,7 e 438,37 mg kg⁻¹, respectivamente. O índice DRIS mostrou PRA negativa (N) e negativa ou nula (NZ) para os teores de Fe nas plantas cultivadas nos solos LVef e PVAe, indicando excesso desse nutriente na planta (Tabela 8).

A faixa adequada para o Mn fica entre 25-150 mg kg⁻¹ (EMBRAPA, 2009; RAIJ, 2011), as plantas apresentaram valores superiores, de 196,11 e 403,06 mg kg⁻¹ nos solos LVef e LVD, respectivamente. No monitoramento com o DRIS o Mn no solo LVD (Tabela 8), apresentou PRA negativa na testemunha, indicando excesso do nutriente nas plantas, e com o aumento das doses o PRA se apresentou nulo (N) (Tabela 6), atingindo a faixa classificada como adequada com adubação silicatada.

O silicato de cálcio e magnésio proporcionou maior equilíbrio na absorção de Mn pelo trigo, diminuindo a quantidade excessiva absorvida (Tabela 7 e 8). Segundo Pozza et al. (2009), quando plantas de arroz são adubadas com Si, ocorre aumento da oxidação do Fe²⁺ e

do Mn^{2+} na superfície das raízes e, como resultado, esses nutrientes precipitam, não sendo absorvidos pela planta. A deposição de Si nas folhas das plantas contribui para melhorar a distribuição e prevenir a toxidez por Mn nos tecidos (MA e TAKAHASHI, 2002).

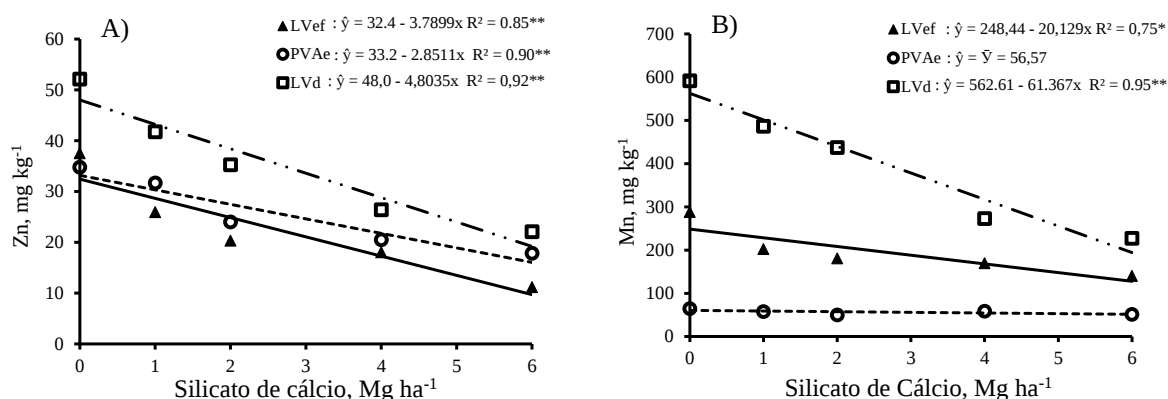


Figura 6. Efeito das doses de silicato de cálcio e magnésio sobre os teores foliares de Zn (A) e Mn (B) na cultura do trigo, **, * e ns, significativo a 1%, 5% e não significativo, respectivamente, pelo Teste F

Houve redução do teor foliar de Zn com a elevação das doses de silicato de cálcio para os três solos estudados, reduzindo de 37,5; 34,8 e 62,12 para 11,17; 17,85 e 22,07 com a dose de 6 Mg ha⁻¹ nos solos LVef, PVAe e LVd, respectivamente (Figura 6 B). No solo LVef o índice DRIS para o Zn foi nulo (N) para todas as doses de silicato de cálcio, indicando balanço nutricional do nutriente, no solo PVAe o potencial de resposta à adubação foi positiva ou nula para todos os tratamentos indicando provável deficiência deste nutriente, e para o solo LVd no tratamento testemunha e 1 Mg ha⁻¹ de silicato de cálcio, o potencial de resposta à adubação é negativa, o que indica excesso deste nutriente nas plantas e com as doses de silicato de cálcio e magnésio o potencial foi para nulo (N), apresentando equilíbrio nutricional de Zn neste solo (Tabela 8).

Essa redução no teor foliar de Zn, pode ter ocorrido devido a esse nutriente ser reduzido na presença do cálcio fornecido pelo silicato, por inibição competitiva pela absorção de nutrientes (MALAVOLTA et al., 1997). Lima Filho e Tsai, (2007) também observaram diminuição nos teores de Mn e Zn no trigo com o suprimento de Si em solução nutritiva, isso foi atribuído ao fato de que o acúmulo de matéria seca aumentou mais rapidamente que a taxa de acumulação dos nutrientes, resultando assim em um efeito de diluição para a maioria dos nutrientes estudados.

Zanão Júnior et al. (2010) ao estudarem o arroz cultivado em solução nutritiva com doses de Mn e Si, observaram aumento na produção de matéria seca de raízes, bainhas e

folhas com o Si, e diminuição nos teores foliares de Mn, mostrando menor translocação de Mn para as folhas com a adição de Si à solução, o que contribuiu para diminuir os efeitos negativos do excesso de Mn nas plantas, podendo ser uma alternativa para minimizar os efeitos negativos do Mn.

Os menores teores de Zn e Mn nas plantas em função do uso do silicato de cálcio também podem ter ocorrido pelo efeito da aplicação do silicato de cálcio no aumento do pH no solo, induzindo menor disponibilidade de micronutriente metálico no solo (PRADO et al., 2001). Horst e Marschner (1978) obtiveram teores de manganês influenciados pelo silício e verificaram redução do teor de manganês com a suplementação de $0,75 \text{ mg kg}^{-1}$ de silício solúvel (Aerosil) em plantas de feijão.

4.4 CONCLUSÕES

A aplicação de silicato de cálcio e magnésio aumenta os teores de Si nas folhas e colmos do trigo, com recuperação do silício aplicado foi de 28,2 %, 60,61 % e 74,14 %, para os solos LVef, PVAe e LVd, respectivamente.

O silicato de cálcio e magnésio diminui a absorção de K no solo LVd e Zn e Mn nos solos LVef, PVAe e LVd, e aumentou os teores foliares de Ca e Mg nos três solos.

O monitoramento com o DRIS permitiu detectar efeito das doses de silicato de cálcio e magnésio nos solos no equilíbrio nutricional da cultura do trigo.

AGRADECIMENTOS

A CAPES e ao CNPq pela concessão de auxílio financeiro para realização da pesquisa.

REFERÊNCIAS

BARBOSA FILHO, M. P.; SNYDER, G. H.; FAGERIA, N. K; DATNOFF, L. E. & SILVA, O. F. Silicato de cálcio como fonte de silício para o arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 25, p. 325-30, 2001.

BEAUFILS, E. R. **Diagnostics and Recommendation Integrated System (DRIS)**. Pietermaritzburg, University Natal, 1973. 130p. (Soil Science Bulltein, 1)

DEMATTE, J. L. I.; PAGIARO, C. M.; BELTRAME, J. A.; RIBEIRO, S. S. Uso de silicatos em cana-de-açúcar. **Informações Agronômicas**, n.133, p.7-12, 2011.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Manual de Análises Químicas de Solos, Plantas e Fertilizantes. 2.ed. Brasília, Informação Tecnológica, 2009. 628p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3.ed. Rio de Janeiro, 2013. 353p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2.ed. Brasília, Informação Tecnológica, 2009. 628p.

EPSTEIN, E. A anomalia de silício em biologia vegetal. **Proceedings of National Academy of United States of America**, Washington, v. 91, n. 1, p. 11-17, 1994.

EPSTEIN, E. Silicon. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 50, p. 641-664, 1999.

FIRME, D. J. **Enriquecimento e fusão de escória de siderurgia como fosfato natural**. 1986. 55 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1986.

FREIRE, J. C.; RIBEIRO, M. A. V.; BAHIA, V. G.; LOPES, A. S.; AQUINO, L. H. Resposta do milho cultivado em casa de vegetação a níveis de água em solos da região de Lavras (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 4, n. 1, p. 5-8, 1980.

HORST W. J. & MARSCHNER, H. Effect of silicon on manganese tolerance of bean plants (*Phaseolus vulgaris* L.). **Plant and Soil**, v. 50, n. 2, p. 287-303, 1978.

KORNDÖRFER, G.H.; ARANTES, V.A.; CORRÊA, G.F.; SNYDER, G.H. Efeito da aplicação de silicato de cálcio em solos cultivados com arroz de sequeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.623-629, 1999.

KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. **Análise de silício: solo, planta e fertilizantes**. Uberlândia; GPSi/ICIAG/UFU, 2004.

KORNDÖRFER, P. H.; SILVA, G. C.; TEIXEIRA, I. R.; SILVA, A. G.; FREITAS, R. S. Efeito da adubação silicatada sobre gramíneas forrageiras e características químicas do solo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 40, n. 2, p. 119-125, 2010.

LANA, R. M. Q.; OLIVEIRA, S. A.; LANA, A. M. Q. & FARIA, M. V. Levantamento do estado nutricional de plantas de *Coffea arabica* L. pelo DRIS, na região do Alto Paranaíba – Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 4, p. 1147-1156, 2010.

LIMA FILHO, O. F.; LIMA, M. T. G.; TSAI, S. M. O silício na agricultura. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 87, p. 1-7, 1999.

LIMA FILHO, O. F. de. TSAI, S. M. **Crescimento e produção do trigo e da aveia branca suplementados com silício**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento Embrapa Agropecuária Oeste 41. 2007. 34 p.

MA, J. F.; TAKAHASHI, E. **Soil, fertilizer and plant silicon research in Japan**. New York: Elsevier Science, 2002. 274 p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: POTAFOS, 319p. 1997.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2. ed. London: Academic, 1995. 889p.

MARTINS, L. A.; FIORETTO, R. A.; FONSECA, I. C. B. & CARNEIRO, C. E. A. Monitoramento nutricional do trigo através do índice de balanço nutricional – DRIS. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 26, n. 4, p. 455-462, 2005

MENDONÇA, A. O.; TAVARES, L. C.; BRUNES, A. P.; MONZÓN, D. L. R.; VILLELA, F. A. Acúmulo de silício e compostos fenólicos na parte aérea de plantas de trigo após a adubação silicatada. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 29, n. 5, p. 1154-1162, 2013.

MORAES, S. R. G.; POZZA, E. A.; POZZA, A. A. A.; CARVALHO, J. G.; SOUZA, P. E. Nutrição do feijoeiro e intensidade da antracnose em função da aplicação de silício e cobre. **Acta Scientiarum: Agronomy**, Maringá, v. 31, n. 2, p. 283-291, 2009.

PIMENTEL-GOMES, F.; GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais: exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos**. Piracicaba: FEALQ, 2002, 309p.

PRADO, R. de M.; FERNANDES, F. M.; NATALE, W. Calcário e escória de siderurgia avaliados por análise foliar, acúmulo, e exportação de macronutrientes em cana-de-açúcar. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, n. 1, p. 129-135, 2002a.

PRADO, R. M.; COUTINHO, E. L. M.; ROQUE, C. G.; VILLAR, M. L. P. Avaliação da escória de siderurgia e de calcários como corretivos da acidez do solo no cultivo da alface. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 4, p. 539-546, 2002b.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M.; NATALE, W. **Uso agrícola da escória de siderurgia no Brasil: estudos na cultura da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: FUNEP, 2001. 67p.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M.; NATALE, W. Efeito residual da escória de siderurgia como corretivo de acidez do solo na soqueira de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n.2, p. 287-296, 2003.

POZZA, A. A. A.; CARVALHO, J. G. GUIMARES, P. T. G.; FIGUEIREDO, F. C.; ARAÚJO, A. R. Suprimento do silicato de cálcio e a eficiência nutricional de variedades de cafeeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 6, 2009.

RAFI, M. M.; EPSTEIN, E.; FALK, R. H. Silicon deprivation causes physical abnormalities in wheat (*Triticum aestivum* L.). **Journal of Plant Physiology**, Stuttgart, v. 151, p. 497-501, 1997.

RAIJ, B. Van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A.M.C. (Ed.) **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas: IAC, 1997. 285p. (Boletim Técnico, 100)

RAIJ, B. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: Internacional Plant Nutrition Institute, 2011. 420p.

RAMPIM, L. **Avaliação da fertilidade do solo e balanço nutricional das culturas de soja e trigo em áreas com agricultura de precisão na região oeste do Paraná**. Tese de Doutorado. Unioeste. 2014. 219p.

REIS, M. S.; SOARES, A. A.; SOARES, P. C.; CORNÉLIO, V. M. O. Absorção de N, P, K, Ca, Mg e S pelo arroz irrigado influenciada pela adubação nitrogenada. **Ciências Agrotécnicas**, Lavras, v. 29, n. 4, p. 707-713, 2005.

SAEG. Sistema para análises estatísticas. Versão 8.0. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1999.

SOUSA, R. T. X.; KORNDÖRFER, G. H.; WANGEN, D. R. B. Atributos químicos de solos influenciados pela substituição do carbonato por silicato de cálcio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.4, p.1563-1572, 2008.

SUNER, L. G; GALANTINI, J. A. Fertilización fosforada en suelos cultivados con trigo de la región Sudoeste Pampeana. **Ciencia del Suelo**, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, v. 30, n. 1, jul. 2012.

USDA - **UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE**. Disponível em: <<http://www.fas.usda.gov/psdonline/psdQuery.aspx>>. Acesso em: 04 fevereiro 2013.

ZANÃO JÚNIOR, L. A; FONTES, R. L. F; NEVES, J. C. L; KORNDÖRFER, G. H; ÁVILA V. T. Rice grown in nutrient solution with doses of manganese and silicon. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.1629-1639, 2010.

ZUCARINI, P. Effects of silicon on photosynthesis, Water relations and nutrient uptake of *Phaseolus vulgaris* under NaCl stress. **Biologia Plantarum**, Praha, v. 52, p.157-160, 2008.