



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
INSTITUTO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA

**SILÍCIO NA PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR**

GUSTAVO ALVES SANTOS

GUSTAVO ALVES SANTOS

**SILÍCIO NA PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Tese apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia – Doutorado, área de concentração em Fitotecnia, para obtenção do título de “Doutor”.

Orientador

Prof. Dr. Gaspar Henrique Korndörfer

Co-orientador

Prof. Dr. Hamilton Seron Pereira

Prof. Dra. Brenda Servaz Tubaña

UBERLÂNDIA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2017

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

---

S237s Santos, Gustavo Alves, 1988  
2017 Silício na produção de cana-de-açúcar / Gustavo Alves Santos. -  
2017.  
111 p. : il.

Orientador: Gaspar Henrique Korndörfer.

Coorientador: Hamilton Seron Pereira.

Coorientadora: Brenda Servaz Tubaña.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Agronomia.

Inclui bibliografia.

1. Agronomia - Teses. 2. Cana-de-açúcar - Teses. 3. Silício na agricultura - Teses. 4. Adubos e fertilizantes - Teses. I. Korndörfer, Gaspar Henrique, 1953-. II. Pereira, Hamilton Seron. III. Servaz Tubaña, Brenda. IV. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. V. Título.

---

CDU: 631

GUSTAVO ALVES SANTOS

**SILÍCIO NA PRODUÇÃO DE CANA-DE-AÇÚCAR**

Tese apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia – Doutorado, área de concentração em Fitotecnia, para obtenção do título de “Doutor”.

APROVADA em 10 de Março de 2017.

Prof <sup>a</sup> . Dr. Hamilton Seron Pereira (co-orientador)	UFU
Prof. Dr. Luiz Roberto Guimarães Guilherme	UFLA
Dr <sup>a</sup> . Raffaella Rosetto	APTA
Dr <sup>a</sup> . Mônica Sartori de Camargo	APTA

Prof. Dr. Gaspar Henrique Korndörfer  
ICIAG-UFU  
(Orientador)

UBERLÂNDIA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2017

## DEDICATÓRIA

À minha mãe Sebastiana que, certamente, assim como eu, muito se alegra por essa conquista; à minha esposa Gabriela, companheira e apoiadora incondicional; ao meu irmão, amigo, incentivador e auxiliador de todas as horas, Murilo; ao meu pai e apoiador, Sílvio,  
Dedico.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, à Deus, por tudo, em especial pelas bênçãos diárias desde a escolha pelo curso de Agronomia, 13 anos atrás e por ter me permitido chegar até aqui;

A minha família, pelo suporte e motivação dispensados constantemente;

Em especial ao meu orientador, professor Dr. Gaspar Henrique Korndörfer, pelos tantos ensinamentos e oportunidades, pela orientação, confiança e companheirismos nesses 13 anos de parceria;

Ao professor Dr. Hamilton Seron Pereira, meu co-orientador, professor, colega e amigo, pela oportunidade de conduzir a pesquisa, pelas incontáveis ajudas, experiências compartilhadas e aconselhamentos;

A professora Dra. Brenda Tubaña, pela oportunidade dada e por tudo o que isso representa, também pelo apoio, ensino e exemplo de pessoa;

Ao professor Dr. Luiz Roberto Guimarães Guilherme “Bebeto”, a Dra. Raffaella Rossetto e a Dra. Mônica Sartori de Camargo por terem aceitado o convite para participar da banca examinadora e pelas contribuições;

Aos colegas Robson, Lucélia, Bruno Nicchio, Thiago Prudente, Ana Carolina Marostica, Luiz Felipe, Luiz Henrique, Rafael Gómez, Bruno Guimarães, Artur Maurício e a todos os membros do Grupo de Pesquisa Silício na Agricultura (GPSi), pela ajuda sempre que necessária, pela amizade e pelos momentos de descontração;

Aos colegas Murilo Martins, Daniel Forestieri, Flávia Agostinho, Wooiklee Paye, Samuel Kwakye e a todos os membros do LSU Soil Fertility Group, por terem me acolhido tão bem, pelas trocas de experiências e amizades feitas;

Aos professores e colegas da pós-graduação, pelo convívio diário prazeroso e pelo conhecimento compartilhado;

As equipes da Companhia Mineira de Açúcar e Alcool (CMAA) – Usina Vale do Tijuco e LSU Sugar Research Station, pelo apoio na instalação, condução e avaliação dos experimentos;

Aos funcionários e técnicos do Laboratório de Análise de Solo (LABAS), pelo suporte dado;

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos;

Muito Obrigado!

## EPÍGRAFE

Pois o Senhor é quem dá sabedoria;  
de sua boca procedem o conhecimento e o discernimento.  
*Provérbios 2:6*

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	8
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	10
2.1 A cultura da cana-de-açúcar ( <i>Saccharum officinarum</i> L.).....	10
2.2 Silício.....	11
2.2.1 Silício no solo.....	11
2.2.2 Silício na cultura da cana-de-açúcar.....	17
2.2.3. Fontes de silício.....	19
REFERÊNCIAS.....	23
CAPÍTULO 1 – Eficiência da fluorita com óxido de silício na produção de cana-de-açúcar .....	32
RESUMO.....	32
ABSTRACT.....	33
1 INTRODUÇÃO.....	34
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	37
2.1. Caracterização das fontes de silício.....	37
2.2. Delineamento experimental.....	38
2.3 Instalação.....	38
2.4 Condução.....	39
2.5 Avaliações.....	40
2.6 Análises estatísticas.....	41
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
3.1 Teores de Si, pH, Ca, Mg e P no solo.....	42
3.2 Concentração foliar de Si, Ca, Mg e P.....	56
3.3 Produção de colmos (TCH) e de açúcar (TAH).....	63
3.5 Produção acumulada.....	67
4 CONCLUSÕES.....	70
REFERÊNCIAS.....	71
ANEXOS.....	78
Anexo A – Caracterização química dos fertilizantes utilizados no estudo.....	78
Anexo B – Caracterização química e física do solo da área de instalação do experimento.....	79

CAPÍTULO 2 - Silicato de cálcio aplicado em diferentes doses e épocas na produção de cana-de-açúcar no estado da Louisiana (EUA) .....	80
RESUMO .....	80
ABSTRACT .....	81
1 INTRODUÇÃO.....	82
2 MATERIAL E MÉTODOS.....	85
2.1 Caracterização da fonte de silício.....	85
2.2. Delineamento experimental.....	85
2.3 Instalação.....	85
2.4 Condução.....	87
2.5 Avaliações.....	87
2.6 Análises estatísticas.....	89
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	90
3.1 Concentração de Si no colmo e Si acumulado no colmo .....	90
3.2 pH do solo e teor de nutrientes.....	92
3.3 Produção de colmos e de açúcar.....	97
3.4 ATR (Açúcar teoricamente recuperável).....	100
3.5 Resultados acumulados .....	101
4 CONCLUSÕES.....	103
REFERÊNCIAS .....	104
ANEXOS.....	109
Anexo A – Caracterização da fonte de Si utilizada.....	109
Anexo B - Caracterização do solo da área de instalação do experimento.....	110
Anexo C – Caracterização da variedade plantada no experimento.....	111

## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, tendo essa cultura grande importância para o agronegócio brasileiro. O aumento da demanda mundial por etanol oriundo de fontes renováveis e a conscientização das pessoas em relação ao meio ambiente sobre os efeitos indesejáveis da utilização de combustíveis fósseis, aliados às grandes áreas cultiváveis e condições edafoclimáticas favoráveis à cana-de-açúcar, tornam o Brasil um país promissor para a produção dessa *commodity*. Nesse contexto, a cana-de-açúcar é considerada uma das grandes alternativas para o setor de biocombustíveis devido ao grande potencial na produção de etanol e aos respectivos subprodutos. Além da produção de etanol e açúcar, as unidades de produção têm buscado operar com maior eficiência, inclusive com geração de energia elétrica, auxiliando na redução dos custos e contribuindo para a sustentabilidade da atividade (CONAB, 2016).

A cana-de-açúcar é uma das principais culturas do mundo, fonte de açúcar, álcool e energia e cultivada em mais de 100 países, mas com cerca de 80% da produção concentrada em dez deles: Brasil, Índia, China, Tailândia, Paquistão, México, Colômbia, Indonésia, Filipinas e Estados Unidos (FAO, 2008; WORDATLAS, 2016).

Apesar da importância econômica da cultura, sua área de ocupação representa muito pouco comparada àquela dedicada à produção de grãos (IBGE, 2008), sendo a área de grãos na safra 16/17, no Brasil igual a 59,1 milhões de hectares (CONAB, 2017) e a de cana igual a 9,1 milhões de hectares (CONAB, 2016).

Uma das maneiras de se alcançar a sustentabilidade no sistema produtivo de cana-de-açúcar é torna-la tolerante à possíveis estresses bióticos ou abióticos que possam lhe afetar e reduzir, muitas vezes em grande escala, a produtividade e a qualidade da produção. Para isso, umas das ferramentas disponíveis é a adubação da cultura com Si, um elemento presente em grande quantidade na Litosfera e absorvido em grande escala pela cultura da cana. A adubação silicatada pode ser vista como parte da estratégia do chamado manejo integrado de doenças e pragas, o qual se vale não só de métodos químicos de controle desses agentes. Além disso, efeitos negativos de eventuais estresses térmicos ou hídricos podem ser atenuados pela boa concentração ou acúmulo de Si nas diversas partes da planta e também melhor aproveitamento de recursos como água e luz podem ocorrer em resposta ao uso de Si. Outra vantagem do uso de Si na agricultura é o fato de a maioria das fontes desse elemento ser, reconhecidamente, subproduto da atividade industrial e conseqüentemente, passivos ambientais, os quais, em caso de

destinação incorreta ou não utilização, podem configurar sérios problemas ambientais às indústrias dos mais variados setores de produção.

Apesar dessas informações, até o presente momento os assuntos relacionados ao uso de Si na nutrição de plantas e seus efeitos sobre a produção agrícola permanecem em parte inexplorados (MEENA et al., 2014). A identificação e implementação de estratégias para o manejo desse elemento nos programas de adubação podem desempenhar papel importante nos rendimentos da produção agrícola, mas para isso são necessárias pesquisas aplicadas que quantifiquem os teores de Si em solos e fertilizantes e assim permitam a recomendação de doses e épocas adequadas, o que é essencial para que a aplicação de Si seja uma das vias disponíveis para melhorar o desenvolvimento e a produtividade das culturas. (MEENA et al., 2014).

Diante do exposto, os objetivos do presente trabalho são abranger os aspectos do desenvolvimento e produção da cultura da cana-de-açúcar quanto à adubação com Si e seus efeitos no solo; estudar a eficiência de um subproduto da indústria de fertilizantes como fonte de Si para a agricultura e seu potencial no fornecimento de nutrientes para a cultura da cana-de-açúcar no cerrado brasileiro; e avaliar o manejo adequado de aplicação de Si (isto é, época de aplicação e dose adequada) para o sistema de produção de cana-de-açúcar no Estado da Louisiana (EUA).

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 A cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.)

A cana-de-açúcar é uma das principais culturas agrícolas brasileiras, sendo o Brasil o maior produtor mundial dessa cultura de grande importância para o agronegócio brasileiro por servir como matéria-prima de grande flexibilidade (UNICA, 2006; CONAB, 2016). Em termos de produção, a estimativa para a cultura da cana-de-açúcar, na safra 2016/17, é de aproximadamente 695 milhões de toneladas (t), o que representa um crescimento de 4,4% em relação à safra anterior. Já a área a ser colhida está estimada em 9,1 milhões hectares, indicando aumento de 5,3%, se comparada com a safra 2015/16. A produtividade estimada para a safra que está por vir é de 76 t ha<sup>-1</sup>, o que reflete uma redução de 0,9% como consequência da queda de produtividade no Centro-Sul, onde as lavouras da safra anterior tiveram, na sua maioria, produtividades recordes (CONAB, 2016).

Além de ser considerada fonte de alimentação animal por produzir açúcar, produz álcool de vários tipos, a exemplo do etanol, usado como biocombustível, bebidas como cachaça, licor, rum e gera eletricidade a partir do bagaço. Da cana-de-açúcar se aproveita absolutamente tudo: bagaço, méis, torta e resíduos de colheita (UNIÃO DA AGROINDUSTRIA CANAVIEIRA DE SÃO PAULO, 2006). A cana-de-açúcar é considerada uma das grandes alternativas para o setor de biocombustíveis devido ao grande potencial na produção de etanol e aos respectivos subprodutos. Além da produção de etanol e açúcar, as unidades de produção têm buscado operar com maior eficiência, inclusive com geração de energia elétrica, auxiliando na redução dos custos e contribuindo para a sustentabilidade da atividade (CONAB, 2016).

O ambiente de produção de cana-de-açúcar é definido em função das condições físicas, hídricas, morfológicas, químicas e mineralógicas dos solos sob manejo adequado da camada arável em relação ao preparo, calagem, adubação, adição de vinhaça, torta de filtro e palha, do controle de ervas daninhas e pragas, associadas com as condições de subsuperfície dos solos e ao clima regional (precipitação pluviométrica, temperatura, radiação solar, evaporação) e ainda, com o grau de declividade onde os solos ocorrem na paisagem (DINARDO-MIRANDA et al., 2008).

A extração de nutrientes que a cana-de-açúcar necessita para uma produção de 100 t ha<sup>-1</sup> de colmos é da ordem de 143 kg de N, 43 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 210 kg K<sub>2</sub>O, 87 kg Ca, 49 g de Mg e 44 kg S. No caso dos micronutrientes são necessários 7,3 g de Fe, 2,5 g de Mn,

592 g de zinco Zn, 339 g de Cu e 235 g de B (ORLANDO FILHO, 1993). As quantidades de nutrientes extraídas do solo pela cana-de-açúcar variam de acordo com os métodos de cultivo, variedade, tipo de solo e disponibilidade de nutrientes no solo, procurando encontrar faixas de teores de nutrientes adequados para a cultura. Na maioria das pesquisas as extrações dos nutrientes encontraram-se na ordem decrescente para macronutrientes de K>N>Ca>Mg>S>P (MAEDA, 2009).

A adubação é uma prática que interfere de diversas maneiras na qualidade da cana-de-açúcar (KORNDÖRFER, 1994). A adubação nitrogenada está associada a um maior crescimento vegetativo e, portanto, maior umidade na cana, além disso, pode diminuir o teor de sacarose dos colmos. Já a adubação fosfatada está relacionada com o aumento da produção e também contribui de maneira significativa para aumentar o teor de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> no caldo, melhorando o processo de clarificação do mesmo.

O potássio por sua vez, destaca-se por ser o nutriente exportado em maior quantidade por essa cultura. Além de influenciar sua qualidade, atua no metabolismo da planta, ativando várias enzimas, exerce importante função na abertura e fechamento dos estômatos, além de estar relacionado com a assimilação de gás carbônico e fotofosforilação (FIGUEIREDO, 2006).

Assim, a nutrição adequada da cana-de-açúcar é uma prática comprovadamente reconhecida como sendo uma das principais responsáveis pelos incrementos de produtividade da cultura. Considerando que a adubação mineral é a mais utilizada para o fornecimento de nutrientes e por representar grande parte dos custos de produção, buscar alternativas para as unidades produtoras de açúcar e álcool, visando diminuir esses custos, representa uma grande contribuição dos órgãos de pesquisa. Assim, a utilização de resíduos, tanto de origem animal quanto industrial, nessas áreas produtoras, como fornecedores de nutrientes, é de suma importância e necessita de muitos estudos para ser comprovada como eficiente e sustentável (RAMOS, 2013).

## **2.2 Silício**

### **2.2.1 Silício no solo**

O silício (Si) é o segundo elemento mais abundante na crosta terrestre depois do oxigênio (O), com um teor médio de 28,8% (peso) e uma ocorrência que varia de 0,52 a aproximadamente 47,0% (peso) (McKEAGUE e CLINE, 1963; WEDEPOHL, 1995; KORNDÖRFER, 2006).

Enquanto a maioria dos solos são abundantes em Si, outros contêm níveis baixos deste elemento, em particular a forma disponível para as plantas. Estes solos incluem os Latossolos e Argissolos, que são tipicamente caracterizados como altamente intemperizados, lixiviados, ácidos e pobres em saturação por bases (FOY, 1992), e os Organossolos, que contêm altos níveis de matéria orgânica e baixos teores de minerais (SNYDER et al., 1986). Além disso, os solos compostos predominantemente por areia e aqueles que estiveram sob a utilização agrícola por um longo tempo, perdem rapidamente quantidades consideráveis de Si e normalmente têm baixo teor deste nutriente disponível para as plantas (KORNDÖRFER, 2006; DATNOFF et al., 1997)

No solo, o Si é geralmente agrupado em três frações diferentes: a fase sólida, a fase adsorvida e a fase líquida (MATICHENCOV e BOCHARNIKOVA, 2001; SAUER et al., 2006). A fase sólida é dividida em três grupos principais: formas amorfas, formas pouco cristalinas e microcristalinas e as formas cristalinas. A maior fração de Si na fase sólida é composta pelas formas cristalinas as quais ocorrem principalmente como silicatos primários e secundários e são abundantes em solos minerais que se desenvolveram a partir de rochas e sedimentos (ILER, 1979; CONLEY et al., 2006). A importância dessa fase de Si no solo está no fato de que a solubilidade das diferentes formas do elemento na fase sólida afeta de forma significativa a concentração de Si na solução do solo (TUBAÑA; HECKMAN, 2015). Os componentes de Si nas fases adsorvida e líquida são semelhantes, com a exceção de que aqueles em fase líquida estão dissolvidos na solução do solo, enquanto os adsorvidos estão presos às partículas do solo e os óxidos e hidróxidos de Fe e Al (TUBAÑA; HECKMAN, 2015). A adsorção do ácido silícico presente na solução do solo ocorre em uma variedade de partículas do solo incluindo argila e hidróxidos de Fe e Al (HANSEN et al., 1994; DIETZEL, 2002) e também minerais de argila secundários que, ao adsorverem Si, causam redução mínima na concentração do elemento em solução (SIEVER, WOODFORD, 1973). Já os hidróxidos de Fe e Al têm capacidade de adsorção forte, capaz de remover, a partir da solução do solo, quantidades significativas de Si dissolvido (BECKWITH e REEVE, 1963; McKEAGUE e CLINE, 1963; CORNELL e SCHWERTMANN, 1996). Essa adsorção do Si por óxidos é influenciada por fatores como o pH, o potencial redox e o tipo de metal (Al ou Fe) presente no solo.

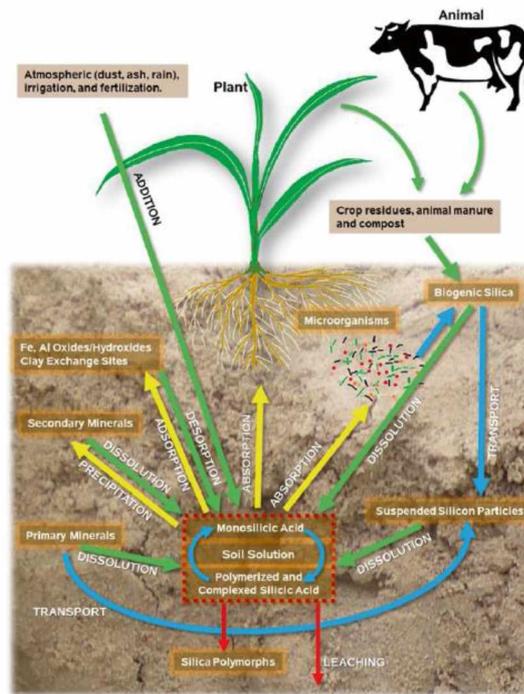
A quantidade de ácido monossilícico ( $H_4SiO_4$ ) que é adsorvida por óxidos aumenta desde pH 4 a pH 9, sendo notavelmente mais elevada quando os óxidos metálicos no solo são à base de Al por serem esses mais eficazes do que os óxidos de Fe em adsorver  $H_4SiO_4$

na solução do solo (JONES e HANDRECK 1963, 1965, 1967; McKEAGUE e CLINE, 1963).

Na fase líquida, ou na solução do solo, o Si está presente em diferentes formas e ocorre principalmente como monomérica ( $H_4SiO_4$ , a forma biodisponível para plantas), ácido oligomérico e ácido poli-silícico (ILER, 1979), em outras palavras, a fase líquida de Si consiste de  $H_4SiO_4$  e das formas polimerizadas e complexadas de ácido silícico. Em termos numéricos, a concentração de Si varia de 0,09 a 93,4  $mg\ dm^{-3}$  de acordo com Volkova (1980) e Kovda (1985).

O ácido monossilícico ( $H_4SiO_4$ ) não apresenta cargas e é a única forma absorvida pelas plantas, sendo, após a absorção, depositado como sílica polimerizada dentro dos tecidos da planta, o que o torna relevante para a nutrição de plantas com esse nutriente. Os citados complexos formados pelo ácido silícico ocorrem com parte desse ácido e compostos orgânicos e inorgânicos presentes na solução do solo, enquanto que o ácido polissilícico influencia a agregação do solo (TUBAÑA; HECKMAN, 2015) através da ligação que faz com as partículas do solo e melhoram sua capacidade de agregação e de retenção de água, particularmente em solos de textura leve (NORTON, 1984).

Essa dinâmica do Si no solo está ilustrada na figura a seguir (Figura 1) que mostra processos que resultam em aumento da concentração (setas verdes) ou na diminuição (setas amarelas) da disponibilidade de Si na solução do solo, processos que resultam em perda de Si do solo ou formação de Si indisponível para as plantas (setas vermelhas) e também processos de transformação do Si em agrupamentos de sílica que contribuem para a solução do solo.



Fonte: Tubaña; Heckman, 2015

Figura 1. Ciclo do Si no solo.

A quantidade de  $H_4SiO_4$  na solução do solo e a solubilidade de minerais contendo silício é afetada por fatores como pH, temperatura, tamanho das partículas, teor de água e matéria orgânica, e potencial redox do solo (SAVANT et al., 1997).

Em geral o pH do solo regula a solubilidade e a mobilidade do Si, sendo  $H_4SiO_4$  a forma comum em solos com valores de pH menores que 8 (ILER, 1979), a qual se dissocia em  $H^+ + H_3SiO_4^-$  em valores de pH acima de 9 ou ainda em  $2H^+ + H_2SiO_4^{2-}$  em valores de pH acima de 11 (TUBAÑA; HECKMAN, 2015). Ainda os processos de adsorção-dessorção que afetam a concentração de  $H_4SiO_4$  na solução do solo são muito dependentes do pH (McKEAGUE e CLINE, 1963) sendo a adsorção máxima de  $H_4SiO_4$  em pH entre 9 e 10. Por fim, o efeito do pH sobre a disponibilidade de Si no solo é observado também quando a aplicação de fertilizantes que geram acidez aumenta a concentração de  $H_4SiO_4$  na solução do solo, e calagem e elevado teor de matéria orgânica resultam em redução na concentração e mobilidade do  $H_4SiO_4$  segundo estudos de Panov et al. (1982) e Allmaras et al. (1991).

Um aspecto importante relacionado ao Si no solo, além da sua disponibilidade e das formas em que se encontra, é sua capacidade em influenciar a dinâmica dos diferentes elementos, o que se deve à sua elevada capacidade de adsorção e pode resultar em maior ou menor disponibilidade de determinados nutrientes (TUBAÑA; HECKMAN, 2015).

Exemplo positivo da influência do Si na dinâmica de outros nutrientes aparece no estudo conduzido por Tokunaga (1991), em que as perdas por lixiviação de K e outros nutrientes móveis no solo foram reduzidas pela presença de Si e o que os fez permanecer disponíveis pelo fato de nutrientes na solução do solo com carga positiva serem adsorvidos sobre a superfície contendo Si.

Ainda, de acordo com várias publicações, a disponibilidade de fósforo aumenta após a fertilização com Si (GLADKOVA, 1982; SINGH e SARKAR, 1992; O'REILLY e SIMS, 1995; MATICHENKOV e AMMOSOVA, 1996). A aplicação de Si aumenta sua quantidade dissolvida na solução do solo na forma de  $H_4SiO_4$ , a qual ao ser adsorvida por exemplo a fósforos Al, Ca, Mg e Fe causa dessorção do ânion fósforo. Nota-se assim que uma fonte de Si tem a capacidade para adsorver os fósforos dissolvidos na solução do solo, incluindo aqueles liberados a partir da reação de dessorção causada pelo silicato (TUBAÑA; HECKMAN, 2015). Observa-se então que no solo a relação entre o fósforo e o  $H_4SiO_4$  é antagônica, ou seja, a quantidade de íon fósforo liberado para a solução do solo aumenta com concentrações crescentes de  $H_4SiO_4$ , o que é explicado pela forte competição por sítios de sorção específicos (BROWN e MAHLER, 1987).

A presença de Si pode também reduzir a disponibilidade de determinados elementos presentes no solo, o que, no caso de metais pesados e/ou nutrientes tóxicos se mostra como mais um importante ponto a ser considerado em relação ao Si no solo. Estudos conduzidos com aplicação de materiais ricos em silício mostraram aumento no pH do solo e redução na disponibilidade de Cd, Cu, Pb e Zn em 60% e na absorção desses metais pesados pelo arroz (CHEN et al., 2000; GU et al., 2011). Tubaña et al. (2012) observaram resultados semelhantes com os elementos Fe e Ni. Segundo Schindler et al. (1976), o fluxo de difusão dos metais pesados a partir do solo para a solução foi reduzido em 84% devido à precipitação com silicatos, fósforos e hidróxidos, sendo bastante baixa a solubilidade destes silicatos de metais pesados.

Em altas concentrações de  $H_4SiO_4$  na solução do solo os metais pesados são imobilizados pela precipitação dos silicatos, o que resulta em baixa concentração de silicatos solúveis para a absorção pelas plantas (JONES e HANDRECK, 1967; LINDSAY, 1979; SNYDER et al., 2007), isso porque o Si no solo se torna indisponível para ser absorvido quando em forma de silicatos ou óxidos com outros compostos (MA; YAMAJI, 2006).

Outro exemplo de estudos que mostraram que a aplicação de materiais ricos em silício efetivamente reduziu a toxicidade e a absorção de Al são os trabalhos de Haak e

Siman, 1992; Myhr e ERstad, 1996, que explicam que a precipitação do Al pode ser causada pelo aumento no pH do solo resultante da elevada concentração de  $H_4SiO_4$  (LINDSAY, 1979), pela adsorção de  $H_4SiO_4$  aos hidróxidos de Al e a formação de compostos menos móveis com reduzida ação fitotóxica do Al (PANOV et al., 1982; BAYLIS et al., 1994) e/ou pela forte adsorção do Al móvel à superfície do silicato (SCHULTHESS e TOKUNAGA, 1996).

Estudos têm demonstrando também efeito importante do Si na redução da absorção de arsênio (As), em culturas como a do arroz inundado, a qual contém altos níveis de As (elemento cancerígeno), superando o acúmulo das demais culturas (WILLIAMS et al., 2007; SU et al., 2009) pois, nesse sistema é maior a disponibilidade da forma móvel As(III) (XU et al., 2008). Nessas condições redutoras, após a retirada do oxigênio, os elementos Fe, Mn e Al que estariam na forma de óxidos e hidróxidos, assumem forma reduzida e liberam para a solução o As que estaria ligados à esses compostos. Além disso, a forma arsenato (AsV) é reduzida à arsenito (AsIII), forma mais comum de As em áreas inundadas e de maior mobilidade na solução do solo (GARCIA-MANYES et al., 2002; TAKAHASHI et al., 2004).

Embora a concentração de As seja menor nos grãos em comparação com as folhas, dietas à base de arroz se tornam formas relevantes de ingestão de As por humanos (KILE et al., 2007), porém o acúmulo de As em arroz pode ser reduzido por exemplo, através de mudanças nas práticas de manejo da cultura (WANG et al., 2015), como por exemplo o uso de Si.

O arsenito é absorvido pela raiz da planta de arroz e transportado para o xilema pelos mesmos transportadores inicialmente identificados como os transportadores de Si na forma de ácido monossilícico ( $H_4SiO_4$ ), o que permite dizer que, por terem a mesma rota de absorção e transporte, a absorção de Si impede que o As seja absorvido (MA et al., 2008).

Guo et al. (2005, 2009) obtiveram efeito do Si na redução da concentração de As na raiz e na parte aérea do arroz cultivado em solução nutritiva com As(V) e As(III). Nessa mesma linha, Bogdan e Schenk (2008) cultivando arroz em seis diferentes áreas obtiveram correlação negativa entre o teor de Si na solução o solo e a concentração de As na palha e no grão polido. Ainda Li et al. (2009) encontraram redução significativa de As na palha e na casca do arroz em resposta à aplicação de Si no solo.

### 2.2.2 Silício na cultura da cana-de-açúcar

De acordo com Guntzer et al. (2012), dentre as dez principais culturas mais produzidas no mundo, sete são culturas acumuladoras de Si, incluindo milho, arroz, beterraba sacarina, trigo e cana-de-açúcar. Ma et al. (2001) também considera a cana-de-açúcar como uma cultura acumuladora de Si e de acordo com Korndörfer e Datnoff (1995), em função disso pode ser encontrado até 6,7% de Si nos colmos e folhas velhas.

O Si é encontrado nas plantas principalmente sob a forma de sílica amorfa hidratada ( $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ ) e apenas uma pequena parte (1%) se apresenta na forma iônica (TAKAHASHI, 1996). Nas folhas, o Si acumula-se abaixo da cutícula formando uma camada de sílica que contribui para fortalecer a estrutura da planta reduzindo perda de água (TAKAHASHI, 1995; KORNDÖRFER et al., 2002a) além de manter as folhas mais eretas, o que propicia melhor aproveitamento de luz solar e conseqüentemente maior aproveitamento fotossintético (DEREN et al., 1994; TAKAHASHI, 1995) e produção (PEREIRA et al., 2003).

Embora não seja considerado um nutriente essencial, o Si é o elemento mais absorvido pela cana-de-açúcar, seguido por N, K (os dois nutrientes mais absorvidos pela cultura) Ca e Mg (DATNOFF et al., 2001). Essa mesma relação é observada para o acúmulo de nutrientes, que no caso do Si pode chegar a  $380 \text{ kg ha}^{-1}$  na parte aérea enquanto K, N e P são acumulados, respectivamente, nas quantidades de 180, 140 e  $20 \text{ kg ha}^{-1}$  aos 12 meses de idade (SAMUELS, 1969). O acúmulo de Si pode ser ainda maior em função da produtividade esperada; por exemplo, para uma produtividade de  $74 \text{ t ha}^{-1}$  de cana, Ross et al. (1974) citam uma remoção de até  $408 \text{ kg ha}^{-1}$  de Si.

Cabe ressaltar que existe uma grande variabilidade genética quanto à capacidade das variedades de cana-de-açúcar em acumular Si e também nos teores de Si foliar que cada variedade apresenta (DEREN et al., 1993; CAMARGO et al., 2010).

A maior absorção e acúmulo do Si em relação aos demais nutrientes sugere que esse nutriente tenha funções fisiológicas e morfológicas importantes (SAMUELS, 1969), além do efeito já mencionado de aumento da capacidade fotossintética devido à melhoria na arquitetura da planta o que confere melhor interceptação da luz solar como mencionado anteriormente, o acúmulo de Si pode ainda aumentar a resistência ao estresse hídrico e diminuir os danos provocados pelos ataques de pragas e doenças (KORNDÖRFER et al., 2002).

Quanto à resistência ao estresse hídrico, Faria (2000) afirma que quanto maior o teor de Si na planta, maior sua capacidade em tolerar falta de água no solo e, em relação

aos estresses bióticos. O Si também pode ativar genes relacionados com a produção de fenóis e enzimas envolvidos com o mecanismo de defesa da planta (RODRIGUES et al., 2004).

Os efeitos benéficos do acúmulo de Si na cana-de-açúcar indicam que a adubação silicatada pode aumentar a produtividade da cana-de-açúcar, com efeitos observados também em cana soca, segundo Camargo (2014), o que sugeriria a inclusão do Si na adubação dessa cultura de modo a garantir a sustentabilidade da produção agrícola (KORNDÖRFER et al., 2002).

Os resultados que mostram aumento da produtividade da cultura em função da adubação com silicatos são concisos e mostram que não só no Brasil, mas em países como Estados Unidos, Austrália, África do Sul e Maurícius essa prática pode aumentar a produtividade na cana-planta e na soqueira (CAMARGO, 2014) além de aumentar significativamente também a síntese de açúcar (FOLTRAN, 2013).

Em relação à aplicação de Si para a cultura da cana-de-açúcar, a mesma se justifica devido aos baixos teores de Si disponível em algumas classes de solo capazes de limitar ou não a produção, considerando que a cultura consegue se desenvolver sob pequenas quantidades de Si no solo, e a alta extração ao longo os ciclos consecutivos que fazem com que haja resposta favorável da cultura em relação à adubação com Si, o que sugere que esse nutriente possa ser necessário para o desenvolvimento normal da planta e essencial para a produção agrônômica sustentável da cultura da cana-de-açúcar (CAMARGO, 2011; SAVANT et al., 1999).

A aplicação de Si para a cultura da cana-de-açúcar pode auxiliar também contra aspectos como atraso na maturação e diminuição de sólidos solúveis no caldo da cana, característicos de plantas que se desenvolvem em solos com baixa disponibilidade de Si (BAIR, 1966).

A referida adubação com Si pode ser utilizada em substituição total ou parcial à aplicação de calcário, entretanto, se o solo já estiver corrigido, a quantidade aplicada não deve ser superior a 800 kg ha<sup>-1</sup> de silicato devido ao efeito corretivo de acidez que maioria das fontes de Si aplicadas ao solo possuem quando utilizadas em dosagens superiores à essa (KORNDÖRFER et al., 2003). No entanto, por ser considerado pouco móvel na planta, pode haver a necessidade do fornecimento desse nutriente também em canaviais adultos e não só nos canaviais em implantação (DATNOFF et al., 2001), sendo a aplicação foliar uma opção.

### 2.2.3. Fontes de silício

A quantidade estimada de Si removida anualmente pelas diferentes culturas agrícolas em escala global está entre 210 e 224 milhões de toneladas (REIMERS, 1990; SAVANT et al., 1997) sendo que para as culturas acumuladoras de Si (por exemplo arroz, trigo e cana-de-açúcar), a remoção de Si do solo é significativamente maior que aquela obtida ambientes naturais. Por exemplo, para cana-de-açúcar e arroz, as taxas de remoção de Si estão entre 300 e 500 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> respectivamente (MEYER; KEEPING, 2001; BLECKER et al., 2006; MAKABE et al., 2009).

Os processos que regulam a concentração de Si na solução do solo ocorrem imediatamente para repor o Si removido pelas plantas até que se mantenha o equilíbrio entre as fases líquida e sólida. Solos com elevado poder tampão facilmente repõem a extração do Si mantendo altos teores em solução. Entretanto, a reposição do Si absorvido em certos tipos de solo (por exemplo solos muito intemperizados, orgânicos, ou solos submetidos a cultivo intensivo) pode necessitar de algum tempo e, assim, esses tipos de solo requerem a aplicação de Si via fertilizantes ou outras fontes de Si com o intuito de aumentar a concentração de H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> na solução (TUBAÑA; HECKMAN, 2015).

A própria água utilizada na irrigação pode conter diferentes formas de Si, incluindo íons, moléculas e agregados. O Si é também adicionado ao solo via deposição atmosférica através de poeira e cinzas (KURTZ et al., 1987; STREET-PERROTT; BARKER, 2008; OPFERGELT et al., 2010). No entanto, esse Si proveniente da atmosfera contribui muito pouco para a solução do solo quando comparado com outras formas de adição de Si ao sistema solo-planta (STREET-PERROTT; BARKER, 2008).

Uma pequena quantidade de Si é adicionada ao solo via minerais insolúveis e resistentes ao intemperismo (KOVDA, 1985) e também a aplicação de esterco e compostos orgânicos ricos em Si pode, através da sua decomposição, aumentar o teor de Si disponível no solo (SONG et al., 2013).

Resíduos de plantas também podem ser caracterizados como fontes de Si quando incorporados ao solo. Alguns materiais como casca de arroz ou bagaço de cana apresentam concentração de Si considerável e a sua aplicação no campo em altas doses fornece Si, no entanto há ainda que se complementar o fornecimento desse nutriente via resíduos, com o uso de fertilizantes (GASCHO, 2001). Tubaña e Heckman (2015) citam também informações referentes ao uso de casca e palha de arroz, “biochar”, cinzas, pó de rocha, cimento e lamas provenientes de diversos tipos de processamento, como fontes de Si.

Dessa forma, muitos produtos têm sido utilizados como fontes de Si, dentre eles aparecem os subprodutos da indústria de siderurgia e da produção de fósforo elementar, metassilicatos de cálcio e de sódio, termofosfatos e silicatos de cálcio e magnésio.

Os silicatos de cálcio são compostos principalmente por  $\text{CaSiO}_3$  e têm se tornado as principais fontes de Si para aplicação via solo. Sua ocorrência se dá na forma de cristais prismáticos de wollastonita (MAXIM et al., 2008), sendo esse meta-silicato considerado de padrão internacional, com elevada concentração de Si (no mínimo 50 % de  $\text{SiO}_2$ ) e com resultados eficientes em vários solos com baixa disponibilidade de Si (KORNDÖRFER et al., 2004, GASCHO, 2001). No entanto, os depósitos de wollastonita não são encontrados na forma pura (silicato de cálcio) e, portanto, uso intenso de mão-de-obra e processos de refino onerosos são requeridos, o que limita a produção em massa de wollastonita como fertilizante (PARK, 2001; MAXIM et al., 2008) e o torna uma fonte de Si usada principalmente em pesquisas, com aplicação na forma de pó.

Materiais como silicatos de magnésio são constituídos principalmente de  $\text{MgSiO}_3$  e contêm grandes quantidades de Si, mas não são considerados fontes solúveis de Si devido a sua baixa solubilidade (KORNDÖRFER et al., 2004, WEAST et al., 1985). Esses dois tipos de materiais (silicatos de cálcio e silicatos de magnésio) devem, preferencialmente, ser comercializados na forma de pó, pois quanto mais finamente moído, maior sua reatividade e eficiência agrônômica (KORNDÖRFER et al., 2004).

Atualmente, subprodutos industriais contendo Si na sua composição são os materiais mais utilizados como fontes de Si. Esses subprodutos, tais como os provenientes da produção de P elementar e da produção de aço e de ferro apresentam baixo custo de obtenção e são fontes acessíveis de Si para a produção de culturas. Esses materiais geralmente apresentam uma pequena fração de Si solúvel (GASCHO, 2001) mas possuem benefícios intrínsecos tais como o efeito corretivo de acidez, tipicamente com equivalente similar ao carbonato de cálcio (HECKMAN et al., 2003) o que os torna boas opções pois as altas temperaturas utilizadas nos processos industriais disponibilizam o Si neles contido e aumentam sua solubilidade (GASCHO, 2001).

Em termos de composição e de quantidade de Si disponível para as plantas encontrados nessas fontes, os valores são bastante variáveis e essas diferenças se devem à variação na velocidade de resfriamento e ao tamanho final do grânulo do material. Pelo baixo custo e pelos teores de Si satisfatórios, os subprodutos fontes de Si apresentam melhor custo benefício que a wollastonita e, assim, para fins de manejo de adubação com Si, se torna essencial o conhecimento da quantidade de Si disponível que cada produto

apresenta (TAKAHASHI, 1981; DATNOFF et al., 1992; DATNOFF et al., 2001; MA; TAKAHASHI, 2002).

Dentre os subprodutos industriais, aqueles provenientes da indústria siderúrgica são as fontes de Si mais abundantes e baratas. Esses materiais são originários do processamento, em altas temperaturas, do calcário com a sílica ( $\text{SiO}_2$ ) presente no minério de ferro e em seu estado original, apresentam composição química e granulometria bastante variados, em função do tipo de processo, do minério de ferro e do sistema de forno utilizados. Suas altas concentrações de Ca e Mg possibilitam utilização como corretivo de acidez e como fonte desses nutrientes, especialmente para solos arenosos, com baixa fertilidade natural e baixa CTC. Como nos calcários, a reatividade desses subprodutos varia em função da granulometria, da dose utilizada, do tipo e solo e do tempo de contato entre o material e o solo (PIAU, 1991; NOVAIS et al., 1993; AMARAL SOBRINHO et al., 1993; OLIVEIRA et al., 1994).

Outro exemplo de fonte de Si a ser citado é o Termofosfato, um fertilizante comercializado no Brasil como fonte de P, Ca e Mg que fornece também Si devido aos efeitos da alta temperatura utilizada sobre o silicato de magnésio presente no processo de obtenção desse material (GASCHO, 2001).

O uso de Si na agricultura pode se dar também por meio de formulações líquidas, as quais trazem vantagens tais como a facilidade de aplicação e o uso de doses variadas quando comparadas às fontes de Si sólido. Soluções à base de silicato de sódio e de potássio, além do uso de sílica gel, são opções para fornecimento de Si via folha, o que confere controle de algumas doenças no caso do silicato de potássio, ou via solo em culturas de alto valor agregado (MENZIES et al., 1992; BÉLANGER et al., 1995; GASCHO, 2001; KANTO et al., 2006; RODRIGUES et al., 2009; KAMENIDOU et al., 2010).

Qualquer que seja a fonte de Si a ser utilizada, algumas características a classificam como uma boa fonte de Si ou não, sendo elas: alta concentração de Si solúvel e disponibilidade imediata dos nutrientes, boas propriedades físicas que facilitem a aplicação mecanizada e baixo custo (GASCHO, 2001).

A ideia de utilização de uma fonte de Si é fornecer este elemento na forma solúvel para as plantas, em função disso uma boa fonte deve apresentar boa parte desse Si prontamente disponível. Ao mesmo tempo que a alta solubilidade é uma das características mais importantes de uma fonte de Si, é também uma das mais difíceis de ser obtida. Devido à combinação do Si com outros elementos, a maioria das fontes é

insolúvel e encontrar uma fonte de boa solubilidade e que apresente também outras boas características é o desafio (GASCHO, 2001).

Outra dessas boas características importante em uma boa fonte de Si é possuir propriedades físicas que permitam boa qualidade de aplicação mecânica. Na maioria dos casos os subprodutos industriais utilizados como fontes de Si devem ser moídos e peneirados até que apresentem tamanho de partículas satisfatório. O teor de Si extraível aumenta à medida que o tamanho da partícula é reduzido, porém essa redução de tamanho resulta também em maior dificuldade de se fazer uma aplicação uniforme. Não existem informações na literatura que orientem a indústria quanto ao tamanho de partícula ideal de modo a oferecer boa solubilidade e garantir qualidade e facilidade de aplicação, no entanto, as pesquisas nesse sentido feitas com calcário podem auxiliar também na produção de fontes de Si de melhor qualidade física (GASCHO, 2001).

Uma boa fonte de Si deve também estar disponível em áreas próximas ao local onde será aplicada, de modo a reduzir custos com transporte e assim, viabilizar a aplicação desse elemento nas áreas de produção agrícola (GASCHO, 2001).

Espera-se ainda que nos materiais utilizados para o fornecimento de Si não exista contaminantes, principalmente metais pesados, isso porque devido as elevadas doses aplicadas para suprir a quantidade de Si adequada, caso haja a presença desses metais, provenientes da origem ou do processo de obtenção do material, pode haver a elevação dos teores ou o fornecimento em níveis superiores aos permitidos e/ou tolerados (GASCHO, 2001).

## REFERÊNCIAS

- AMARAL SOBRINHO, N. M. B.; COSTA, L. M.; DIAS, L. E.; BARROS, N. F. Aplicação de resíduo siderúrgico em um latossolo: Efeitos na correção do solo e na disponibilidade de nutrientes e metais pesados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 17, p. 299-304. 1993.
- ALLMARAS, R. R.; LAIRD, D. A.; DOUGLAS, C. L.; et al. Long-term tillage, residue management and nitrogen fertilizer influences on soluble silica in Haploxerol. **Journal of the American Society of Agronomy**, Washington, p. 323, 1991.
- BAIR, R. A. Leaf Silicon in Sugarcane, Field Corn and St. Augustine grass grown on some Florida Soils. **Soil and Crop Science Society of Florida Proceedings**, Belle Glade, v. 26, p. 63 - 70. 1966.
- BAYLIS, A. D.; GRAGOPOULOU, C.; DAVIDSON, K. J.; et al. Effects of silicon on the toxicity of aluminum to soybean. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Nova Iorque, v. 25, p. 537 – 546, 1994.
- BECKWITH, R. S.; REEVE, R. Studies on soluble silica in soils. I. The sorption of silicic acid by soils and minerals. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, v.1, p. 157–168, 1963.
- BÉLANGER, R. R.; BOWEN, P. A.; EHRET, D. L.; et al. Soluble silicon its role in crop disease management of greenhouse crops. **Plant Disease**, Saint Paul, v. 79, p. 329–336, 1995.
- BLECKER, S. W.; McCULLEY, R. L.; CHADWICK, O. A.; et al. Biological cycling of silica across a grassland bioclimate sequence. **Global biogeochemical cycles**, Washington, v. 20, p. 1–11, 2006.
- BOGDAN, K., SCHENK, M. K. Arsenic in Rice (*Oryza sativa* L.) Related to dynamics of arsenic and silicic acid in paddy soils. **Environmental science & technology (Washington). News & research notes**, Washington, v. 42, p. 7885–7890, 2008.
- BROWN, T. H.; MAHLER, R. L. Effects of phosphorus and acidity on levels of silica extracted from a Palouse silt loam. **Journal / Soil Science Society of America**, Madison, v. 51, p. 674 – 677, 1987.
- CAMARGO, M. S. de; KORNDÖRFER, G. H.; WYLER, P. Silicate fertilization of sugarcane cultivated in tropical soils. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 167, p. 64-75, 2014.
- CAMARGO, M. S. de. Silício em cana-de-açúcar. **Pesquisa & Tecnologia**, Campinas, v.8, n. 2, jul./dez. 2011.
- CAMARGO, M. S. de.; KORNDÖRFER, G. H.; FOLTRAN, D. E.; HENRIQUE, C. M.; ROSSETTO, R. Absorção de silício, produtividade e incidência de *Diatraea saccharalis* em cultivares de cana-de-açúcar. **Bragantia**, Campinas, v. 69, n. 4, p. 937-944, 2010.

CHEN, H. M.; ZHENG, C. R.; TU, C.; et al. Chemical methods and phytoremediation of soil contaminated with heavy metals. **Chemosphere**, Oxford, v. 41, p. 229 – 234, 2000.

Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira grãos**, Safra 2016/17. v. 4, n. 4, 162 p. Jan./ 2017.

Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar**, Safra 2016/17. v. 3, n. 3, 74 p. Dez./ 2016.

CONLEY, D. J.; SOMMER, M.; MEUNIER, J. D.; et al. Silicon in the terrestrial biogeosphere. In: ITTEKOT, V.; HUMBORG, C.; GARNIER, J. (Eds). **Land–ocean nutrient fluxes: silica cycle**. SCOPE Series v. 66, p. 13–28. 2006.

CORNELL, R. M.; SCHWERTMANN, U. The iron oxides: structure, properties, reactions, occurrence and uses. **VCH**, Weinheim / New York, 1996.

DATNOFF, L. E., SNYDER, G. H., KORNDÖRFER, G. H. **Silicon in Agriculture**. Amsterdam: Elsevier, 2001. 403p.

DATNOFF, L. E.; DEREN, C. W.; SNYDER, G. H. Silicon fertilization for disease management of rice in Florida. **Crop Protection**, Oxford v. 16, p.525–531, 1997.

DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; DEREN, C. W. Influence of silicon fertilizer grades on blast and brown spot development and yields of rice. **Plant Disease**, Saint Paul, v. 76, p. 1011–1013, 1992.

DEREN, C. W., DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; MARTIN, F. G. Silicon concentration, disease response, and yield components of rice genotypes grown on flooded organic histosols. **Crop Science**, Madison, v. 34, p. 733 – 737. 1994.

DEREN, C. W.; GLAZ, B.; SNYDER, G. H. Leaf-tissue silicon content of sugarcane Genotypes grown on Everglades Histosols. **J. Plant Nutrition**, Monticello, v.16, n. 11, p. 2273 – 2280. 1993.

DIETZEL, M. Interaction of polysilicic and monosilicic acid with mineral surfaces. In: STOBER, I.; BUCHER, K. (Eds.). **Water–rock interaction**. Kluwer, Dordrecht, p. 207–235. 2002.

DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. **Cana de Açúcar**. Campinas, Instituto Agrônômico. 2008.

FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) **The State of Food and Agriculture**; Biofuels: prospects, risks and opportunities. Rome, Electronic Publishing Policy and Support Branch Communication Division FAO 2008. 138 p.

FARIA, R. J. **Influência do silicato de cálcio na tolerância do arroz de sequeiro ao déficit hídrico do solo**. 2000. 47 f. Dissertação (Mestrado em Solos) – Universidade Federal de Lavras, Lavras. 2000.

- FIGUEIREDO, P. A. M. Particularidades a respeito do potássio. **STAB - Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.24, n.6, p.25, 2006.
- FOY, C. D. Soil chemical factors limiting plant root growth. **Advances in Soil Science**, Boca Raton, v. 19, p. 97–149, 1992.
- FOLTRAN, R. **Aplicação foliar de silício associado ou não a maturadores em cana-de-açúcar**. 2013. 132 f. Tese de doutorado (Doutorado em Agronomia) – Faculdades de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2013.
- GARCIA-MANYES, S., JIMENEZ, G., PADRO, A., RUBIO, R., RAURET, G. Arsenic speciation in contaminated soils. **Talanta : an international journal of analytical chemistry**, Londres, v. 58, 97–109, 2002.
- GASCHO, G. J. Silicon sources for agriculture. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier, 2001. cap. 12. p.197-207.
- GLADKOVA, K. F. The role of silicon in phosphate plant nutrition. **Agrochemistry**, S. 1., v. 2, p. 133, 1982.
- GU, H.; QUI, H.; TIAN, T.; et al. Mitigation effects of silicon rich amendments on heavy metal accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) planted on multi-metal contaminated acidic soil. **Chemosphere**, Oxford v. 83, p. 1234 – 1240, 2011.
- GUNTZER, F.; KELLER, G.; MEUNIER, J. Benefits of plant silicon for crops: a review. **Agronomy for sustainable development**, Paris, v. 32, p. 201–213, 2012.
- GUO, W., ZHANG, J., TENG, M., WANG, L. H. Arsenic uptake is suppressed in a rice mutant defective in silicon uptake. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, S. 1., v. 172, p. 867–874, 2009.
- GUO, W., HOU, Y. L., WANG, S. G., ZHU, Y. G. Effect of silicate on the growth and arsenate uptake by rice (*Oryza sativa* L.) seedlings in solution culture. **Plant Soil**, S. 1., v. 272, p. 173–181, 2005.
- HAAK, E.; SIMAN, G. **Field experiments with Oyeslag (Faltorsok med Oyeslag)**. Report 185, Uppsala. 1992.
- HANSEN, H. C. B.; RABEN-LANGE, B.; RAULUND-RASMUSSEN, K.; et al. Monosilicate adsorption by ferrihydrite and goethite at pH 3–6. **Soil Science**, Philadelphia v. 158, p. 40 – 46, 1994.
- HECKMAN, J. R.; JOHNSTON, S.; COWGILL, W. Pumpkin yield and disease response to amending soil with silicon. **HortScience**, Alexandria, v. 38, p. 552–554, 2003.
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) **Produção Agrícola Municipal; Culturas temporárias e permanentes**. Rio de Janeiro, v. 35, 91 p. 2008.

- ILER, R. K. **The chemistry of silica**. Wiley, New York, p. 621. 1979.
- JONES, L. H. P.; HANDRECK, K. A. Effects of iron and aluminum oxides on silica in solution in soils. **Nature**, Londres, v. 198, p. 852–853, 1963.
- JONES, L. H. P.; HANDRECK, K. A. Studies of silica in the oat plant. III. Uptake of silica from soils by plant. **Plant and Soil**, Crawley, v. 23, p. 79–96, 1965.
- JONES, L. H. P.; HANDRECK, K. A. Silica in soils, plants, and animals. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 19, p. 107–149, 1967.
- KAMENIDOU, S.; CAVINS, T. J.; MAREK, S. Silicon supplements affect floricultural quality traits and elemental nutrient concentrations of greenhouse produced gerbera. **Scientific horticulture**, Kent, v. 123, p. 390–394, 2010.
- KANTO, T.; MIYOSHI, A.; OGAWA, T.; et al Suppressive effect of liquid potassium silicate on powdery mildew of strawberry in soil. **Journal of General Plant Pathology**, S. I., v. 72, p. 137–142, 2006.
- KILE, M. L., HOUSEMAN, E. A., BRETON, C. V., SMITH, T., QUAMRUZZAMAN, Q., RAHMAN, M., MAHIUDDIN, G., CHRISTIANI, D. C. Dietary arsenic exposure in Bangladesh. **Environmental Health Perspectives**, Research Triangle Park, v. 115, p. 889–893, 2007.
- KORNDÖRFER, G. H. Elementos benéficos. In: FERNANDE S, M. S. (Ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. 432p.
- KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. **Silicatos de cálcio e magnésio na agricultura**. **Boletim Técnico UFU**, n.1, 3ed. 2004.
- KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. **Silicatos de cálcio e magnésio**. (Boletim Técnico UFU), 2003.
- KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H.S.; CAMARGO, M.S. Papel do silício na produção de cana-de-açúcar, **Stab**, Piracicaba, v.21, p. 6-9, 2002.
- KORNDÖRFER, G. H.; FARIA, R. J.; DATNOFF, L. F.; PEREIRA, L. E. Influência do silicato de cálcio na tolerância do arroz de sequeiro ao déficit hídrico no solo. In: FERTBIO. 2002a. Rio de Janeiro 2002a. **Anais...** Rio de Janeiro: CPGA-CS/UFRRJ, 2002a, 1 CD-ROOM.
- KORNDÖRFER, G. H.; DATNOFF, L. E. Adubação com silício: uma alternativa no controle de doenças da cana de açúcar e do arroz. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, v.70, p.1-5, 1995.
- KORNDÖRFER, G. H. A importância da adubação na qualidade da cana de açúcar: SÁ, M. E. de; BUZZETI, S. (Coordenadores). **Importância da adubação na qualidade dos produtos agrícolas**. São Paulo: Ícone, 1994. cap. 7, p. 133-142.

- KOVDA, V. A. Biogeochemistry of soil cover. **Nauka Publication**, Moscow, p. 159-179, 1985.
- KURTZ, A. C.; DERRY, L. A.; CHADWICK, O. A. Accretion of Asiandust to Hawaiian soils: isotopic, elemental and mineral mass balances. **Geochimica et cosmochimica acta**, Londres, v. 65, p. 1971–1983, 1987.
- LI, R. Y., STROUD, J. L., MA, J. F., MCGRATH, S. P., ZHAO, F. J. Mitigation of Arsenic Accumulation in Rice with Water Management and Silicon Fertilization. **Environmental science & technology**. News & research notes, Washington v. 43, p. 3778–3783, 2009.
- LIMA FILHO, O. F.; LIMA, M. T. G. TSAI, S. M. O silício na agricultura. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba, n. 87, p. 1 – 7, 1999.
- LINDSAY, W. L. Chemical equilibria in soils. **Wiley Interscience**, New York. 1979.
- MA, J. F., YAMAJI, N., MITANI, N., XU, X. Y., SU, Y. H., MCGRATH, S. P., ZHAO, F. J. Transporters of arsenite in rice and their role in arsenic accumulation in rice grain. **PNAS**, S. l., v. 105, p. 9931–9935, 2008.
- MA, J. F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science**, Oxford, v.11, p. 392 – 397, 2006.
- MA, J. F.; MIYAKE, Y.; TAKAHASHI, E. **Silicon as a beneficial element for crop plant**. In: SILICON IN AGRICULTURE. DATNOFF, L. E., KORNDÖRFER, G. H., SNYDER, G. (Eds). New York: Elsevier science. 2001. p.17-39.
- MA, J. F.; TAKAHASHI, E. **Soil, fertilizer and plant silicon research in Japan**. Dordrecht: Elsevier. 2002.
- MAEDA, A. S. **Adubação nitrogenada e potássica em socas de cana de açúcar com e sem queima em solos de cerrado**. 2009. 110f. Tese de doutorado (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Engenharia do Campus de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2009.
- MAKABE, S.; KAKUDA, K.; SASAKI, Y.; et al. Relationship between mineral composition or soil texture and available silicon in alluvial paddy soils on the Shounai Plain, Japan. **Soil science and plant nutrition**, Tokyo, v. 55, p. 300–308, 2009.
- MATICHENCOV, V. V.; BOCHARNIKOVA, E. A. The relationship between silicon and soil physical and chemical properties. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. (eds) **Silicon in agriculture**. Elsevier, Amsterdam, p 209–219. 2001.
- MATICHENKOV, V. V.; AMMOSOVA, Y. M. Effect of amorphous silica on soil properties of asod-podzolic soil. **Eurasian Soil Science**, Moscow, v. 28, p. 87 – 99, 1996.

MAXIM, LD.; NIEBO, R.; LAROSA, S.; et al. Product stewardship in wollastonite production. **Inhalation Toxicology**, S.l., v. 20, p. 1199–1214, 2008.

McKEAGUE, J. A.; CLINE, M. G. Silica in soil solutions. I. The form and concentration of dissolved silica in aqueous extracts of some soils. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 43, p. 70–82, 1963.

MEENA, V. D.; DOTANIYA, M. L.; COUMAR, V.; RAJENDIRAN, S.; KUNDU, S.; RAO, A. S. A Case for Silicon Fertilization to Improve Crop Yields in Tropical Soils. In: **Proceedings of the National Academy of Sciences of India - Section B - Biological sciences**, Allahabad, v. 84, n. 3, p. 505 – 518. 2014.

MENZIES, J.; BOWEN, P.; EHRET, D.; et al. Foliar applications of potassium silicate reduce severity of powdery mildew on cucumber, muskmelon, and zucchini squash. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v. 117, p. 902–905, 1992.

MEYER, J. H.; KEEPING, M. G. Past, present and future research of the role of silicon for sugar cane in southern Africa. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. (Eds.) **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier, 2001. Cap. 16. p. 257–275.

MYHR, K.; ERSTAD, K. Converter slag a liming material on organic soils. **Norwegian journal of agricultural sciences**, As, v. 10, p. 81, 1996.

NORTON, L. D. Micromorphology of silica cementation in soils. In: RINGROSE-VOASE, A. J.; HUMPHREYS, G. S. (Eds.). **Soil micromorphology: studies in management and genesis**. **De Soil Sci**, S. l., v. 22, v. 811–824, 1984.

NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; LEITE, F. P.; TEIXIERA, J. L.; LEAL, P. G. L. **Eficiência agrônômica de escórias da Siderúrgica Pains**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1993.

OLIVEIRA, A. C.; HAHNE, H.; BARROS, N. F.; MORAIS, E. J. Uso de escória de alto forno como fonte de nutrientes na adubação florestal. In: Seminário sobre o uso de resíduos florestais e urbanos em florestas, n. 1. **Anais...** Botucatu: Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais, p. 77-96. 1994.

OPFERGELT, S.; CARDINAL, D.; ANDRÉ, L.; DELVIGNE, C.; BREMOND, L.; DELVAUX, B. Variations of  $^{30}\text{Si}$  and Ge/Si with weathering and biogenic input in tropical basaltic ash soils under monoculture. **Geochimica et cosmochimica acta**, Londres, v. 74, p. 225–240, 2010.

ORLANDO FILHO, J. Calagem e adubação da cana de açúcar. In: CÂMARA, G. M. S.; OLIVEIRA, E. A. M. (Eds.). **Produção de cana de açúcar**. Piracicaba: FEALQ, 1993. p. 133-146.

O'REILLY, S. E.; SIMS, J. T. Phosphorus adsorption and desorption in a sandy soil amended with high rates of coal fly ash. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Nova Iorque, v. 26, p. 2983, 1995.

- PANOV, N. P.; GONCHAROVA, N. A.; RODIONOVA, L. P. The role of amorphous silicic acid in solonetz soil processes. **Vestnik Agr Sci**, S. 1., v.11, p.18, 1982.
- PARK, C. S. Past and future advances in silicon research in the Republic of Korea. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. (Eds.) **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier, 2001. Cap. 22. p. 359–372.
- PEREIRA, H. S.; VITTI, G. C.; KORNDÖRFER, G. H. Comportamento de diferentes fontes de silício no solo e na cultura do tomateiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 101-108. 2003.
- PIAU, W. C. **Viabilidade do uso de escórias como corretivos e fertilizantes**. 1991. 99 f. Dissertação (Mestrado), Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1991.
- RAMOS, L. A. **Resíduos orgânicos e fertilizantes minerais na cultura da cana de açúcar e alterações nas características químicas do solo**. 2013. 90 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Programa de Pós Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.
- REIMERS, N. F. **Natural uses. Dictionary-Reference Book**. Moscow. 1990.
- RODRIGUES, F. A.; DUARTE, H. S. S.; DOMICIANO, G. P. (2009) Foliar application of potassium silicate reduces the intensity of soybean rust. **Australasian Plant Pathology**, S.I., v. 38, p. 366–372, 2009.
- RODRIGUES F. A.; MCNALLY, D. J.; DATNOFF, L. E.; JONES, J. B.; LABBE, C.; BENHAMOU, N.; MENZIES, J. G. Silicon enhances the accumulation of diterpenoid phytoalexins in rice: a potential mechanism for blast resistance. **Phytopathology**, Saint Paul, v. 94, p. 177-183, 2004.
- ROSS, L.; NABABSING, P. CHEONG, Y. W. Y. Residual effect calcium silicate applied to sugarcane soils. In: **Proceedings of International Society of Sugar Cane Technologists Congress**. 15, Durban, 1974. Proc., v.2, p. 539 – 542, 1974.
- SAMUELS, G. Silicon and Sugar. **Sugar y Azucar**, Engliword, v. 65, p. 25 – 29. 1969.
- SAUER, D.; SACCONI, L.; CONLEY, D. J.; et al. Review of methodologies for extracting plant-available and amorphous Si from soils and aquatic sediments. **Biogeochemistry**, Lawrence, v. 80, p. 89–108, 2006.
- SAVANT, N. K., KORNDÖRFER, G. H.; SNYDER, G. H.; DATNOFF, L. E. Silicon nutrition and sugarcane production: A review. **Journal of Plant Nutrition**, Nova Iorque, v. 12, n.22, p. 1853 – 1903. 1999.
- SAVANT, N. K.; SNYDER, G. H.; DATNOFF, L. E. Silicon management and sustainable rice production. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 58, p.151- 199, 1997.

SCHINDLER, P. W.; FURST, B.; DICK, R.; et al. Ligand properties of surface silanol groups. I. Surface complex formation with  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{3+}$ , and  $\text{Pb}^{2+}$ . **Journal of Colloid and Interface Science**, Amsterdam, v. 55, p. 469, 1976.

SCHULTHESS, C. P.; TOKUNAGA, Y. Metal and pH effects on adsorption of poly (vinilalcohol) by silicon oxide. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 60, p. 92, 1996.

SIEVER, R.; WOODFORD, N. Sorption of silica by clay minerals. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, Hamilton, v. 37, p. 1851–1880, 1973.

SINGH, K. P.; SARKAR, M. C. Phosphorus availability in soil as affected by fertilizer phosphorus, sodium silicate and farm yard manure. **Journal of the Indian Society of Soil Science**, Nova Delhi v. 40, p. 762 – 767, 1992.

SNYDER, G. H.; MATICHENKOV, V. V.; DATNOFF, L. E. (2007) Silicon. In: BARKER, A. V.; PILBEAM, D. J.; (Eds.). **Handbook of plant nutrition**. Taylor and Francis Group/CRC Press, Boca Raton, p. 551–565. 2007.

SNYDER, G. H.; JONES, D. B.; GASCHO, G. J. Silicon fertilization of rice on Everglades Histosols. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.50, p. 1259–1263, 1986.

SONG, Z.; WANG, H.; STRONG, P. J.; et al. Increase of available silicon by Si-rich manure for sustainable rice production. **Agronomy for sustainable development**, Paris, doi:10.1007/s13593-013-0202-5, 2013.

STREET-PERROTT, F. A.; BARKER, P. Biogenic silica: a neglected component of the coupled global continental biogeochemical cycles of carbon and silicon. **Earth surface processes and landforms**, Sussex, v. 33, p. 1436–1457, 2008.

SU, Y. H., MCGRATH, S. P., ZHAO, F. J. Rice is more efficient in arsenite uptake and translocation than wheat and barley. **Plant Soil**, S. l., v. 328, p. 27–34, 2009

TAKAHASHI, Y., MINAMIKAWA, R., HATTORI, K. H., KURISHIMA, K., KIHOU, N., YUITA, K. Arsenic behavior in paddy fields during the cycle of flooded and non-flooded periods. **Environmental science & technology (Washington). News & research notes**, Washington, v.38, p. 1038–1044, 2004.

TAKAHASHI, E. Uptake mode and physiological functions of silica. In: SCIENCE OF THE RICE PLANT: PHYSIOLOGY. **Food and Agriculture Policy Research Center**, v.2, p. 420 – 433, 1240p., 1996.

TAKAHASHI, E. Uptake mode and physiological functions of silica. In: MATSUO, T.; KUMAZAWA, K.; ISHI, R.; et al. (Eds). **Science of the rice plant: physiology**. Tokyo: Food and Agriculture Policy Research Center, 1995. cap. 5, p. 420 – 433.

TAKAHASHI, K. Effects of slags on the growth and the silicon uptake by rice plants and the available silicates in paddy soils. **Bulletin of the Shikoku Agricultural Experiment Station**, Kagawa, v. 38, p. 75–114, 1981.

- TOKUNAGA, Y. Potassium silicate: a slow release potassium fertilizer. **Fertilizer Research**, Dordrecht, v.30, p.55, 1991.
- TUBAÑA, B. S.; HECKMAN, J. R. Silicon in Soils and Plants. In: RODRIGUES, F. A.; DATNOFF, L. E. (Eds.). **Silicon and Plant Diseases**. Springer, p. 8 -51. 2015.
- TUBAÑA, B.; NARAYANASWAMY, C.; DATNOFF, L. E.; et al. Changes in pH and extractable nutrients of selected soils from the Midwest and South USA as influenced by different rates of iron calcium silicate slag. ASA-CSSA-SSSA International Annual Meetings, Cincinnati, 21–24 Oct, 2012.
- UNICA - UNIAO AGROINDUSTRIA CANAVIEIRA DE SAO PAULO. **Estatísticas. São Paulo: União da Agroindústria Canavieira de São Paulo**, 2006. Disponível em <<http://www.portalunica.com.br/acao/cana.jsp>>. Acesso: em 12 set. 2013.
- VOLKOVA, V. V. Silicate content in soil solutions and natural waters of the Russian plain. In: KOVDA, V. A. (Ed.). **Pedological and biogeocenotic research of the Russian lowland centre**. Nauka Publication, Moscow. 1980.
- WANG, X., PENG, B., TAN, C., MA, L., AND RATHINASABAPATHI, B. Recent advances in arsenic bioavailability, transport, and speciation in rice. **Environ. Sci. Pollut. Res. Int.**, S. 1., v. 22, p. 5742–5750, 2015.
- WEAST, R. C.; AASTLE, M. J.; BEYER, W. H. **Handbook of chemistry and physics**, 65th ed. Boca Raton: CRC Press. 1985.
- WEDEPOHL, K. H. The composition of the continental crust. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, Hamilton, v. 59, p. 1217–1232, 1995.
- WILLIAMS, P. N., VILLADA, A., DEACON, C., RAAB, A., FIGUEROLA, J., GREEN, A. J., FELDMANN, J., MEHARG, A. A. Greatly enhanced arsenic shoot assimilation in rice leads to elevated grain levels compared to wheat and barley. **Environmental science & technology (Washington). News & research notes**, Washington, v. 41, p. 6854–6859, 2007.
- WORDATLAS. **Top Sugarcane Producing Countries**. Disponível em: <<http://www.worldatlas.com/articles/top-sugarcane-producing-countries.html>>. Acesso em: 28. Dez. 2016.
- XU, X. Y., MCGRATH, S. P., MEHARG, A. A., ZHAO, F. J. Growing rice aerobically markedly decreases arsenic accumulation. **Environmental science & technology. News & research notes**, Washington, 42, 5574 – 5579, 2008.

## CAPÍTULO 1 – Eficiência da fluorita com óxido de silício na produção de cana-de-açúcar

### RESUMO

SANTOS, GUSTAVO ALVES. **Eficiência da fluorita com óxido de silício na produção de cana-de-açúcar**. 2017. 47 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.<sup>1</sup>

A cana-de-açúcar apresenta elevada extração de Si do solo o que também é um fator de redução dos teores de Si disponível nos solos de Cerrado, situação essa que pode limitar a produção ou gerar respostas favoráveis à adubação com Si. O estudo teve o objetivo de avaliar a eficiência agrônômica da fluorita com óxido de silício como fertilizante para cana-de-açúcar, e seu potencial uso na agricultura. O experimento foi instalado em delineamento de blocos casualizados, com quatro repetições e em esquema fatorial  $2 \times 3 + 1$  sendo duas fontes de Si (AgroSilício<sup>®</sup> contendo 10,7% de Si total e a fluorita com óxido de silício contendo 9,1% de Si total), três doses (0,5, 1 e 2 t ha<sup>-1</sup>) e a testemunha sem aplicação de Si. As parcelas compostas por cinco linhas de 10 m de comprimento espaçadas 1,5 m foram alocadas em área de solo com baixo teor de Si. A aplicação dos tratamentos foi realizada na data do plantio, manualmente, a lanço em área total, após a abertura dos sulcos e antes da distribuição dos toletes (variedade RB 867515), em abril de 2014, sendo o experimento conduzido durante os 2 anos seguintes. Para cana planta e cana soca foram avaliadas as concentrações foliares de Si, Ca, Mg e P, a produção de colmos, o Pol da cana, a produção de açúcar e a disponibilidade de Si, Ca, Mg e P, além o pH do solo. Para todos os resultados foram testadas normalidade dos resíduos, homogeneidade das variâncias e efeitos aditivos entre os blocos pelos testes de Tukey, Shapiro-Wilk e Levene, respectivamente ( $P > 0,01$ ). A comparação entre os produtos foi feita mediante análise de variância e, em caso de significância do teste de F as médias foram comparadas entre si pelo teste de Tukey ( $P < 0,1$ ) e com a testemunha pelo teste de Dunnett ( $P < 0,05$ ) e a comparação entre doses foi feita por meio de regressões ( $P < 0,1$ ). A fluorita com óxido de silício e o AgroSilício<sup>®</sup> apresentaram comportamento semelhante quanto à disponibilização de Si, Ca, Mg e P no solo, sem alterarem em larga escala o pH do mesmo e com incrementos no teor de Si na camada de 0 a 25 cm em função do aumento da dose aplicada. Em cana planta, a concentração de Si foliar foi maior nos tratamentos onde houve aplicação desse via solo, e aumentou com o aumento da dose de Si aplicada, independentemente da fonte. A aplicação da fluorita com óxido de silício resultou em maior concentração foliar de Ca, Mg e P. A aplicação de 1,0 t ha<sup>-1</sup> da fluorita com óxido de silício aumentou em 20% a produção de colmos e de açúcar em cana planta em relação à testemunha. A produção acumulada não diferiu entre as fontes, porém o TCH aumentou linearmente com o aumento da dose de Si aplicada enquanto o TAH apresentou comportamento quadrático, com incrementos até a dose estimada de 1,5 t ha<sup>-1</sup>. A fluorita com óxido de silício apresenta potencial de utilização como fertilizante para a cultura da cana-de-açúcar.

**Palavras-chave:** ácido hexaflúorsilícico, produção de colmos, produção de açúcar, *Saccharum officinarum* L., silício.

---

<sup>1</sup>Comitê Orientador: Gaspar Henrique Korndörfer – UFU (Orientador) e Hamilton Seron Pereira – UFU (Co-orientador).

## ABSTRACT

SANTOS, GUSTAVO ALVES. **Fluorite with silicon oxide efficacy for sugarcane production**. 2017. 47 p. Thesis (Doctorate in Agronomy) - Federal University of Uberlândia.<sup>2</sup>

Sugarcane presents high demand for soil Si and this is also a factor that can cause reduction of soil Si levels in Cerrado areas. This situation can be responsible for yield reduction or can generate favorable results for Si fertilization. This study evaluated the agronomic efficacy of fluorite with silicon oxide as a fertilizer for sugarcane and its potential use in agriculture. The experiment was done in a randomized complete block design with four replications and treatments in a  $2 \times 3 + 1$  factorial arrangement, with two Si sources (AgroSilício<sup>®</sup> containing 10.7% total Si and fluorite with silicon oxide containing 9.1% total Si), three rates (0.5, 1 and 2 t ha<sup>-1</sup>) and a control treatment without Si application. Treatments were applied on plots containing five 10-m long rows with 1.5 m between them, located in an area of low soil Si. Treatments were broadcast applied at planting, manually, after furrow opening and before billet (RB 867515 variety) distribution, in April 2014. The experiment was conducted for two years. Leaf Si, Ca, Mg and P content, cane yield, sucrose content, sugar yield, soil Si, Ca, Mg and P availability and soil pH were analyzed for plant and ratoon cane. For all the results were tested the residue normality, variance homogeneity and block addictivity using Tukey's, Shapiro-Wilk's and Levene's ( $P > 0.01$ ) tests. The comparison between sources was done using variance analysis and, in case of significance, the averages were compared by Tukey's test ( $P < 0.1$ ) and to the control treatment using Dunnett's ( $P < 0.05$ ) test, and regressions were used for rate comparison ( $P < 0.1$ ). Fluorite with silicon oxide and AgroSilício<sup>®</sup> presented similar behavior related to the soil availability of Si, Ca, Mg and P, with no large changes on soil pH and increasing soil Si on 0 to 25 cm depth according to the increasing doses. Foliar Si content in plant cane was greater on treatments receiving Si application and it increased as Si rate increased, regardless of Si source. Fluorite with silicon oxide application resulted in greater foliar Ca, Mg and P contents. Application of 1.0 t ha<sup>-1</sup> of fluorite with silicon oxide increased cane and sugar yield for plant cane by 20%, in comparison with the control treatment. Accumulated yield had no difference between sources, but cane yield increased linearly with increasing Si rate, while sugar yield presented a quadratic response, with increments until 1.5 t ha<sup>-1</sup>. Fluorite with silicon oxide presents potential of use as fertilizer for sugarcane.

**Keywords:** cane yield, hexafluorsilicic acid, *Saccharum officinarum* L., silicon, sugar yield.

---

<sup>2</sup>Supervising Committee: Gaspar Henrique Korndörfer – UFU (Supervisor) and Hamilton Seron Pereira (Co-supervisor).

## 1 INTRODUÇÃO

O Cerrado possui uma área superior a dois milhões de quilômetros quadrados, ou seja, aproximadamente 22% do território nacional, o que o torna o segundo maior bioma brasileiro, somente superado pela Amazônia. Esse bioma ocupa a área central do Brasil, englobando o estado de Goiás e parte dos estados de Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, Bahia, Piauí, Maranhão, Tocantins, Pará e Rondônia (SANO et al, 2008; SANO; FERREIRA, 2005; KLINK; MACHADO, 2005; SHIKI, 1997).

A classe de solos predominante no Cerrado é a dos latossolos, estando esses presentes em 46% da área do bioma. Estes tipos de solo se caracterizam, principalmente, pela baixa fertilidade natural, alta acidez (CUNHA, 1994) e presença de fração argilosa formada praticamente de caulinita e óxidos de ferro e alumínio, consequências do elevado grau de intemperismo ao qual foram submetidos, implicando em perda não só de bases trocáveis, mas também de Si disponível (NOVAIS et al., 2007), fenômeno esse conhecido como dessilicatização ou dessilificação.

Nos solos do Cerrado, pelo fato do intemperismo ser muito acentuado, a taxa de dessilificação do solo também é intensa (KORNDÖRFER et al., 2006) e, esse grau de dessilificação, segundo Savant et al. (1997) é um dos fatores que, juntamente com a baixa cinética de dissolução do Si no solo e sua adsorção pelos sesquióxidos presentes, podem estar envolvidos na baixa solubilidade do Si em solos de Cerrado. Solos assim, de clima tropical e altamente intemperizados, onde os minerais primários contendo Si já não existem mais, apresentam em alguns casos teores de Si menores que  $2 \text{ mg dm}^{-3}$  (KORNDÖRFER, DATNOFF, 1995), os quais podem ser 5 a 10 vezes menores que os observados em solos de regiões temperadas (McKEAGUE; CLINE, 1963).

Embora até a década de 70 o solo do Cerrado tenha sido considerado praticamente impróprio para o cultivo agrícola devido às características químicas desfavoráveis, a possibilidade de se corrigir a acidez e a baixa fertilidade com o uso adequado de corretivos e fertilizantes bem como suas boas características físicas, tais como profundidade, ótima drenagem, relevo plano ou levemente ondulado e resistência à compactação, o que lhe permite uso intensivo de mecanização, fazem do Cerrado hoje uma das áreas agricultáveis mais importantes do Brasil (NOVAIS et al., 2007; CUNHA, 1994; ABELSON; ROWE, 1987).

Uma das maneiras de se corrigir a acidez e a baixa fertilidade é com a aplicação de silicatos, os quais possuem efeito corretivo (ALCARDE, 1992) e causam, como resposta à sua aplicação no solo, aumento do pH, da saturação por bases e redução da

saturação por alumínio (KORNDÖRFER, 2007), além do fornecimento de Si, Ca, Mg e micronutrientes (DEREN, 2001; QUEIROZ, 2003).

Valendo-se das estratégias que possibilitaram o desenvolvimento da agricultura no Cerrado, uma das culturas que hoje faz parte desse contexto é a cana-de-açúcar que, mesmo com a produção consolidada praticamente na região Sudeste, já ocupa cerca de 21 milhões de hectares em áreas de Cerrado (SANO et al., 2008) e aponta como uma das áreas preferenciais para expansão a região Centro-Oeste, onde se concentra grande parte desse bioma (MYERS et al., 2000). Castro et al. (2010) cita que a evolução da cultura da cana no Brasil apresenta expansão em direção ao norte do Cerrado, priorizando terras com diferentes aptidões cujas restrições podem ser superadas por técnicas de manejo adequadas.

A relação da cultura da cana com os solos de Cerrado e o teor de Si dos mesmos está no fato de que é elevada a extração de Si do solo por parte dessa cultura ao longo dos ciclos consecutivos, o que também gera redução dos teores de Si disponível nos solos podendo, em situações de disponibilidade muito baixa, limitar a produção. No entanto, em solos pobres nesse elemento a cultura da cana responde favoravelmente à adubação com Si, como comprovado em experimentos de campo conduzidos no Brasil, principalmente em solos arenosos, os quais têm demonstrado resultados bastante consistentes com relação ao efeito do Si em cana-de-açúcar (CAMARGO, 2011, KORNDÖRFER et al., 2002).

Muitos produtos têm sido utilizados como fonte de Si para a agricultura, tais como subprodutos da produção de metais como aço e ferro e também aqueles resultantes da produção de fertilizantes fosfatados por exemplo. Nesse caso, o processo de acidulação das rochas fosfáticas por ácido sulfúrico gera ácido hexaflúorsilícico ( $H_2SiF_6$ ) como subproduto, o qual tem sido motivo de preocupação na indústria de fertilizantes pois vários métodos tem sido testados para a remoção do flúor (F) desse material (ISLAM; PATEL, 2007; SAHA, 1993), no entanto, tais estratégias não conseguem recuperar esse elemento como um produto industrial com valor agregado, o que tem despertado na indústria de produção de fertilizante fosfatado, o interesse por alternativas inovadoras e sustentáveis para utilização desse subproduto (VALE, 2016).

A neutralização do  $H_2SiF_6$  com óxido de cálcio (CaO) é um campo que apresenta potencial de resultados positivos, porém ainda é pouco explorado, apesar de se saber que esse processo resulta num precipitado composto por fluorita e óxido de silício (VALE, 2016), o qual se caracteriza também como um subproduto denominado AgroSiCa.

Esse subproduto apresenta grande potencial de uso na agricultura (VALE, 2016) por apresentar em sua composição química os nutrientes Ca, Si, Mg e P, todos elementos essenciais para as plantas, com exceção do Si que é considerado um nutriente benéfico e também pela possibilidade de, em áreas de solo tropical, o F poder reduzir a fixação de P e a alta saturação de Al, gerando, através de complexação, formas menos tóxicas (WHITTEN; RITCHIE, 1991; XIE et al., 1999).

Todos esses benefícios são importantes e embasam o processo de neutralização do  $\text{H}_2\text{SiF}_6$  proveniente da indústria de fertilizantes fosfatados com o CaO para a produção de um subproduto benéfico e com potencial de utilização agrícola (VALE, 2016).

Nesse contexto, o presente trabalho teve como intuito avaliar o potencial de uso do produto AgroSiCa na agricultura e sua eficiência como fertilizante para a cultura da cana-de-açúcar, analisando a disponibilização de nutrientes no solo quando provenientes dessa fonte, a absorção de tais nutrientes pela cultura e o efeito da sua aplicação sobre a produção e qualidade da matéria-prima cana-de-açúcar.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Caracterização das fontes de silício

Para esse estudo foram utilizadas duas fontes de Si: AgroSilício<sup>®</sup> e fluorita com óxido de silício, denominado AgroSiCa. A primeira fonte (AgroSilício<sup>®</sup>) apresenta registro junto ao Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) para ser utilizada como corretivo da acidez do solo e/ou fonte de Si para as plantas sendo utilizada em lavouras comerciais e apresentando eficiência agronômica comprovada, sendo por essa razão, a fonte padrão do estudo.

Como principais características químicas do produto AgroSilício<sup>®</sup> pode-se citar a sua origem a partir do processo de fabricação de aço inox, a presença de Si (10,7 % Si total e 6,1 % Si solúvel), Ca (25,7 %), Mg (6,6 %) e, conseqüentemente, poder corretivo (PN = 91,9 % e PRNT = 78,2 %), a ausência de metais pesados em sua composição por consequência do processo de desmetalização ao qual é submetido, que separa esses metais dos silicatos de cálcio e magnésio. A caracterização química completa do produto AgroSilício<sup>®</sup> está apresentada na Tabela 1A (ANEXO A). Dentre as características físicas do produto, a principal informação é sua granulometria de 300 mesh.

O produto AgroSiCa (CaSiF<sub>6</sub>) ou fluorita com óxido de silício, apresenta a fluorita (CaF<sub>2</sub>) como o principal componente cristalino da fase sólida e contém também Ca, F, Si e O, sendo o Ca mais associado ao F e o Si mais associado ao O (VALE, 2016). Sua reação de obtenção (neutralização do H<sub>2</sub>SiF<sub>6</sub> com CaO) foi realizada em escalas de bancada e piloto em unidades industriais da empresa Vale Fertilizantes. Os principais constituintes químicos dessa fonte estão apresentados na tabela abaixo (Tabela 1) e as demais características aparecem na Tabela 2A (ANEXO A).

Tabela 1. Caracterização química do produto AgroSiCa.

----- P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -----			----- Si -----		Ca <sup>1</sup>	Mg <sup>1</sup>
Total	CNA + água	Ác. Cítrico	Total <sup>2</sup>	Solúvel <sup>3</sup>		
----- % -----						
0,2	0,2	0,3	9,1	3,6	22,1	0,5
----- Fluoreto -----					PN	PRNT
HCl	CNA	Ác. Cítrico	Água			
----- % -----						
17,6	0,3	0,3	0,02		11,5	9,5

<sup>1</sup>Extração ácida HCl concentrado; <sup>2</sup>Si total extraído com HCl + HF concentrados; <sup>3</sup>Si Solúvel extraído com Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 10 g L<sup>-1</sup> + NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 16 g L<sup>-1</sup>.

Fonte: Vale, 2016.

## 2.2. Delineamento experimental

O experimento foi montado em delineamento experimental de blocos casualizados, com quatro repetições e em esquema fatorial  $2 \times 3 + 1$  sendo duas fontes de Si (AgroSilício<sup>®</sup> e AgroSiCa), três doses (0,5, 1,0 e 2,0 t ha<sup>-1</sup>), mais um tratamento adicional sem a aplicação de Si (Tabela 2).

Tabela 2. Quantidade de nutrientes fornecidas ao solo em cada tratamento.

Dose t ha <sup>-1</sup>	AgroSiCa			AgroSilício <sup>®</sup>			
	Si	Ca	Mg	Si	Ca	Mg	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
0	0	0	0	0	0	0	0
0,5	45,5	110	2,5	53,5	129	33	1,5
1,0	91	220	5	107	257	66	3
2,0	182	440	10	214	514	132	6

As parcelas experimentais foram compostas por cinco linhas de cana com 10 m de comprimento espaçadas 1,5 m entre si, totalizando assim 75 m<sup>2</sup> de área por parcela. Entre as parcelas foram adotados espaços de 2 m nas cabeceiras e 3 m (1 sulco) nas laterais, sem cana distribuída.

## 2.3 Instalação

O experimento para estudo do uso de Si em cana-de-açúcar em solos de Cerrado foi instalado em parceria com a Companhia Mineira de Açúcar e Álcool (CMAA), em área produção comercial, com plantio de expansão (Fazenda Santa Fé do Cedro) localizada no município de Uberaba-MG (Figura 1).



Figura 1. Vista da imagem de satélite da área próxima à área de instalação do experimento. Fazenda Santa Fé do Cedro, Uberaba, MG.

O solo da área é classificado como LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico (LVAd) (EMBRAPA, 2009), textura média (17 % de argila), com 3,1 e 3,3 mg dm<sup>-3</sup> de Si extraído em CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup> (KORNDÖRFER et al., 2004) nas camadas de 0 a 20 e de 20 a 40 cm de profundidade, respectivamente, e ambiente de produção D, ou seja, com potencial de produtividade entre médio e baixo. Sua caracterização química e física detalhada está apresentada em anexo (Tabela 1B e Tabela 2B, ANEXO B).

A correção do solo da área foi feita mediante a aplicação de 5,3 t ha<sup>-1</sup> de calcário (com 28 % de CaO, 18 % de MgO, PRNT = 93 %) e 1,0 t ha<sup>-1</sup> de gesso incorporados com arado de aiveca a 40 cm de profundidade. O plantio do canavial foi realizado em abril de 2014, manualmente, com a distribuição de duas canas, variedade RB867515, por sulco e posterior picação. A adubação de plantio utilizada foi 380 kg ha<sup>-1</sup> do formulado 6-30-10 + 1 % Mn + 0,8 % Zn.

A aplicação dos tratamentos foi realizada na data do plantio, manualmente, a lanço em toda a área da parcela, após a abertura dos sulcos e antes do plantio da cana, conforme apresentado nas figuras abaixo (Figura 2).



Figura 2. Detalhe da área de aplicação dos tratamentos (AgroSiCa, 2,0 t ha<sup>-1</sup>). Aplicação em área total da parcela, após sulcação (sulcos de 35 cm de profundidade, aproximadamente) e antes do plantio.

## 2.4 Condução

O experimento foi conduzido de 2014 a 2015 (primeiro ano, cana planta) e de 2015 a 2016 (segundo ano, cana soca). A condução e manutenção do experimento, ou

seja, o controle fitossanitário, a realização de adubações complementares e afins, foram realizados pela equipe da usina, de acordo com o manejo recomendado para a área, considerando que não houvesse interferência nos tratamentos.

## 2.5 Avaliações

Aos 287 dias após o plantio (DAP) (Janeiro/2015), para as avaliações em cana planta e aos 669 DAP (Fevereiro/2016) para cana soca foram coletadas amostras de folha, duas folhas do TVD (Top Visible Dewlap) por linha, em todas as linhas da parcela, as quais foram submetidas à análise de Si seguindo metodologia descrita por Korndörfer et al. (2004) e de Ca, Mg e P seguindo metodologia descrita pela EMBRAPA (2000).

A colheita da cana planta (primeiro corte) foi realizada 375 DAP (Abril/2015) cortando-se, manualmente, seis metros lineares, sem falha, das três linhas centrais da parcela. Foram desprezadas as duas linhas das extremidades e dois metros no começo e final de cada linha, o que totalizou 27 m<sup>2</sup> de área útil por parcela.

A colheita da primeira soca (segundo corte), por sua vez, foi feita 424 dias após a primeira colheita (Junho/2016) e, também manualmente foram cortados dois metros lineares, sem falha, das três linhas centrais da parcela, desprezando-se novamente as duas linhas das extremidades e quatro metros no começo e final de cada linha, totalizando assim 9 m<sup>2</sup> de área útil em cada parcela.

Após cada um dos cortes, a cana foi despontada (corte na altura do palmito) e despalhada, em seguida, pesada com o auxílio de balança de mão. O peso de colmos obtido foi extrapolado para t ha<sup>-1</sup>, resultando nos valores de TCH (toneladas de colmo por hectare).

Para a realização das análises tecnológicas, foram amostrados, aleatoriamente, 10 colmos dentre os cortados para a pesagem. O material coletado foi submetido à análise tecnológica no laboratório da usina, segundo metodologia descrita por CONSECANA (2006), a qual gerou resultados de Pol da cana (%).

Utilizando-se os resultados de produção de colmos por hectare (TCH) e os valores de Pol da cana (%) foram calculados os valores de produção de açúcar por hectare (TAH) de cada um dos tratamentos.

Na data de cada colheita foram coletadas também amostras de solo nas profundidades de 0 a 25 e 25 a 50 cm de profundidade. As coletas foram feitas com o auxílio de um amostrador de solo, amostrando-se um ponto em cada uma das três linhas centrais, formando assim uma amostra composta por parcela. As amostras de solo

coletadas foram então submetidas à análise de Si (extraído com  $\text{CaCl}_2$  0,01 mol  $\text{L}^{-1}$ ) no solo segundo metodologia descrita por Korndörfer et al. (2004) e de pH ( $\text{CaCl}_2$  0,01 mol  $\text{L}^{-1}$ ),  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , e P (Mehlich-1) seguindo metodologia descrita pela EMBRAPA (2000).

## **2.6 Análises estatísticas**

Inicialmente foram testadas as pressuposições do modelo, ou seja, a existência de normalidade dos resíduos, homogeneidade das variâncias e efeitos aditivos entre os blocos pelos testes de Tukey, Shapiro-Wilk e Levene, respectivamente, todos a 0,01 de significância, utilizando-se o programa SPSS 17.0 (SPSS, 2008).

Com o auxílio do programa estatístico ASSISTAT (SILVA; AZEVEDO, 2002) a comparação entre os produtos foi feita mediante análise de variância e, em caso de significância do teste de F as médias foram comparadas entre si pelo teste de Tukey e com a testemunha pelo teste de Dunnett a 0,1 e 0,05 de significância, respectivamente.

O estudo das doses foi também realizado a partir de análise variância, e somente em caso de significância do teste de F, foram feitas as regressões (0,1 de significância) que constam nos gráficos apresentados nos resultados. Para essa análise utilizou-se o programa estatístico SISVAR (FERREIRA, 2008).

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Teores de Si, pH, Ca, Mg e P no solo

A aplicação do AgroSiCa nas doses de 0,5 e 2,0 t ha<sup>-1</sup>, assim como o uso do produto AgroSilício<sup>®</sup> nas duas maiores doses (1,0 e 2,0 t ha<sup>-1</sup>) resultaram em teores de Si disponível no solo superiores ao da testemunha sem aplicação de Si, cujo resultado foi de 4,1 mg dm<sup>-3</sup> (Tabela 3). Ainda para essa camada do perfil, observou-se maior disponibilização de Si proveniente do produto AgroSiCa, em relação ao AgroSilício<sup>®</sup>, ambos aplicados na menor dose (0,5 t ha<sup>-1</sup>), sendo essa diferença 22 % maior (Tabela 3).

Tabela 3. Teores de Si disponível (extraído com CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup>) no solo nas camadas de 0-25 e 25-50 cm, 375 dias após a aplicação via solo de doses crescentes de fontes de Si no plantio (Cana planta, 2015).

Dose do produto t ha <sup>-1</sup>	Si no solo <sup>(1)</sup>					
	0 - 25 cm			25 - 50 cm		
	AgroSiCa	AgroSilício <sup>®</sup>	Média	AgroSiCa	AgroSilício <sup>®</sup>	Média
	mg dm <sup>-3</sup>					
0	4,1			3,6		
0,5	6,1* a	5,0 b	5,5	4,3	4,9	4,6
1,0	5,2 a	6,2* a	5,7	4,2	4,8	4,5
2,0	6,1* a	6,9* a	6,5	4,5	5,5*	5,0
Média	5,8	6,0		4,3 b	5,1 a	

0-25 cm: <sup>(2)</sup> W = **0,98**; F<sub>Levene</sub> = **0,43**; F<sub>Tukey</sub> = **1,35**; CV (%) = 13,9; DMS<sub>Tukey</sub> = 1,2; DMS<sub>Dunnett</sub> = 1,6.  
 25-50 cm: <sup>(2)</sup> W = **0,97**; F<sub>Levene</sub> = **0,95**; F<sub>Tukey</sub> = **1,07**; CV (%) = 15,6; DMS<sub>Tukey</sub> = 0,6; DMS<sub>Dunnett</sub> = 1,4.

<sup>(1)</sup> Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,1 de significância. \*significativo em relação à testemunha pelo teste de Dunnett a 0,05 de significância. <sup>(2)</sup> W, F<sub>Levene</sub> e F<sub>Tukey</sub>: estatística dos testes de Shapiro-Wilk, Levene e Tukey para aditividade respectivamente (0,01 de significância); valores em negrito indicam respectivamente resíduos com distribuição normal, variâncias homogêneas e blocos com efeitos aditivos.

De 25 a 50 cm de profundidade, a maior disponibilização de Si no solo se deu em resposta à aplicação de 2,0 t ha<sup>-1</sup> de AgroSilício<sup>®</sup>, o que resultou em 5,5 mg dm<sup>-3</sup> de Si no solo, sendo esse o único estatisticamente superior à testemunha (Tabela 3).

Na comparação entre fontes, o AgroSilício<sup>®</sup> se mostrou superior à fonte teste (AgroSiCa) apresentando teor médio de Si disponível no solo igual a 5,1 mg dm<sup>-3</sup>, o que é superior aos 4,3 mg dm<sup>-3</sup> obtidos pela aplicação da fluorita com óxido de silício (Tabela 3).

O estudo de doses mostra que, de 0 a 25 cm as duas fontes se comportam de maneira semelhante, disponibilizando maior quantidade de Si no solo à medida que se aumenta a dose aplicada (Figura 3A). No entanto, o incremento no teor de Si no solo por

tonelada de produto aplicada é duas vezes maior para o AgroSilício<sup>®</sup> em relação ao AgroSiCa (Figura 3A).

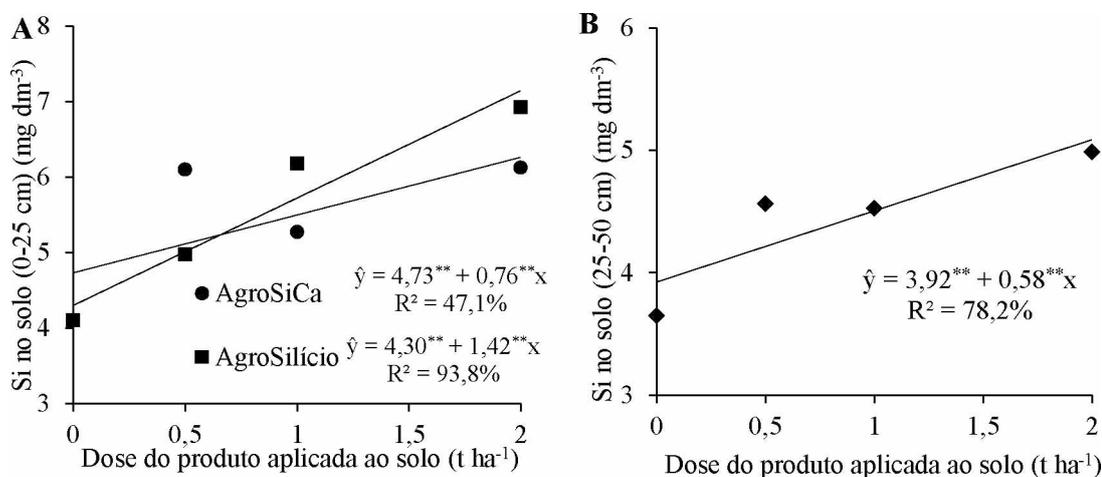


Figura 3. Teores de Si disponível (extraído com CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup>) no solo nas profundidades de 0 a 25 cm (A) e 25 a 50 cm (média das duas fontes) (B), 375 dias após a aplicação via solo de doses crescentes de fontes de Si no plantio (Cana planta, 2015).

Para a profundidade de 25 a 50 cm, os dois produtos apresentam novamente comportamento semelhante, porém nesse caso não há diferença entre os incrementos obtidos, isto é, para as duas fontes de Si, para cada tonelada aplicada aumenta-se aproximadamente 0,6 mg dm<sup>-3</sup> o teor de Si no solo (Figura 3B).

Esse aumento no teor de Si disponível no solo de 25 a 50 cm de profundidade certamente está relacionado à aplicação das fontes de Si ter sido feita após a sulcação, o que fez com que o produto ficasse distribuído em profundidades maiores, isto é, abaixo da camada de 0 a 20 cm.

O aumento de Si disponível no solo em resposta à aplicação da fluorita com óxido de silício está de acordo com o resultado encontrado por Vale (2016) que, avaliando o efeito da aplicação de quatro doses do produto AgroSiCa em 3 tipos de solo, obteve aumento significativo nos teores de Si na solução do solo, o que lhe permitiu afirmar que essa fonte de Si é solúvel e eficiente na liberação do elemento.

Os resultados de Si disponível no solo para o segundo ano após a aplicação dos produtos (cana soca) não mostram diferença entre as fontes de Si ou doses, o que ocorre tanto 0 a 25 cm quanto para 25 a 50 cm de profundidade (Tabela 4).

Tabela 4. Teores de Si disponível (extraído com  $\text{CaCl}_2$  0,01 mol L<sup>-1</sup>) no solo nas camadas de 0-25 e 25-50 cm, 799 dias após a aplicação via solo de doses crescentes de fontes de Si no plantio (Cana soca, 2016).

Dose do produto t ha <sup>-1</sup>	Si no solo <sup>(1)</sup>					
	----- 0 - 25 cm -----			----- 25 - 50 cm -----		
	AgroSiCa	AgroSilício <sup>®</sup>	Média	AgroSiCa	AgroSilício <sup>®</sup>	Média
0	----- mg dm <sup>-3</sup> -----			-----		
0	5,8			4,3		
0,5	5,8	5,1	5,4	5,3	4,6	4,9
1,0	5,3	5,8	5,6	4,4	4,5	4,5
2,0	5,9	5,3	5,6	4,7	4,8	4,8
Média	5,6 a	5,4 a		4,8 a	4,6 a	

0-25 cm: <sup>(2)</sup> W= **0,98**; F<sub>Levene</sub> = **3,49**; F<sub>Tukey</sub> = **0,18**; CV (%) = 15,9; DMS<sub>Tukey</sub> = 0,8; DMS<sub>Dunnnett</sub> = 1,8.

25-50 cm: <sup>(2)</sup> W= **0,96**; F<sub>Levene</sub> = **2,27**; F<sub>Tukey</sub> = **0,003**; CV (%) = 10,9; DMS<sub>Tukey</sub> = 0,4; DMS<sub>Dunnnett</sub> = 1,0.

<sup>(1)</sup> Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,1 de significância. \*significativo em relação à testemunha pelo teste de Dunnnett a 0,05 de significância. <sup>(2)</sup> W, F<sub>Levene</sub> e F<sub>Tukey</sub>: estatística dos testes de Shapiro-Wilk, Levene e Tukey para aditividade respectivamente (0,01 de significância); valores em negrito indicam respectivamente resíduos com distribuição normal, variâncias homogêneas e blocos com efeitos aditivos.

O aumento nos teores de Si disponível no solo com maior intensidade na profundidade de 0 a 25 cm, se assemelha ao resultado obtido por Sobral et al., (2011) que, avaliando a aplicação de agregados siderúrgicos em solos cultivados com cana-de-açúcar, encontraram incremento significativo nos teores de Si disponível no solo na profundidade de 0 a 20 cm mas não na camada de 20 a 40 cm.

Raij; Camargo (1973) encontraram teores de Si extraível com  $\text{CaCl}_2$  0,0025 mol L<sup>-1</sup>, variando de 1 a 43 mg dm<sup>-3</sup> e Korndörfer et al. (1999) mostraram que a aplicação de silicato de cálcio resultou em incrementos nas quantidades de Si disponível em quatro solos, sendo a de 3,2 a 22,9 mg dm<sup>-3</sup> a variação na quantidade extraída. Assim, considerando o valor máximo de Si de 6,9 mg dm<sup>-3</sup> encontrado nesse estudo, pode-se inferir que a disponibilidade de Si nesse solo é relativamente baixa, o que se explica pelas próprias características de formação (intemperismo, por exemplo), químicas e físicas do solo da área de instalação do experimento.

Em solos cujo teor de Si disponível é inferior à 8 mg dm<sup>-3</sup>, segundo Korndörfer et al. (1999 e 2001), existem maiores chances de resposta à aplicação de silicatos. Korndörfer et al. (1999) citam também que em solos com baixos teores de Si disponível, a adubação com silicato de cálcio ( $\text{CaSiO}_3$ ) pode melhorar as características químicas do solo, dentre elas a própria disponibilidade do Si.

De maneira geral, os incrementos no teor de Si disponível no solo são baixos considerando que as quantidades aplicadas equivalem desde 23 até 107 mg dm<sup>-3</sup> (Tabela

2) porém atingem valores máximos inferiores a 7,0 mg dm<sup>-3</sup>, o que torna passível de questionamento a eficiência dos produtos e/ou do método de análise utilizado.

Os resultados de pH do solo não variaram em função do tratamentos, não havendo diferenças entre a aplicação dos silicatos e a testemunha, nem entre as médias dos produtos (Tabela 5 e Tabela 6).

Tabela 5. Valores de pH do solo (determinado em CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup>) nas camadas de 0-25 e 25-50 cm, 375 dias após a aplicação via solo de doses crescentes de fontes de Si no plantio (Cana planta, 2015).

Dose do produto	pH do solo <sup>(1)</sup>					
	0 - 25 cm			25 - 50 cm		
	AgroSiCa	AgroSilício <sup>®</sup>	Média	AgroSiCa	AgroSilício <sup>®</sup>	Média
t ha <sup>-1</sup>						
0		4,9			4,1	
0,5	4,7	5,0	4,9	4,1	4,1	4,1
1,0	4,5	5,0	4,7	3,9	4,1	4,0
2,0	4,9	4,9	4,9	4,2	4,2	4,2
Média	4,7 a	4,9 a		4,1 a	4,1 a	

0-25 cm: <sup>(2)</sup> W= **0,98**; F<sub>Levene</sub> = **1,57**; F<sub>Tukey</sub> = **0,69**; CV (%) = 9,0; DMS<sub>Tukey</sub> = 0,2; DMS<sub>Dunnett</sub> = 0,9.

25-50 cm: <sup>(2)</sup> W= **0,98**; F<sub>Levene</sub> = **1,16**; F<sub>Tukey</sub> = **0,50**; CV (%) = 6,9; DMS<sub>Tukey</sub> = 0,2; DMS<sub>Dunnett</sub> = 0,6.

<sup>(1)</sup> Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,1 de significância. \*significativo em relação à testemunha pelo teste de Dunnett a 0,05 de significância. <sup>(2)</sup> W, F<sub>Levene</sub> e F<sub>Tukey</sub>: estatística dos testes de Shapiro-Wilk, Levene e Tukey para aditividade respectivamente (0,01 de significância); valores em negrito indicam respectivamente resíduos com distribuição normal, variâncias homogêneas e blocos com efeitos aditivos.

Tabela 6. Valores de pH do solo (determinado em CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup>) nas camadas de 0-25 e 25-50 cm, 799 dias após a aplicação via solo de doses crescentes de fontes de Si no plantio (Cana soca, 2016).

Dose do produto	pH do solo <sup>(1)</sup>					
	0 - 25 cm			25 - 50 cm		
	AgroSiCa	AgroSilício <sup>®</sup>	Média	AgroSiCa	AgroSilício <sup>®</sup>	Média
t ha <sup>-1</sup>						
0		5,2			4,5	
0,5	4,7	5,3	5,0	4,9	5,1	5,0
1,0	5,4	5,3	5,4	5,0	4,9	4,9
2,0	5,5	5,6	5,6	5,3	4,9	5,1
Média	5,2 a	5,4 a		5,1 a	5,0 a	

0-25 cm: <sup>(2)</sup> W= **0,90**; F<sub>Levene</sub> = **2,68**; F<sub>Tukey</sub> = **1,29**; CV (%) = 9,8; DMS<sub>Tukey</sub> = 0,4; DMS<sub>Dunnett</sub> = 1,0.

25-50 cm: <sup>(2)</sup> W= **0,97**; F<sub>Levene</sub> = **0,85**; F<sub>Tukey</sub> = **0,06**; CV (%) = 8,8; DMS<sub>Tukey</sub> = 0,4; DMS<sub>Dunnett</sub> = 0,9.

<sup>(1)</sup> Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,1 de significância. \*significativo em relação à testemunha pelo teste de Dunnett a 0,05 de significância. <sup>(2)</sup> W, F<sub>Levene</sub> e F<sub>Tukey</sub>: estatística dos testes de Shapiro-Wilk, Levene e Tukey para aditividade respectivamente (0,01 de significância); valores em negrito indicam respectivamente resíduos com distribuição normal, variâncias homogêneas e blocos com efeitos aditivos.

Para o primeiro ano, a variação existente de 0 a 25 cm foi de 4,7 a 5,0 (Tabela 5) o que, de acordo com Raij et al. (1997) representam acidez “ALTA” (pH entre 4,4 e 5,0) ao passo que, de 25 a 50 cm os valores de pH entre 3,9 a 4,2 indicam acidez do solo em nível “MUITO ALTO” (pH menor que 4,3) (RAIJ et al., 1997). A melhor classificação da acidez do solo atribuída à primeira camada do perfil, certamente se deve ao maior contato entre o solo e os silicatos, os quais foram aplicados na parede do sulco e portanto, a menos de 35 cm de profundidade.

Já o solo amostrado após o cultivo da cana soca apresentou valores de pH compreendidos entre 4,7 e 5,6 de 0 a 25 cm e entre 4,5 e 5,3 de 25 a 50 cm, respectivamente (Tabela 6). Nesse caso, observa-se que na camada de 0 a 25 cm com a aplicação da menor dose ( $0,5 \text{ t ha}^{-1}$ ) da fluorita com óxido de silício, o solo se manteve com a acidez classificada como “ALTA”, ou seja, em níveis de pH entre 4,4 e 5,0 (RAIJ et al., 1997), ao passo que os demais tratamentos elevaram a mesma para o nível de “MÉDIA” por estarem os valores de pH compreendidos entre 5,1 e 5,5 (RAIJ et al., 1997) (Tabela 6).

Na camada inferior (25 a 50 cm) uma análise semelhante pode ser feita, porém nessa profundidade, a menor dose do AgroSiCa e também a testemunha, além das duas maiores doses do AgroSilício<sup>®</sup> apresentaram valores de pH entre 4,4 e 5,0 o que classifica a acidez do solo como “ALTA” (RAIJ et al., 1997), enquanto os demais tratamentos, com valores de pH iguais ou superiores à esse nível, fazem o nível de acidez chegar a “MÉDIO” (RAIJ et al., 1997).

A análise geral desses resultados ao longo do tempo mostra evolução de um ano para o outro, ou seja, aumento nos valores de pH e conseqüentemente mudança na classificação da acidez, saindo do nível “MUITO ALTO” em 2015 até o nível “MÉDIO” em 2016. Observa-se que os incrementos ocorrem também para a testemunha. No entanto, a proporção com que se dão para os tratamentos onde foi feita a aplicação dos silicatos é muito superior, chegando a mais de 25 % do valor inicial, o que certamente se deve à ação corretiva dos silicatos.

O aumento das doses aplicadas de cada produto mostra que, em cana soca, na camada de 0 a 25, novamente, não há efeito sobre os valores de pH (Figura 4A), no entanto, abaixo da camada arável (25 a 50 cm de profundidade), o aumento da dose do produto aplicada ao solo gera um incremento nos valores de pH da ordem de 0,3 para cada tonelada aplicada (Figura 4B), no intervalo de 0 a  $2,0 \text{ t ha}^{-1}$ .

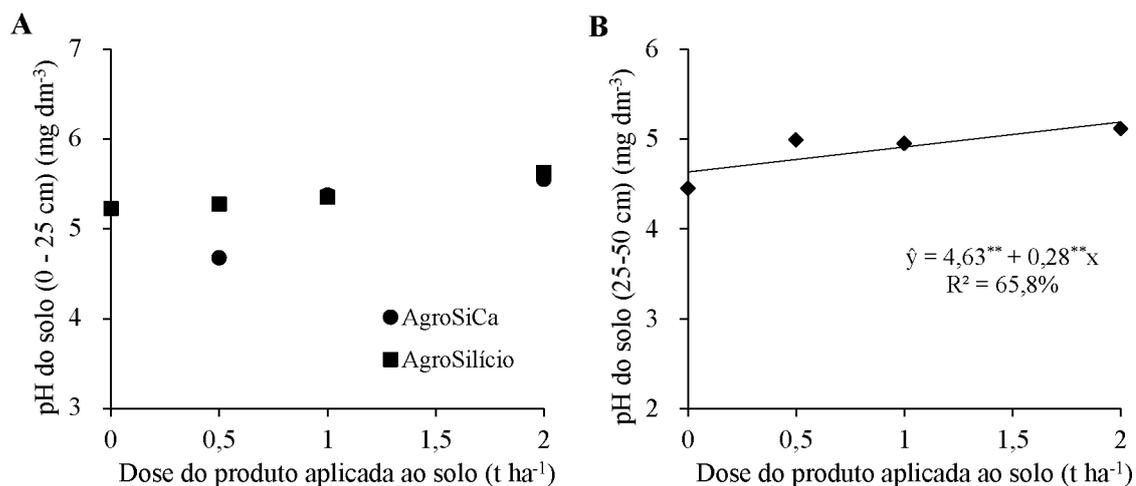
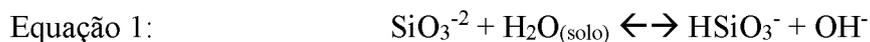


Figura 4. pH do solo (determinado em  $\text{CaCl}_2$   $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ ) nas profundidades de 0 a 25 cm (A) e 25 a 50 cm (média das duas fontes) (B), 799 dias após a aplicação via solo de doses crescentes de fontes de Si no plantio (Cana soca, 2016).

A resposta em incremento no pH do solo em função da aplicação dos silicatos se deve à ação neutralizante que esses materiais apresentam, e que pode ser explicada pelas equações abaixo (Equação 1 e Equação 2).



Fonte: Alcarde, 1992.

Alcarde (1992) também afirma que o silicato de cálcio atua como corretivo de acidez, cuja propriedade corretiva se assemelha à do calcário (RIBEIRO et al., 1986). Comprovando essas afirmações, Prado e Fernandes (2001) obtiveram aumentos de pH do solo nas camadas de 0 a 20 cm e de 20 a 40 cm semelhantes para a aplicação de agregados ou calcário, em área de produção de cana-de-açúcar.

Outros trabalhos que comprovam o efeito de fontes de Si como corretivos são os de Brassioli et al. (2009), que encontraram semelhança entre agregado de siderurgia e calcário calcítico na correção da acidez do solo ao longo dos ciclos de cultivo da cana-de-açúcar. Bastos (2008) também mostra eficiência no uso de agregado de siderurgia como fonte de Si e material corretivo, e Sobral et al. (2011) constataram redução da acidez potencial do solo pela aplicação de escória siderúrgica.

O efeito corretivo do produto AgroSiCa também foi demonstrado por Vale (2016), que obteve ligeiro aumento de pH de solos tropicais em resposta à aplicação do produto, ligeiro pois segundo o autor, o poder de neutralização de acidez do produto é baixo, mas ainda assim os efeitos observados foram caracterizados como melhoria nas condições agrícolas desses solos. Nesse mesmo estudo, o referido autor também obteve resultados de redução na acidez trocável dos três solos. Isso confirmaria o efeito positivo do uso agrícola da fluorita com óxido de silício em solos intemperizados e com altas concentrações de  $Al^{3+}$ , elemento esse que pode ser complexado com a forma iônica do flúor (F) na solução de solos ácidos (XIE et al., 1999) e assim assumir forma menos tóxica às plantas (WHITTEN; RITCHIE, 1991).

No ciclo da cana planta os teores de Ca no solo não variaram em resposta à aplicação dos produtos, variando de 1,4 a 2,3  $cmol_c dm^{-3}$  na camada de 0 a 25 cm e de 0,4 a 1,1  $cmol_c dm^{-3}$  na camada de 25 a 50 cm (Tabela 7).

Tabela 7. Teores de Ca no solo nas camadas de 0-25 e 25-50 cm, 375 dias após a aplicação via solo de doses crescentes de fontes de Si contendo Ca, no plantio (Cana planta, 2015).

Dose do produto t ha <sup>-1</sup>	Ca no solo <sup>(1)</sup>					
	0 - 25 cm			25 - 50 cm		
	AgroSiCa	AgroSilício <sup>®</sup>	Média	AgroSiCa	AgroSilício <sup>®</sup>	Média
0		2,2			0,7	
0,5	2,2	1,7	2,0	0,7	0,7	0,7
1,0	1,4	2,1	1,8	0,4	0,8	0,6
2,0	2,1	2,3	2,2	1,1	0,9	1,0
Média	1,9 a	2,1 a		0,7 a	0,8 a	

0-25 cm: <sup>(2)</sup> W= **0,96**; F<sub>Levene</sub> = **2,1**; F<sub>Tukey</sub> = **0,2**; CV (%) = 39,3; DMS<sub>Tukey</sub> = 0,7; DMS<sub>Dunnett</sub> = 1,6.

25-50 cm: <sup>(2)</sup> W= **0,97**; F<sub>Levene</sub> = **0,53**; F<sub>Tukey</sub> = **0,58**; CV (%) = 50,7; DMS<sub>Tukey</sub> = 0,3; DMS<sub>Dunnett</sub> = 0,8.

<sup>(1)</sup> Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,1 de significância. \*significativo em relação à testemunha pelo teste de Dunnett a 0,05 de significância. <sup>(2)</sup> W, F<sub>Levene</sub> e F<sub>Tukey</sub>: estatística dos testes de Shapiro-Wilk, Levene e Tukey para aditividade respectivamente (0,01 de significância); valores em negrito indicam respectivamente resíduos com distribuição normal, variâncias homogêneas e blocos com efeitos aditivos.

Os referidos níveis de Ca no solo de 0 a 25 cm de profundidade, estando compreendidos entre 1,21 e 2,4  $cmol_c dm^{-3}$  podem ser interpretados, segundo Alvarez et al. (1999), como nível “MÉDIO” de disponibilidade. Na camada inferior, 25 a 50 cm, os teores de Ca são classificados como “BAIXO” (ALVAREZ et al., 1999) estando entre 0,4 e 1,2  $cmol_c dm^{-3}$ .

Para o segundo ciclo de cultivo (cana soca), as médias de Ca no solo obtidas para os primeiros 25 cm não diferem entre si, apresentando variação de 0,7 a 1,4  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  (Tabela 7), ao passo que na camada inferior do perfil do solo o teor de Ca médio resultante da aplicação do produto AgroSiCa (1,8  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) foi superior ao obtido pelo AgroSilício® (1,5  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) (Tabela 8).

A aplicação de 0,5  $\text{t ha}^{-1}$  do AgroSiCa foi capaz de elevar os teores de Ca no solo do nível “BAIXO” (entre 0,41 e 1,2  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) para o nível “MÉDIO” (entre 1,21 e 2,4  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ), segundo classificação proposta por Alvarez et al. (1999). Já para o AgroSilício® esse comportamento somente pôde ser observado para a dose duas vezes superior, ou seja, 1,0  $\text{t ha}^{-1}$  (Tabela 8).

Tabela 8. Teores de Ca no solo nas camadas de 0-25 e 25-50 cm, 799 dias após a aplicação via solo de doses crescentes de fontes de Si contendo Ca, no plantio (Cana soca, 2016).

Dose do produto $\text{t ha}^{-1}$	Ca no solo <sup>(1)</sup>					
	0 - 25 cm			25 - 50 cm <sup>(3)</sup>		
	AgroSiCa	AgroSilício®	Média	AgroSiCa	AgroSilício®	Média
0	0,7			1,5		
0,5	1,4	1,2	1,3	1,8	1,4	1,6
1,0	1,1	1,3	1,2	1,9	1,4	1,7
2,0	1,2	1,2	1,2	1,8	1,5	1,6
Média	1,2 a	1,2 a		1,8 a	1,5 b	

0-25 cm: <sup>(2)</sup> W= 0,83; F<sub>Levene</sub> = 4,85; F<sub>Tukey</sub> = 129; CV (%) = 35,3; DMS<sub>Tukey</sub> = 0,3; DMS<sub>Dunnnett</sub> = 0,8.

25-50 cm: <sup>(2)</sup> W= **0,94**; F<sub>Levene</sub> = **1,11**; F<sub>Tukey</sub> = **3,13**; CV (%) = 27,8; DMS<sub>Tukey</sub> = 0,3; DMS<sub>Dunnnett</sub> = 0,9.

<sup>(1)</sup> Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,1 de significância. \*significativo em relação à testemunha pelo teste de Dunnnett a 0,05 de significância. <sup>(2)</sup> W, F<sub>Levene</sub> e F<sub>Tukey</sub>: estatística dos testes de Shapiro-Wilk, Levene e Tukey para aditividade respectivamente (0,01 de significância); valores em negrito indicam respectivamente resíduos com distribuição normal, variâncias homogêneas e blocos com efeitos aditivos. <sup>(3)</sup> Dados transformados em raiz (x) para a realização das análises estatísticas; dados apresentados representam valores originais.

O aumento da disponibilidade de Ca decorrente da aplicação do AgroSiCa corrobora com os resultados de Vale (2016) que, ao aplicar as doses de 0,5; 1,0; 2,0 e 4,0  $\text{t ha}^{-1}$  do produto em diferentes tipos de solos tropicais, obteve aumento significativo no teor de Ca na solução desses solos.

De 25 a 50 cm de profundidade, independentemente do tratamento, o nível de Ca no solo se manteve “MÉDIO” (entre 1,21 e 2,4  $\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ ) (Tabela 8) segundo Alvarez et al. (1999).

Considerando as quantidades de Ca fornecidas em cada tratamento (Tabela 2) observa-se que o fornecimento desse nutriente está acima da quantidade total extraída para uma produção de 100 t de cana-de-açúcar, quantidade essa que, segundo Orlando Filho (1983), é de 87 kg de Ca. A mesma interpretação pode ser feita para os dados de Franco et al. (2008), que afirmam que para cada tonelada de colmos industrializáveis, a cana-de-açúcar (variedade SP 813250) necessita de 0,8 kg de CaO ou 0,6 kg de Ca, o que resultaria em 60 kg de Ca para 100 t de cana-de-açúcar.

Aliado a isso, respostas mais expressivas em relação ao teor de Ca no solo não foram encontradas devido à prévia aplicação de calcário na área de instalação do experimento (5,3 t ha<sup>-1</sup>). Isso foi necessário para que houvesse correção da acidez inicial do solo, o que aumentou a disponibilidade do Ca, reduzindo assim a possibilidade e a amplitude de respostas ao seu fornecimento posterior.

Assim como nos resultados de pH, para os teores de Mg no solo também não foram observadas diferenças entre os tratamentos para os dois anos após a aplicação e para as duas profundidades de solo avaliadas (Tabela 9 e Tabela 10).

Tabela 9. Teores de Mg no solo nas camadas de 0-25 e 25-50 cm, 375 dias após a aplicação via solo de doses crescentes de fontes de Si contendo Mg, no plantio (Cana planta, 2015).

Dose do produto t ha <sup>-1</sup>	Mg no solo <sup>(1)</sup>					
	----- 0 - 25 cm -----			----- 25 - 50 cm -----		
	AgroSiCa	AgroSilício <sup>®</sup>	Média	AgroSiCa	AgroSilício <sup>®</sup>	Média
0	0,3			0,1		
0,5	0,3	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1
1,0	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	0,1
2,0	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2
Média	0,3 a	0,3 a		0,1 a	0,1 a	

0-25 cm: <sup>(2)</sup> W= **0,97**; F<sub>Levene</sub> = 3,1; F<sub>Tukey</sub> = **1,04**; CV (%) = 28,5; DMS<sub>Tukey</sub> = 0,1; DMS<sub>Dunnett</sub> = 0,2.  
25-50 cm: <sup>(2)</sup> W= **0,98**; F<sub>Levene</sub> = **0,66**; F<sub>Tukey</sub> = **2,21**; CV(%) = 47,0; DMS<sub>Tukey</sub> = 0,1; DMS<sub>Dunnett</sub> = 0,1.

<sup>(1)</sup> Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,1 de significância. \*significativo em relação à testemunha pelo teste de Dunnett a 0,05 de significância. <sup>(2)</sup> W, F<sub>Levene</sub> e F<sub>Tukey</sub>: estatística dos testes de Shapiro-Wilk, Levene e Tukey para aditividade respectivamente (0,01 de significância); valores em negrito indicam respectivamente resíduos com distribuição normal, variâncias homogêneas e blocos com efeitos aditivos.

Os teores de Mg no solo determinados após o primeiro corte da cana, de 0 a 25 cm e de 25 a 50 cm de profundidade, para a maior dose do produto AgroSiCa e para as duas maiores doses do AgroSilício<sup>®</sup>, segundo Alvarez et al. (1999), são classificados como “BAIXO”, estando os mesmos compreendidos entre 0,16 e 0,45 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> (Tabela

9) ao passo que os demais teores de Mg de 25 a 50 cm, por serem inferiores a 0,15 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup> (Tabela 9), são classificados como “MUITO BAIXO”, segundo os mesmos autores citados anteriormente.

Tabela 10. Teores de Mg no solo nas camadas de 0-25 e 25-50 cm, 799 dias após a aplicação via solo de doses crescentes de fontes de Si contendo Mg, no plantio (Cana soca, 2016).

Dose do produto t ha <sup>-1</sup>	Mg no solo <sup>(1)</sup>					
	0 - 25 cm			25 - 50 cm		
	AgroSiCa	AgroSilício <sup>®</sup>	Média	AgroSiCa	AgroSilício <sup>®</sup>	Média
0	0,1			0,3		
0,5	0,1	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2
1,0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
2,0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Média	0,2 a	0,2 a		0,2 a	0,2 a	

0-25 cm: <sup>(2)</sup> W= **0,97**; F<sub>Levene</sub> = **1,08**; F<sub>Tukey</sub> = **3,24**; CV(%) = 68,7; DMS<sub>Tukey</sub> = 0,09; DMS<sub>Dunnett</sub> = 0,21.

25-50 cm: <sup>(2)</sup> W= **0,97**; F<sub>Levene</sub> = **1,03**; F<sub>Tukey</sub> = **0,05**; CV(%) = 45,4; DMS<sub>Tukey</sub> = 0,09; DMS<sub>Dunnett</sub> = 0,20.

<sup>(1)</sup> Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,1 de significância. \*significativo em relação à testemunha pelo teste de Dunnett a 0,05 de significância. <sup>(2)</sup> W, F<sub>Levene</sub> e F<sub>Tukey</sub>: estatística dos testes de Shapiro-Wilk, Levene e Tukey para aditividade respectivamente (0,01 de significância); valores em negrito indicam respectivamente resíduos com distribuição normal, variâncias homogêneas e blocos com efeitos aditivos.

De 0 a 25 cm, os teores de Mg no solo após o corte da cana soca, para a aplicação da menor dose das fontes de Si, são classificados como “MUITO BAIXO” ( $\leq 0,15$  cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) (Tabela 9) enquanto que os demais se classificam como “BAIXO” (entre 0,16 e 0,45 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>) (Tabela 10) segundo Alvarez et al. (1999).

Houve uma redução geral nos teores de Mg no solo de 0 a 25 cm e um aumento na disponibilidade desse nutriente de 25 a 50 cm de profundidade, de um ano para o outro (Tabela 10). Isso indicaria uma possível absorção do nutriente pela cultura, intensificada na primeira camada, e disponibilização de Mg proveniente do fertilizante de 25 a 50 cm em quantidade superior à absorvida pela planta, provavelmente pelo menor volume do sistema radicular nessa profundidade.

Incrementos no teor de Mg de 0 a 25 cm, no cultivo da cana soca, foram detectados pelo teste de regressão como resposta ao aumento da dose de produto aplicada ao solo (Figura 5A). Os incrementos, apesar de pequenos, ocorreram até a dose aproximada de 1,2 t ha<sup>-1</sup>, a qual resultaria no valor máximo (aproximadamente 0,2 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>). Para a camada de 25 a 50 cm não ocorreu incremento no teor de Mg no solo em resposta ao aumento da dose de produto (Figura 5B).

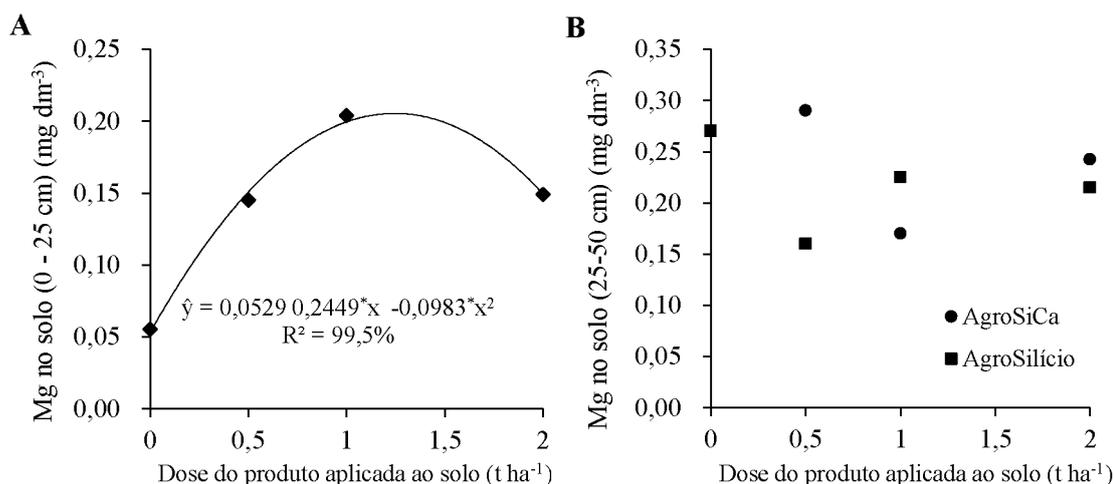


Figura 5. Teores de Mg no solo nas profundidades de 0 a 25 cm (média das duas fontes) (A) e 25 a 50 cm (B), 799 dias após a aplicação via solo de doses crescentes de fontes de Si contendo Mg, no plantio (Cana soca, 2016).

Aumentos nos teores de Mg na camada superficial do solo (mas não na subsuperficial), em resposta à aplicação de agregados de siderurgia utilizadas como de fontes de Si e que contêm Mg, também são relatados por Prado e Fernandes (2001), Prado et al. (2003) e Sobral et al. (2011).

Baixas respostas à aplicação de fontes de Si contendo Mg, para teores de Mg no solo também são comuns e podem ser explicadas pelo que afirma Anderson et al. (1991) ao mencionar que, normalmente, os agregados de siderurgia apresentam baixos teores de Mg e, que existe também o efeito antagônico entre Si e Mg, o que em solo com baixo teor de Mg disponível, certamente interferirá na resposta da cultura da cana-de-açúcar.

Outra razão à qual poderia ser atribuída a baixa resposta para os teores de Mg no solo é a relação entre a quantidade aplicada e a extração média da cultura da cana e, especificamente da variedade RB 867515. As quantidades de Mg fornecidas ao solo em cada tratamento (Tabela 2) são inferiores aos 49 kg exigidos para a produção de 100 t de colmos (ORLANDO FILHO, 1983), exceto para as duas maiores doses do produto AgroSilício<sup>®</sup>, o qual apresenta maior concentração de Mg em sua composição.

Em relação à recomendação de Franco et al. (2008) a quantidade de Mg extraída pela cultura da cana (variedade SP 813250) é de 0,4 kg MgO ou 0,24 kg Mg por tonelada de colmos industrializáveis, o que corresponde a 24 kg Mg para 100 t, quantidade essa suprida apenas nos tratamentos com a aplicação de AgroSilício<sup>®</sup> (Tabela 2).

Para P no solo, observa-se que de 0 a 25 cm de profundidade apenas o tratamento que recebeu a aplicação de 0,5 t ha<sup>-1</sup> do produto padrão AgroSilício<sup>®</sup> difere da testemunha e, nesse caso, a diferença indica menor teor de P no solo (13,3 mg dm<sup>-3</sup>) em relação ao obtido pelo tratamento sem aplicação das fontes de Si (Tabela 11).

O referido resultado (13,3 mg dm<sup>-3</sup>) é inferior também ao obtido em resposta à aplicação da mesma dose (0,5 t ha<sup>-1</sup>) do produto em teste (AgroSiCa), onde o teor de P encontrado foi de 35,9 mg dm<sup>-3</sup> (Tabela 11). Ao contrário, para a dose de 1,0 t ha<sup>-1</sup> o resultado do AgroSilício<sup>®</sup> é superior ao do AgroSiCa, sendo a diferença entre eles superior a 14 mg dm<sup>-3</sup> de P no solo (Tabela 11).

Tabela 11. Teores de P no solo nas camadas de 0-25 e 25-50 cm, 375 dias após a aplicação via solo de doses crescentes de fontes de Si contendo P, no plantio (Cana planta, 2015).

Dose do produto t ha <sup>-1</sup>	P no solo <sup>(1)</sup>					
	0 - 25 cm			25 - 50 cm <sup>(3)</sup>		
	AgroSiCa	AgroSilício <sup>®</sup>	Média	AgroSiCa	AgroSilício <sup>®</sup>	Média
	mg dm <sup>-3</sup>					
0	34,7			3,5		
0,5	35,9 a	13,3* b	24,6	5,3 a	3,8 a	4,5
1,0	15,3 b	29,4 a	22,3	2,7 a	3,4 a	3,1
2,0	29,6 a	32,7 a	31,2	6,9* a	2,5 b	4,7
Média	26,9	25,1		5,0	3,2	

0-25 cm: <sup>(2)</sup> W= **0,96**; F<sub>Levene</sub> = **0,35**; F<sub>Tukey</sub> = **0,02**; CV (%) = 36,5; DMS<sub>Tukey</sub> = 12,1; DMS<sub>Dunnett</sub> = 19,9.

25-50 cm: <sup>(2)</sup> W= **0,93**; F<sub>Levene</sub> = 4,8; F<sub>Tukey</sub> = **1,29**; CV (%) = 36,4; DMS<sub>Tukey</sub> = 1,7; DMS<sub>Dunnett</sub> = 2,9.

<sup>(1)</sup> Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,1 de significância. \*significativo em relação à testemunha pelo teste de Dunnett a 0,05 de significância. <sup>(2)</sup> W, F<sub>Levene</sub> e F<sub>Tukey</sub>: estatística dos testes de Shapiro-Wilk, Levene e Tukey para aditividade respectivamente (0,01 de significância); valores em negrito indicam respectivamente resíduos com distribuição normal, variâncias homogêneas e blocos com efeitos aditivos. <sup>(3)</sup> Dados transformados em raiz (x) para a realização das análises estatísticas; dados apresentados representam valores originais.

De 25 a 50 cm, o maior teor de P no solo (6,9 mg dm<sup>-3</sup>) foi o do tratamento que recebeu a aplicação da maior dose (2,0 t ha<sup>-1</sup>) da fluorita com óxido de silício (Tabela 11), o qual difere não só da testemunha, mas também do tratamento que recebeu a mesma dose do padrão (AgroSilício<sup>®</sup>), sendo as diferenças equivalentes a 3,4 e 4,4 mg dm<sup>-3</sup> de P, respectivamente (Tabela 11).

Vale (2016) em seu estudo realizado para avaliar o potencial de uso agrícola do AgroSiCa com aplicação no solo, obteve aumento significativo no teor de P na solução dos solos em estudo, concluindo que a fluorita com óxido de silício foi capaz de aumentar a fração de P lábil do solo.

Os teores de P no solo encontrados de 0 a 25 cm de profundidade, quando se aplica 0,5 t ha<sup>-1</sup> de AgroSilício<sup>®</sup> ou 1,0 t ha<sup>-1</sup> de AgroSiCa se mantêm em níveis inferiores entre 10,1 e 20,0 mg dm<sup>-3</sup>, o que os classifica como “BAIXO” (Tabela 11). Já a aplicação de 1,0 t ha<sup>-1</sup> do AgroSilício<sup>®</sup> bem como a de 2,0 t ha<sup>-1</sup> do AgroSiCa faz com que os teores de P no solo alcancem nível “MÉDIO” (entre 20,1 e 30 mg dm<sup>-3</sup>) (Tabela 11).

Por fim, outro incremento na dose do AgroSilício<sup>®</sup> resultando na aplicação de 2,0 t ha<sup>-1</sup> e a redução da dose do AgroSiCa pra 0,5 t ha<sup>-1</sup> elevam os teores de P no solo para níveis acima de 30 mg dm<sup>-3</sup> (Tabela 11). Esses tratamentos e a testemunha assumem a classificação de “BOM”, conforme Alvarez et al. (1999). De acordo com o mesmo autor, os teores de P no solo na camada de 25 a 50 cm, por serem sempre inferiores à 10 mg dm<sup>-3</sup> (Tabela 11), são classificados como “MUITO BAIXO”.

Os resultados de cana soca, diferentemente dos encontrados para cana planta, não mostram diferenças no teor de P no solo em função da aplicação das diferentes doses das duas fontes de Si estudadas (Tabela 12). Houve variação de 32,7 a 56,4 mg dm<sup>-3</sup> de 0 a 25 cm e de 4,8 a 10,6 mg dm<sup>-3</sup> de 25 a 50 cm de profundidade (Tabela 12).

Tabela 12. Teores de P no solo nas camadas de 0-25 e 25-50 cm, 799 dias após a aplicação via solo de doses crescentes de fontes de Si contendo P, no plantio (Cana soca, 2016).

Dose do produto t ha <sup>-1</sup>	P no solo <sup>(1)</sup>					
	----- 0 - 25 cm -----			----- 25 - 50 cm <sup>(3)</sup> -----		
	AgroSiCa	AgroSilício <sup>®</sup>	Média	AgroSiCa	AgroSilício <sup>®</sup>	Média
0	36,4			9,9		
0,5	32,7	33,5	33,1	6,2	10,6	8,4
1,0	56,4	40,0	48,2	10,3	9,2	9,7
2,0	44,7	38,3	41,5	8,2	4,8	6,5
Média	44,6 a	37,2 a		8,2 a	8,2 a	

0-25 cm: <sup>(2)</sup> W= **0,93**; F<sub>Levene</sub> = **1,54**; F<sub>Tukey</sub> = **0,98**; CV(%) = 28,9; DMS<sub>Tukey</sub> = 10,0; DMS<sub>Dunnett</sub> = 23,3.

25-50 cm: <sup>(2)</sup> W= **0,91**; F<sub>Levene</sub> = **1,72**; F<sub>Tukey</sub> = **6,13**; CV(%) = 46,0; DMS<sub>Tukey</sub> = 3,3; DMS<sub>Dunnett</sub> = 7,8.

<sup>(1)</sup> Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,1 de significância. \*significativo em relação à testemunha pelo teste de Dunnett a 0,05 de significância. <sup>(2)</sup> W, F<sub>Levene</sub> e F<sub>Tukey</sub>: estatística dos testes de Shapiro-Wilk, Levene e Tukey para aditividade respectivamente (0,01 de significância); valores em negrito indicam respectivamente resíduos com distribuição normal, variâncias homogêneas e blocos com efeitos aditivos. <sup>(3)</sup> Dados transformados em raiz (x) para a realização das análises estatísticas; dados apresentados representam valores originais.

Os teores de P no solo de 0 a 25 cm, após o cultivo da cana soca, são classificados como “BOM” ou “MUITO BOM” por se tratarem de valores superiores a 30 mg dm<sup>-3</sup> de P (Tabela 12), enquanto que na camada inferior, independente do tratamento, a

disponibilidade de P no solo é, de maneira geral, “BAIXA” considerando valores inferiores ou pouco maiores que  $10 \text{ mg dm}^{-3}$  de P (Tabela 12) (ALVAREZ et al., 1999).

Como observado, existe um gradiente considerável de P no solo entre a primeira e a segunda camada deste perfil para os dois anos analisados (Tabelas 11 e 12), e existem pelo menos dois fatores que podem explicar tal fato.

O primeiro fator leva em conta a adubação de plantio e a amostragem de solo. A adubação de plantio, como já descrita, foi feita mediante aplicação de  $380 \text{ kg ha}^{-1}$  do formulado 6-30-10 + 1% Mn + 0,8% Zn, o que resultou na aplicação de  $114 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$ . Considerando que trata-se de um formulado NPK rico em P (30% de  $\text{P}_2\text{O}_5$ ), certamente formulado com fontes solúveis como MAP e Superfosfato Triplo e sendo as amostragens de solo feitas em pontos próximos ao local de aplicação do referido fertilizante, provavelmente estas amostras abrangeram material com alto teor de P proveniente diretamente do fertilizante ou ainda com algum residual deste não dissolvido no solo.

O segundo fator que explicaria a diferença marcante no teor de P da primeira camada em relação à segunda seria o efeito do Si proveniente das fontes testadas sobre o P do solo, isto é, efeito da interação entre Si e P.

Solos de Cerrado apresentam fração argilosa praticamente formada de caulinita e óxidos de ferro e alumínio (NOVAIS et al., 2007), componentes esses que fazem com que a adsorção de P nesses solos seja muito grande (KER, 1995). Sabe-se que o ânion silicato também é retido pelos óxidos de ferro e alumínio da fração argila e seu comportamento nos solos é muito semelhante ao dos fosfatos, logo esses dois ânions competem entre si pelo complexo adsorvente do solo (CARVALHO et al., 2001).

Essa semelhança de comportamento entre fosfato e silicato cria algumas situações tais como o silicato atuando no deslocamento de fosfato previamente adsorvido às superfícies oxídicas, competição entre P e Si pelos mesmos sítios de adsorção no solo e a presença de Si como potencializador da adubação fosfatada (BRAIT, 2008; CARVALHO et al. 2001; LEITE, 1997; OLIVEIRA, 1984)

Avaliando a dinâmica da interação desses dois nutrientes no solo, Carvalho et al. (2000) afirmam que é possível dessorver P do solo pela ação do Si aplicado como silicato, numa etapa posterior à fertilização fosfatada, sem alterações no pH do solo. Melo (2005), aplicando doses crescentes de P e silicato de cálcio ao solo cultivado com *Brachiaria brizantha*, demonstrou interação entre P e Si no solo e na planta, sendo as maiores respostas obtidas através da aplicação de altas doses de Si com doses baixas a médias de

P, indicando que elevadas doses de Si podem reduzir a aplicação de P. Por fim, apesar de maior afinidade do P com os sítios de adsorção, sendo o fosfato o primeiro ânion da ordem preferencial de adsorção no solo (PARFITT, 1978), o Si tem poder em diminuir a adsorção de P.

Diante do exposto, uma provável explicação para o maior teor de P na camada de 0 a 25 cm seria a ação do Si proveniente dos produtos AgroSilício® e AgroSiCa na dessorção de P do solo. Esse processo estaria intensificado na primeira camada do perfil devido à aplicação dos fertilizantes silicatados ter sido feita à lanço, em área total e consequentemente ter coberto maior área da camada de 0 a 25 cm em relação à de 25 a 50 cm.

Há ainda a hipótese de que o flúor (F), presente na fluorita com óxido de silício, possa ter participado no processo de dessorção de P do solo com atuação semelhante à do Si, o que teria ocorrido nos tratamentos que receberam a aplicação do produto AgroSiCa. Seguindo Childers et al. (2011) o F, assim como o Si, pode competir com o P pelos sítios de sorção no solo diminuindo sua fixação, aumentando sua disponibilidade e a eficiência da adubação fosfatada. Zhang e Yu (1997) também citaram que, além do silicato, o F também é conhecido como capaz de substituir o íon fosfato ligado às cargas positivas de solos oxidicos. Entretanto, estudos precisam ser realizados a fim que se conheça mais detalhadamente esse processo sobre os efeitos do F nas características químicas de solos de regiões tropicais, principalmente no Brasil (VALE, 2016).

### **3.2 Concentração foliar de Si, Ca, Mg e P**

A concentração de Si foliar em cana planta foi sempre superior à testemunha, cujo resultado foi de 4,2 g kg<sup>-1</sup> de Si, exceto para o tratamento com a aplicação da dose intermediária (1,0 t ha<sup>-1</sup>) da fluorita com óxido de silício (Tabela 13). A comparação entre as fontes de Si não mostrou diferença entre os produtos, ou seja, a absorção de Si é semelhante quando o mesmo é proveniente da fonte AgroSiCa ou AgroSilício® e resulta na concentração aproximada de 5,0 g kg<sup>-1</sup> de Si foliar (Tabela 13).

Para a cana soca não foram detectadas diferenças entre os tratamentos, sendo a variação dos valores de concentração de Si foliar de 5,7 a 6,2 g kg<sup>-1</sup> e as médias das duas fontes estatisticamente iguais (Tabela 13).

Tabela 13. Concentração de Si foliar em cana-de-açúcar variedade RB 867515, aos 287 e 669 dias (cana planta e cana soca, respectivamente) após a aplicação no plantio, via solo, de doses crescentes de fontes de Si.

Dose do produto	Si foliar <sup>(1)</sup>					
	Cana planta			Cana soca		
	AgroSiCa	AgroSilício <sup>®</sup>	Média	AgroSiCa	AgroSilício <sup>®</sup>	Média
t ha <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>					
0		4,2			5,7	
0,5	5,0*	5,2*	5,1	6,1	5,8	6,0
1,0	4,8	5,1*	4,9	6,0	6,0	6,0
2,0	5,1*	5,1*	5,1	6,1	6,2	6,2
Média	5,0 a	5,1 a		6,1 a	6,0 a	
Cana planta: <sup>(2)</sup> W= <b>0,98</b> ; F <sub>Levene</sub> = <b>1,33</b> ; F <sub>Tukey</sub> = <b>0,63</b> ; CV (%) = 8,2; DMS <sub>Tukey</sub> = 0,3; DMS <sub>Dunnett</sub> = 0,8.						
Cana soca: <sup>(2)</sup> W= <b>0,97</b> ; F <sub>Levene</sub> = <b>0,84</b> ; F <sub>Tukey</sub> = <b>0,70</b> ; CV (%) = 8,2; DMS <sub>Tukey</sub> = 0,4; DMS <sub>Dunnett</sub> = 0,9.						

<sup>(1)</sup> Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,1 de significância. \*significativo em relação à testemunha pelo teste de Dunnett a 0,05 de significância. <sup>(2)</sup> W, F<sub>Levene</sub> e F<sub>Tukey</sub>: estatística dos testes de Shapiro-Wilk, Levene e Tukey para aditividade respectivamente (0,01 de significância); valores em negrito indicam respectivamente resíduos com distribuição normal, variâncias homogêneas e blocos com efeitos aditivos.

Efeito positivo da aplicação da fluorita com óxido de silício na absorção de Si também é relatado por Vale (2016) que obteve aumento da concentração foliar de Si em plantas de milho e soja cultivados em diferentes tipos de solo tratados com doses crescentes do fertilizante.

A cana-de-açúcar apresenta concentrações elevadas de Si, variando de 1,4 g kg<sup>-1</sup> nas folhas jovens até 6,7 g kg<sup>-1</sup> em colmos e folhas velhas (KORNDÖRFER; DATNOFF, 1995). Anderson e Bowen (1992) citam alguns níveis adequados de Si foliar, sendo de 10,6 a 30,5 g kg<sup>-1</sup> em Maurício, acima de 12 g kg<sup>-1</sup> na África do Sul, acima de 15 g kg<sup>-1</sup> no Havaí (EUA) e de 15 a 40 g kg<sup>-1</sup> na Flórida (EUA) e Datnoff et al. (2001) citam de 7,0 a 19,0 g kg<sup>-1</sup> como intervalo de Si no tecido de folhas de cana-de-açúcar.

Observa-se assim que, as concentrações foliares de Si encontradas no experimento, tanto em cana planta quanto em cana soca (Tabela 13), estão mais próximas da mínima concentração foliar citada por Datnoff et al. (2001) e aquém dos valores mínimos utilizados no exterior, citados por Anderson e Bowen (1992).

Altas concentrações de Si estão associadas à altas produtividades de cana-de-açúcar (MATCHENKOV; CALVERT, 2002). Isso pôde ser confirmado por Arruda (2009) que verificou correlações positivas entre teores foliares de Si e a produção de colmos em condições de campo com áreas de teores foliares de 22 g kg<sup>-1</sup> e produtividade média de 160 t ha<sup>-1</sup>, e áreas de teores foliares de 15 g kg<sup>-1</sup>, e produtividade de 128 t ha<sup>-1</sup>.

Pôde ser observado efeito de dose sobre a concentração de Si nas folhas da cana planta, sendo tal efeito positivo, ou seja, com incremento na concentração de Si foliar até o valor de 5,2 g kg<sup>-1</sup> em função da aplicação de 1,5 t ha<sup>-1</sup> de qualquer um dos produtos (Figura 6A), que indica também que para doses maiores que essa (1,5 t ha<sup>-1</sup>) a concentração de Si na folha diminui. Para cana soca, novamente não foram observados efeitos dos tratamentos, nesse caso, aumento da dose aplicada, sobre os resultados de Si foliar (Figura 6B).

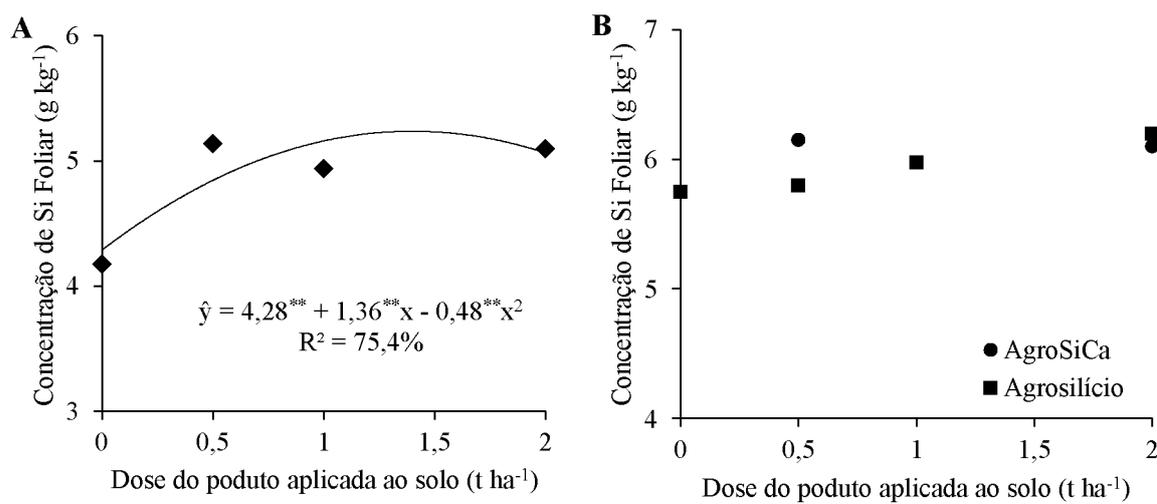


Figura 6. Concentração de Si foliar em cana-de-açúcar variedade RB 867515 em cana planta (média das duas fontes) (A) e cana soca (B) aos 287 e 669 dias, respectivamente, após a aplicação via solo de doses crescentes de fontes de Si no plantio.

Araújo (2010) em seu trabalho com doses crescentes de duas escórias (escória siderúrgica Holcim e AgroSilício<sup>®</sup>) aplicadas via solo nas doses de 400, 800 e 1600 kg ha<sup>-1</sup>, obteve concentração foliar de Si 30% maior aos 240 dias em relação àquela determinada aos 180 dias após a aplicação (variedade SP 803280).

Sousa et al. (2010) comparando duas variedades de cana-de-açúcar (SP 813250 e RB 867515) submetidas à aplicação de quatro doses de Si (0, 100, 200 e 400 kg ha<sup>-1</sup>) provenientes de escória, observaram que, independentemente da variedade, a concentração de Si nos ponteiros e nas folhas também aumentou, porém de forma linear, com incrementos atingindo 36% e 12%, respectivamente.

Madeiros et al. (2009) também obtiveram aumento das concentrações foliares de Si nas variedades RB72454 e SP791011 em resposta a doses crescentes (0; 2,5; 5,0; 10,0

e 15,0 g de Si por vaso) ao aumento da dose de escória siderúrgica aplicada ao solo, 90 dias após a emissão das brotações.

A aplicação da fluorita com óxido de silício testado nesse estudo resultou em maior concentração de Ca foliar na cana planta, quando comparado com o padrão AgroSilício<sup>®</sup>, sendo de 0,8 g kg<sup>-1</sup> a diferença média na absorção de Ca dos tratamentos com a aplicação de cada uma dessas fontes de Si (Tabela 14).

Tabela 14. Concentração de Ca foliar em cana-de-açúcar variedade RB 867515, aos 287 e 669 dias (cana planta e cana soca, respectivamente) após a aplicação no plantio, via solo, de doses crescentes de fontes de Si contendo Ca.

Dose do produto t ha <sup>-1</sup>	Ca foliar <sup>(1)</sup>					
	Cana planta			Cana soca		
	AgroSiCa	AgroSilício <sup>®</sup>	Média	AgroSiCa	AgroSilício <sup>®</sup>	Média
0	12,3			10,2		
0,5	12,5	11,8	12,2	11,1	11,2	11,2
1,0	12,6	11,3	11,9	11,1	11,1	11,1
2,0	12,3	12,0	12,1	11,0	11,2	11,1
Média	12,5 a	11,7 b		11,1 a	11,2 a	

Cana planta: <sup>(2)</sup>W= **0,98**; F<sub>Levene</sub> = 6,89; F<sub>Tukey</sub> = **4,93**; CV (%) = 5,7; DMS<sub>Tukey</sub> = 0,6; DMS<sub>Dunnett</sub> = 1,4.

Cana soca: <sup>(2)</sup>W= **0,93**; F<sub>Levene</sub> = 4,81; F<sub>Tukey</sub> = 11,84; CV (%) = 5,8; DMS<sub>Tukey</sub> = 0,6; DMS<sub>Dunnett</sub> = 1,3.

<sup>(1)</sup>Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,1 de significância. \*significativo em relação à testemunha pelo teste de Dunnett a 0,05 de significância. <sup>(2)</sup>W, F<sub>Levene</sub> e F<sub>Tukey</sub>: estatística dos testes de Shapiro-Wilk, Levene e Tukey para aditividade respectivamente (0,01 de significância); valores em negrito indicam respectivamente resíduos com distribuição normal, variâncias homogêneas e blocos com efeitos aditivos.

Uma possível explicação para essa maior concentração foliar de Ca nas plantas que receberam a aplicação do AgroSiCa, considerando que os teores de Ca nesse produto e no AgroSilício<sup>®</sup> são relativamente semelhantes, sendo a concentração de Ca no AgroSilício<sup>®</sup> um pouco superior (Tabelas 1A e 2A, Anexo A), pode ser a forma com que esse nutriente está presente no AgroSiCa, o que sugere que haja neste fertilizante, maior solubilidade em água e conseqüentemente maior disponibilidade do Ca para as plantas.

Outro resultado que confirmaria essa hipótese é o de Vale (2016) que encontrou aumento significativo na concentração de Ca em plantas de soja e milho em resposta ao aumento da dose de AgroSiCa aplicado a três diferentes solos tropicais.

As concentrações de Ca nas folhas da cana planta e da cana soca estão, segundo Martinez et al. (1999), compreendidas no intervalo adequado para a cultura da cana-de-açúcar (9,4 a 11,5 g kg<sup>-1</sup>), estando em algumas situações, como por exemplo na cana

planta que recebeu aplicação do AgroSiCa ou a maior e a menor dose do AgroSilício® até mesmo em quantidade superior à máxima de referência (Tabela 14).

Utilizando-se os valores de referência para a cultura da cana citados por Raij et al. (1997), os resultados de Ca foliar estariam ainda mais além do desejado, isso porque esse autor cita o intervalo entre 2 e 8 g kg<sup>-1</sup> como a faixa de teor de Ca adequada para a cultura.

Para a cana soca os valores de Ca foliar não diferiram entre os tratamentos, ou seja, as duas fontes de Si apresentaram comportamento semelhante, sendo de 10,2 a 11,2 g kg<sup>-1</sup> a variação nas concentrações (Tabela 14). Apesar da diferença entre as fontes citada para a concentração de Ca nas folhas da cana planta, o incremento nas doses de um ou outro produto não aumentou a quantidade de Ca absorvida pela planta (Figura 7A). Ao contrário disso, em cana soca, há essa resposta para o aumento da dose aplicada das fontes de Si, o qual implica no aumento da concentração de Ca foliar para valores superiores a 11 g kg<sup>-1</sup> em dose próxima a 1,3 t ha<sup>-1</sup> para os dois produtos (Figura 7B).

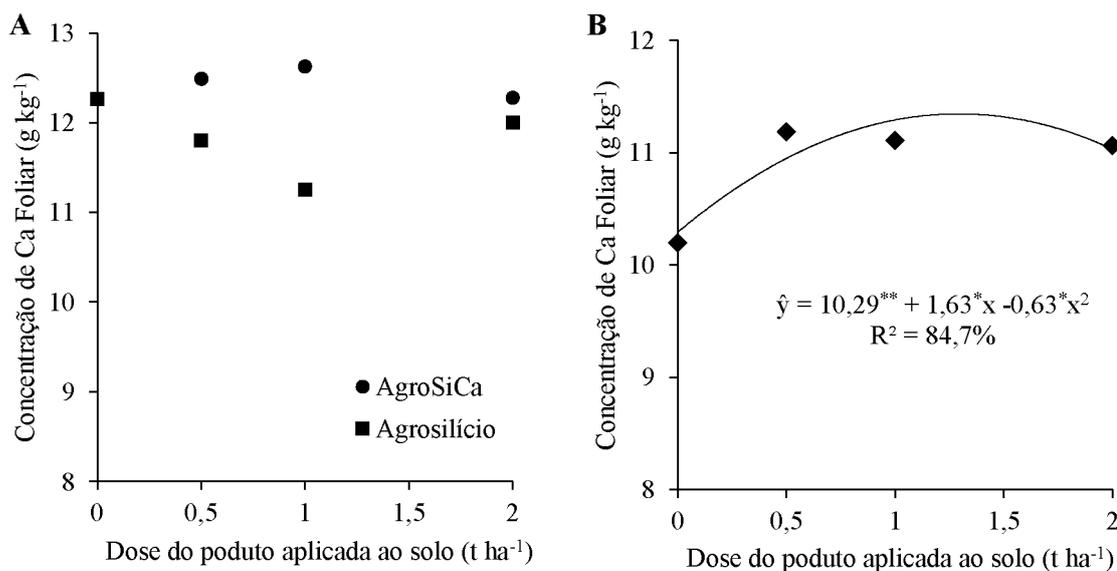


Figura 7. Concentração de Ca foliar em cana-de-açúcar variedade RB 867515 em cana planta (A) e cana soca (B) (média das duas fontes) aos 287 e 669 dias, respectivamente, após a aplicação via solo de doses crescentes de fontes de Si contendo Ca no plantio.

Assim como observado para a concentração de Ca nas folhas, os resultados de Mg foliar em cana planta foram, na média, superiores para a aplicação do AgroSiCa onde se obteve 1,7 g kg<sup>-1</sup> de Mg (Tabela 15), e em cana soca, os resultados também não diferiram

entre si, variando de 1,5 a 1,9 g kg<sup>-1</sup> de Mg, indicando comportamento similar dos produtos aplicados (Tabela 15).

Tabela 15. Concentração de Mg foliar em cana-de-açúcar variedade RB 867515, aos 287 e 669 dias (cana planta e cana soca, respectivamente) após a aplicação no plantio, via solo, de doses crescentes de fontes de Si contendo Mg.

Dose do produto t ha <sup>-1</sup>	Mg foliar <sup>(1)</sup>					
	Cana planta			Cana soca		
	AgroSiCa	AgroSilício <sup>®</sup>	Média	AgroSiCa	AgroSilício <sup>®</sup>	Média
0	1,7			1,5		
0,5	1,7	1,5	1,6	1,8	1,9	1,8
1,0	1,7	1,2	1,5	1,8	1,9	1,8
2,0	1,6	1,6	1,6	1,8	1,7	1,8
Média	1,7 a	1,4 b		1,8 a	1,8 a	

Cana planta: <sup>(2)</sup> W= **0,98**; F<sub>Levene</sub> = **3,43**; F<sub>Tukey</sub> = 25,93; CV(%) = 15,3; DMS<sub>Tukey</sub> = 0,2; DMS<sub>Dunnett</sub> = 0,5.

Cana soca: <sup>(2)</sup> W= **0,93**; F<sub>Levene</sub> = 4,18; F<sub>Tukey</sub> = **0,001**; CV (%) = 18,9; DMS<sub>Tukey</sub> = 0,3; DMS<sub>Dunnett</sub> = 0,7.

<sup>(1)</sup> Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,1 de significância. \*significativo em relação à testemunha pelo teste de Dunnett a 0,05 de significância. <sup>(2)</sup> W, F<sub>Levene</sub> e F<sub>Tukey</sub>: estatística dos testes de Shapiro-Wilk, Levene e Tukey para aditividade respectivamente (0,01 de significância); valores em negrito indicam respectivamente resíduos com distribuição normal, variâncias homogêneas e blocos com efeitos aditivos.

Ao contrário do que se observou para a concentração foliar de Ca, para o Mg todos os resultados (Tabela 15) estão abaixo do intervalo utilizado como referência para Martinez et al. (1999) que vai de 2,2 a 4,5 g kg<sup>-1</sup> de Mg. No entanto, se enquadram dentro do que é citado por Raij et al. (1997) como sendo o adequado para a cultura da cana, visto que, de acordo com esse segundo autor, o intervalo ideal é de 1 a 3 g kg<sup>-1</sup> de Mg.

Para P foliar em cana planta, também pôde-se observar melhor desempenho do AgroSiCa em relação ao AgroSilício<sup>®</sup> visto que nas doses de 0,5 e 1,0 t ha<sup>-1</sup> a concentração de P nas folhas é maior para a fluorita com óxido de silício, com diferenças de 0,4 e 0,6 g kg<sup>-1</sup> de P foliar, respectivamente (Tabela 16). Novamente, na soqueira, os teores foliares de P, variando de 2,1 a 3,0 g kg<sup>-1</sup> não diferem entre os tratamentos o que sugere ação similar dos dois fertilizantes (Tabela 16).

Tabela 16. Concentração de P foliar em cana-de-açúcar variedade RB 867515, aos 287 e 669 dias (cana planta e cana soca, respectivamente) após a aplicação no plantio, via solo, de doses crescentes de fontes de Si contendo P.

Dose do produto t ha <sup>-1</sup>	P foliar <sup>(1)</sup>					
	Cana planta			Cana soca		
	AgroSiCa	AgroSilício <sup>®</sup>	Média	AgroSiCa	AgroSilício <sup>®</sup>	Média
0	2,5			2,1		
0,5	2,6 a	2,2 b	2,4	2,6	3,0	2,8
1,0	2,6 a	2,0 b	2,3	2,8	2,9	2,9
2,0	2,5 a	2,5 a	2,5	2,7	2,8	2,7
Média	2,5	2,2	2,7 a	2,9	2,9 a	

g kg<sup>-1</sup>

Cana planta: <sup>(2)</sup> W= **0,96**; F<sub>Levene</sub> = 8,66; F<sub>Tukey</sub> = 49,92; CV(%)= 10,6; DMS<sub>Tukey</sub> = 0,3; DMS<sub>Dunnett</sub> = 0,5.  
Cana soca: <sup>(2)</sup> W= **0,97**; F<sub>Levene</sub> = **1,72**; F<sub>Tukey</sub> = **0,41**; CV(%) = 17,9; DMS<sub>Tukey</sub> = 0,4; DMS<sub>Dunnett</sub> = 1,0.

<sup>(1)</sup> Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,1 de significância. \*significativo em relação à testemunha pelo teste de Dunnett a 0,05 de significância. <sup>(2)</sup> W, F<sub>Levene</sub> e F<sub>Tukey</sub>: estatística dos testes de Shapiro-Wilk, Levene e Tukey para aditividade respectivamente (0,01 de significância); valores em negrito indicam respectivamente resíduos com distribuição normal, variâncias homogêneas e blocos com efeitos aditivos.

Esse resultado corrobora com o de Vale (2016) que encontrou maior quantidade de P em folhas de soja e milho cultivadas em solos tropicais submetidos à aplicação de doses crescentes da fluorita com óxido de silício (AgroSiCa).

Os teores de P na folha são adequados para a cultura da cana quando compreendidos entre 2,1 e 2,5 g kg<sup>-1</sup>, segundo Martinez et al. (1999). Portanto, a maioria dos resultados encontrados é adequada, tanto para cana planta quanto para cana soca (Tabela 16), o que pode se afirmar também quando se comparam os resultados e a faixa de teor foliar de P adequado para a cultura da cana citada por Rajj et al. (1997), a qual vai de 1,5 a 3 g kg<sup>-1</sup>.

O estudo do efeito do aumento das doses aplicadas de cada um desses fertilizantes sobre a concentração de P foliar mostra que, em cana soca, o aumento nas doses faz com que a concentração de P foliar também aumente, atingindo, segundo o gráfico (Figura 8B), aproximadamente 3,0 g kg<sup>-1</sup> de P em resposta à aplicação de 1,3 t ha<sup>-1</sup>.

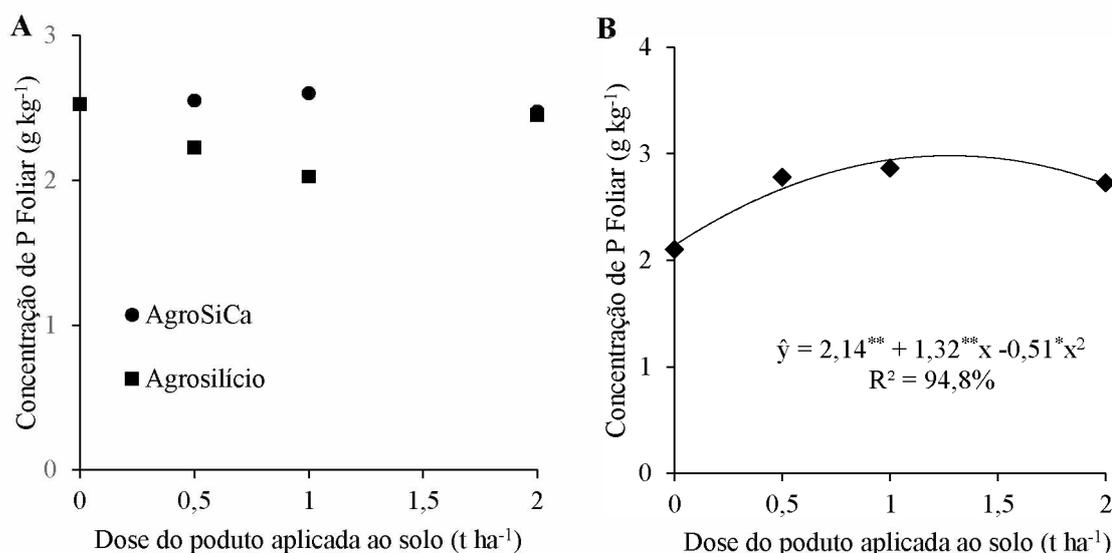


Figura 8. Concentração de P foliar em cana-de-açúcar variedade RB 867515 em cana planta (A) e cana soca (B) (média das duas fontes) aos 287 e 669 dias, respectivamente, após a aplicação via solo de doses crescentes de fontes de Si contendo P no plantio.

### 3.3 Produção de colmos (TCH) e de açúcar (TAH)

As médias dos tratamentos não diferem entre os fertilizantes para TCH e TAH em cana planta (Tabela 17). No entanto, o tratamento com 1,0 t ha<sup>-1</sup> do AgroSiCa supera a testemunha, com incrementos de aproximadamente 20% em TCH e TAH (Tabela 17).

Tabela 17. Produção de colmos (TCH) e de açúcar (TAH) da cana planta (variedade RB 867515) em função da aplicação no plantio, via solo, de doses crescentes de fontes de Si.

Dose do produto	TCH <sup>(1)</sup>			TAH <sup>(1)</sup>		
	AgroSiCa	Agrosilício <sup>®</sup>	Média	AgroSiCa	Agrosilício <sup>®</sup>	Média
	t ha <sup>-1</sup>					
0	138,3			12,5		
0,5	150,1	152,1	151,1	13,3	14,1	13,7
1,0	165,8*	149,7	157,7	14,8*	14,1	14,5
2,0	151,7	147,4	149,6	13,0	14,1	13,5
Média	155,9 a	149,7 a		13,7 a	14,1 a	

TCH: <sup>(2)</sup> W= **0,95**; F<sub>Levene</sub> = **1,37**; F<sub>Tukey</sub> = **0,8**; CV (%) = 8,5; DMS<sub>Tukey</sub> = 11,0; DMS<sub>Dunnett</sub> = 25,7.

TAH: <sup>(2)</sup> W= **0,98**; F<sub>Levene</sub> = **1,96**; F<sub>Tukey</sub> = **0,77**; CV (%) = 8,1; DMS<sub>Tukey</sub> = 0,9; DMS<sub>Dunnett</sub> = 2,2.

<sup>(1)</sup> Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,1 de significância. \*significativo em relação à testemunha pelo teste de Dunnett a 0,05 de significância. <sup>(2)</sup> W, F<sub>Levene</sub> e F<sub>Tukey</sub>: estatística dos testes de Shapiro-Wilk, Levene e Tukey para aditividade respectivamente (0,01 de significância); valores em negrito indicam respectivamente resíduos com distribuição normal, variâncias homogêneas e blocos com efeitos aditivos.

O estudo do efeito das doses sobre os dados de produção mostra que o comportamento dos dois fertilizantes é semelhante, com aumento de produção até os valores máximos de 158 t ha<sup>-1</sup> de colmos e 14,5 t ha<sup>-1</sup> de açúcar que correspondem à dose de 1,3 t ha<sup>-1</sup> do(s) fertilizante(s), de acordo com as equações apresentadas na Figura 9.

Para doses acima de 1,3 t ha<sup>-1</sup>, segundo as equações do gráfico, a produções de colmos e de açúcar sofrem redução gradativa até a dose máxima de 2,0 t ha<sup>-1</sup> (Figura 9). A queda na produção pode ser explicada, dentre outros, por fatores relacionados ao pH do solo, isto é, a aplicação de calcário inicial (antes do plantio da cana) juntamente com as aplicações de doses elevadas (2,0 t ha<sup>-1</sup>) dos silicatos que também apresentam poder corretivo, mesmo sem aumentos drásticos nos valores de pH, podem ter causado alguma indisponibilização de nutrientes, nesse caso, micronutrientes os quais são essenciais ao desenvolvimento e à produção da cana-de-açúcar.

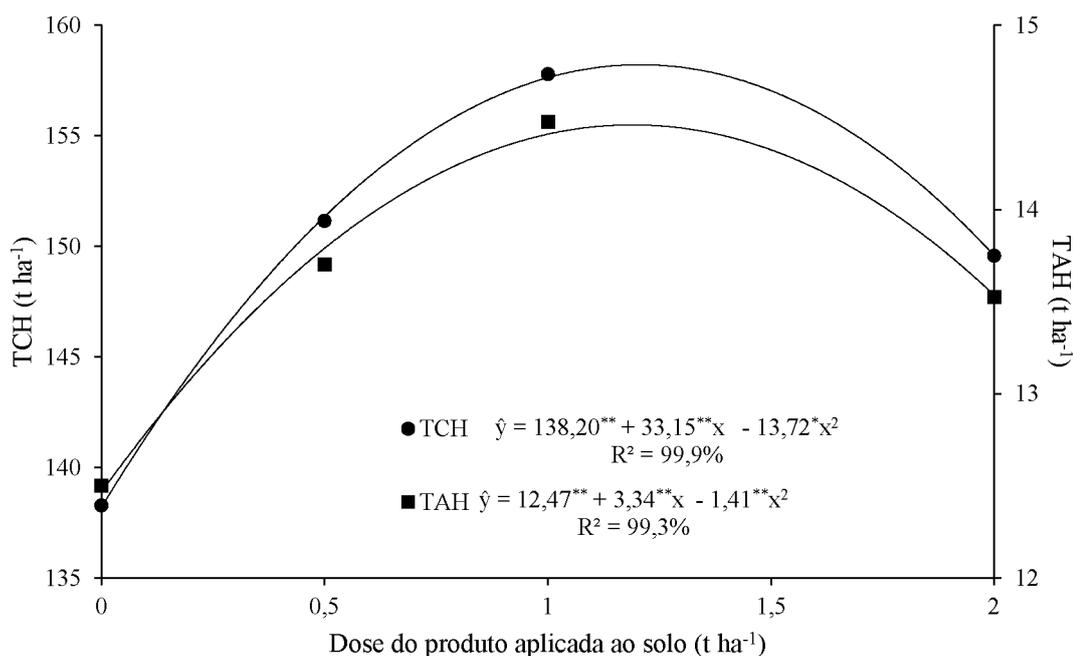


Figura 9. Valores médios de produção de colmos (TCH) e de açúcar (TAH) da cana planta (variedade RB 867515) em função da aplicação de plantio, via solo, de doses crescentes de fontes de Si (média das duas fontes).

Essa hipótese pode ser mais explorada a partir da análise dos resultados de pH do solo após o primeiro corte que variaram de 3,9 a 5,0 (Tabela 5) quando determinados em CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup>. Em um possível análise utilizando água como extrator, devido à uma

tendência conhecida, espera-se que um acréscimo de aproximadamente 0,6 nos resultados, ou seja, o pH do solo em água estaria na faixa de 4,5 a 5,6, o que poderia começar a causar a indisponibilização de alguns micronutrientes.

Abreu et al. (2007) afirmam que valores altos de pH podem provocar redução na disponibilidade de micronutrientes catiônicos (cobre, ferro, manganês e zinco). Especificamente para o zinco, a calagem, se realizada de maneira excessiva, o indisponibiliza pelo aumento da adsorção e fixação (SOUZA; FERREIRA, 1991) e pela formação de óxidos com solubilidade dependente do pH (VOLKWEISS, 1991). Também no caso do boro, o pH do solo é um fator importante na sua disponibilidade no solo, sendo a mesma reduzida com o aumento do pH, o que resulta em correlação negativa entre a absorção de B pela planta e aumento do pH do solo (GUPTA, 1993).

Na soqueira, os resultados da fonte teste e da fonte padrão de Si não diferiram entre si, sendo 150,4 t ha<sup>-1</sup> e 152,4 t ha<sup>-1</sup> os valores de TCH para cada um desses materiais, respectivamente (Tabela 18).

Tabela 18. Produção de colmos (TCH) e de açúcar (TAH) da cana soca (variedade RB 867515) em função da aplicação no plantio, via solo, de doses crescentes de fontes de Si.

Dose do produto	TCH <sup>(1)</sup>			TAH <sup>(1)</sup>		
	AgroSiCa	AgroSilício <sup>®</sup>	Média	AgroSiCa	AgroSilício <sup>®</sup>	Média
	----- t ha <sup>-1</sup> -----					
0		139,2		20,4		
0,5	137,4	132,2	134,8	20,4	19,9	20,1
1,0	159,3	159,4	159,4	23,9	25,0	24,4
2,0	154,4	165,6	160,0	22,8	25,4	24,1
Média	150,4 a	152,4 a		22,4 a	23,4 a	

TCH: <sup>(2)</sup>W= **0,98**; F<sub>Levene</sub> = **0,43**; F<sub>Tukey</sub> = **1,80**; CV (%) = 13,8; DMS<sub>Tukey</sub> = 17,7; DMS<sub>Dunnett</sub> = 41,4.

TAH: <sup>(2)</sup>W= **0,96**; F<sub>Levene</sub> = **0,06**; F<sub>Tukey</sub> = **5,35**; CV (%) = 15,7; DMS<sub>Tukey</sub> = 3,0; DMS<sub>Dunnett</sub> = 7,1.

<sup>(1)</sup>Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,1 de significância. \*significativo em relação à testemunha pelo teste de Dunnett a 0,05 de significância. <sup>(2)</sup>W, F<sub>Levene</sub> e F<sub>Tukey</sub>: estatística dos testes de Shapiro-Wilk, Levene e Tukey para aditividade respectivamente (0,01 de significância); valores em negrito indicam respectivamente resíduos com distribuição normal, variâncias homogêneas e blocos com efeitos aditivos.

Em relação à testemunha, observa-se um ganho numérico de até 20 t ha<sup>-1</sup> em resposta à aplicação de 1 t ha<sup>-1</sup> do AgroSiCa e de até 26 t ha<sup>-1</sup> de colmos quando se utilizou a dose máxima do produto AgroSilício<sup>®</sup> (Tabela 18).

Quanto à produção de açúcar, também não foi observada diferença entre os tratamentos, sendo 22,4 t ha<sup>-1</sup> e 23,4 t ha<sup>-1</sup> os resultados de TAH obtidos em resposta à

aplicação dos produtos AgroSiCa e AgroSilício<sup>®</sup>, respectivamente (Tabela 18). Novamente existem ganhos numéricos que vão de 3,5 t ha<sup>-1</sup> de açúcar no tratamento com a aplicação de 1 t ha<sup>-1</sup> da fluorita com óxido de silício até 5 t ha<sup>-1</sup> em resposta à aplicação de 2 t ha<sup>-1</sup> de AgroSilício<sup>®</sup> (Tabela 18).

Diversos trabalhos efetuados no Brasil e no exterior têm constatado efeitos benéficos do Si em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. Experimentos conduzidos com cana-de-açúcar, em solos arenosos, demonstraram aumentos de produção de 11 a 16% na cana-planta e de 11 a 20% na cana soca, com a aplicação de 2,8 t ha<sup>-1</sup> de silicato de cálcio e magnésio (DATNOFF et al., 2001).

Silveira Junior et al. (2003) demonstraram que a aplicação de 4 t ha<sup>-1</sup> de silicato resultou em aumento de 11,4% ou 16 toneladas na produção de colmos na cana soca de segundo corte. Em outro experimento foram aplicados 7,1 e 14,2 t ha<sup>-1</sup> de silicato de cálcio com aumentos médios anuais de 13,9 e 18,2 t ha<sup>-1</sup> na produção de colmos durante seis anos de avaliação (KORNDÖRFER et al., 2002).

Demattê et al. (2011) também concluíram que, nas mais diversas regiões do estado de São Paulo, tanto em cana planta como na soqueira, a ação do silicato nos solos testados foi positiva no aumento da produtividade.

Prado (2000), avaliando a resposta da cana à aplicação de escória como corretivo de acidez, obteve produtividade de 100 t ha<sup>-1</sup> de colmos em cana planta, cuja testemunha produziu 89 t ha<sup>-1</sup> e em cana soca, a aplicação da escória resultou em 75 t ha<sup>-1</sup> de produtividade contra 58 t ha<sup>-1</sup> da testemunha. Nesse estudo verificou-se ainda que, devido ao efeito residual da escória siderúrgica, o decaimento da produção ao longo dos cortes da cultura foi menor.

Brassioli et al. (2009) avaliando a resposta da cultura da cana-de-açúcar durante cinco ciclos de produção em função da aplicação da escória de siderurgia observou que a produção de colmos foi afetada significativamente pelas doses dos corretivos (0; 1,23; 2,52 e 3,8 t ha<sup>-1</sup> equivalente a CaCO<sub>3</sub>), não havendo diferença entre a escória e o calcário nos primeiros dois anos, mas com superioridade da escória do terceiro ao quinto ano. Segundo os autores, a não diferença entre os corretivos para os dois anos iniciais também mostra que o efeito residual da fonte de Si no aumento da produção é mais importante na soqueira, o que pode ser um benefício, reduzindo a intensidade de queda de produção ao longo dos cortes no ciclo da cultura.

Nessa linha, Anderson et al. (1991) observaram, para média dos primeiros três cortes, reduções de 45% e 28% na produção de colmos da soqueira nas parcelas sem e

com a aplicação da escória de siderurgia (doses de 0; 2,5; 5; 10 e 20 t ha<sup>-1</sup>), respectivamente.

Clements (1965) cita ainda que a aplicação de Si em cana-de-açúcar aumenta também a produção de açúcar, como observado nos resultados do experimento e, Allorerung (1989) obteve resultados que mostram relação estreita do rendimento de colmos e de açúcar, em função da aplicação de silicato em solos ácidos da Indonésia.

Elawad et al. (1982), estudando o efeito da aplicação de escória em soqueira de cana-de-açúcar, nas doses de 0; 5; 10; 15 e 20 t ha<sup>-1</sup> também observaram relação positiva entre o rendimento de colmos e de açúcar, o que estaria associado ao incremento no número e na altura de colmos.

### 3.5 Produção acumulada

A produção de colmos dos dois primeiros anos de cultivo (cana planta e cana soca) indica que os produtos estudados não diferem entre si (Tabela 19) e, apesar de não haver diferença estatística, a aplicação de qualquer uma das fontes de Si estudadas, em qualquer uma das doses, resulta em TCH acumulada de dois anos numericamente superior à da testemunha com incrementos que variam de 10,2 a 47,6 t ha<sup>-1</sup> em resposta à aplicação da fluorita com óxido de silício e de 7,0 a 35,5 t ha<sup>-1</sup> quando se usa o AgroSilício<sup>®</sup> (Tabela 19). Na média, os resultados de TCH são estatisticamente iguais entre as duas fontes de Si, no entanto o AgroSiCa é 4,2 t ha<sup>-1</sup> superior ao AgroSilício<sup>®</sup> (Tabela 19).

Tabela 19. Produção de colmos (TCH) e de açúcar (TAH) acumulada de dois cortes (primeiro e segundo cortes) (variedade RB 867515) em função da aplicação no plantio, via solo, de doses crescentes de fontes de Si.

Dose do produto	----- TCH acumulada <sup>(1)</sup> -----			----- TAH acumulada <sup>(1)</sup> -----		
	AgroSiCa	AgroSilício <sup>®</sup>	Média	AgroSiCa	AgroSilício <sup>®</sup>	Média
	----- t ha <sup>-1</sup> -----					
0	277,4			32,9		
0,5	287,6	284,4	286,0	33,7	34,0	33,8
1,0	325,0	309,2	317,1	38,7	39,0	38,9
2,0	306,2	312,9	309,5	35,9	39,4	37,7
Média	306,3 a	302,1 a		36,1 a	37,5 a	

TCH: <sup>(2)</sup> W= **0,95**; F<sub>Levene</sub> = **2,29**; F<sub>Tukey</sub> = **3,67**; CV (%) = 8,7; DMS<sub>Tukey</sub> = 22,4; DMS<sub>Dunnnett</sub> = 52,4.

TAH: <sup>(2)</sup> W= **0,97**; F<sub>Levene</sub> = **0,27**; F<sub>Tukey</sub> = **0,11**; CV (%) = 10,3; DMS<sub>Tukey</sub> = 3,2; DMS<sub>Dunnnett</sub> = 7,4.

<sup>(1)</sup> Médias seguidas por letras distintas na linha diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,1 de significância. \*significativo em relação à testemunha pelo teste de Dunnnett a 0,05 de significância. <sup>(2)</sup> W, F<sub>Levene</sub> e F<sub>Tukey</sub>: estatística dos testes de Shapiro-Wilk, Levene e Tukey para aditividade respectivamente (0,01 de significância); valores em negrito indicam respectivamente resíduos com distribuição normal, variâncias homogêneas e blocos com efeitos aditivos.

Para a produção acumulada de açúcar, a aplicação de Si também responde favoravelmente com incrementos numéricos de até 6,5 t ha<sup>-1</sup> em dois anos e sem diferença entre o produto em teste (AgroSiCa) e a fonte de Si padrão (AgroSilício) (Tabela 19).

O aumento da dose das fontes de Si aplicadas ao solo na ocasião do plantio resulta em aumento linear, com incremento de 17 t ha<sup>-1</sup> de colmos para cada tonelada de fertilizante, sendo esse o comportamento médio das duas fontes em estudo (Figura 10).

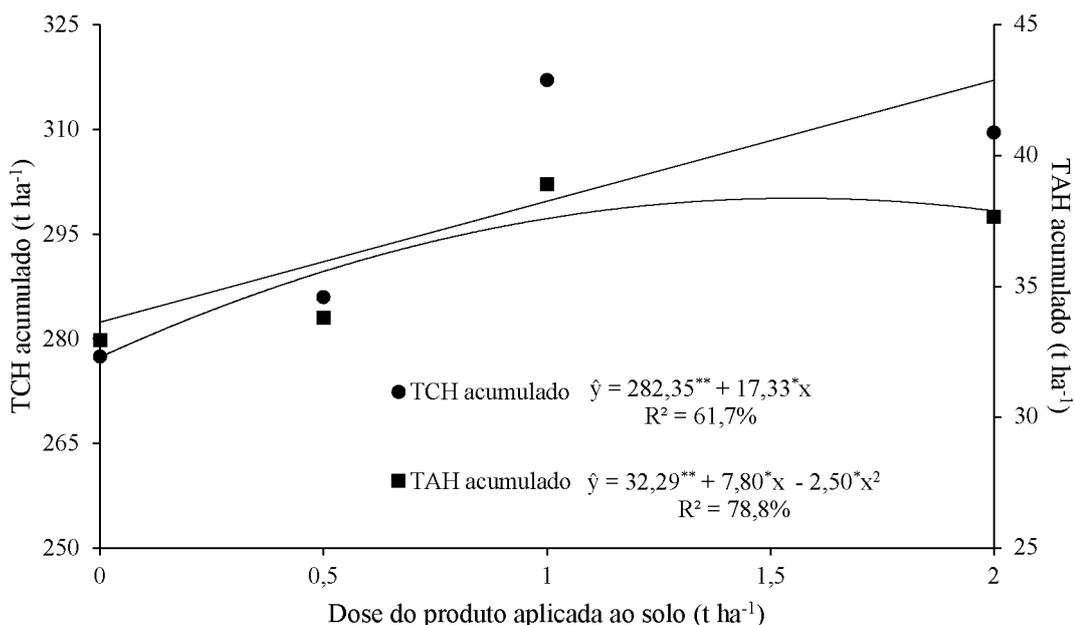


Figura 10. Valores médios de produção acumulada de colmos (TCH) e de açúcar (TAH) em dois cortes (cana planta e 1ª cana soca) (variedade RB 867515) em função da aplicação de plantio, via solo, de doses crescentes de fontes de Si (média das duas fontes).

A análise do gráfico apresentado na Figura 10, também mostra que a aplicação de 2,0 t ha<sup>-1</sup> de Si resulta em TCH acumulada de dois anos equivalente a 317,0 t ha<sup>-1</sup>, valor esse que é, aproximadamente, 35 t ha<sup>-1</sup> superior ao da testemunha, resultado esse que mostra viabilidade da aplicação de Si tanto pela maior produtividade quanto maior longevidade do canavial.

Brassioli et al. (2009) obtiveram resultado semelhante com incremento de ajuste linear para a produção acumulada de colmos da cana-de-açúcar nas safras de 1998 a 2003, em função da aplicação de escória ou calcário.

Também como comportamento médio das duas fontes de Si, observa-se resposta ao aumento da dose aplicada, o qual resulta em incremento na produção acumulada de

açúcar nos dois primeiros cortes até a dose de  $1,5 \text{ t ha}^{-1}$  que corresponde à  $38,4 \text{ t ha}^{-1}$  de açúcar (Figura 10).

#### 4 CONCLUSÕES

A fluorita com óxido de silício e o silicato de cálcio e magnésio apresentaram comportamento semelhante quanto à disponibilização de Si, Ca, Mg e P no solo, sem alterar em larga escala o pH do mesmo e com incrementos no teor de Si de 0 a 25 cm de profundidade em função do aumento da dose aplicada.

Em cana planta, a concentração de Si foliar foi maior e crescente em resposta à aplicação de Si ao passo que as concentrações foliares de Ca, Mg e P foram superiores para o uso da fluorita com óxido de silício.

A aplicação de  $1,0 \text{ t ha}^{-1}$  da fluorita com óxido de silício aumentou em 20% a produção de colmos e de açúcar em cana planta e o uso de Si gerou incremento linear na produção acumulada de colmos e também na de açúcar, porém esta somente até a dose estimada de  $1,5 \text{ t ha}^{-1}$ .

A fluorita com óxido de silício (AgroSiCa) apresenta potencial de uso como fertilizante para a cultura da cana-de-açúcar.

## REFERÊNCIAS

- ABELSON, P. H.; ROWE, J. W. A New Agricultural Frontier. New York, **Science**, v. 235, n. 4795, p. 1450-1451, mar.1987.
- ABREU, C. A.; LOPES, A. S.; SANTOS, G. Micronutrientes. In: NOVAIS, R. F., et al. (eds.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de ciência do solo. 2007. p. 645 – 736.
- ALCARDE, J. C. **Corretivos da acidez dos solos: características e interpretações técnicas**. São Paulo: Associação Nacional para Difusão de Adubos e Corretivos, 1992. p.1-26. (Boletim Técnico, 6).
- ALLORERUNG, D. **Influence of steel slag application to red/yellow podzolic soils on soil chemical characteristics, nutrient content and uptake, and yield of sugarcane plantations (*Saccharum officinarum* L.)**. Bogor, Indonésia: Faculty of Agriculture / IPB, 1989. p. 14-42. (Bulletin -Pusat-Penelitian-Perkebunan-Gula-Indonesia. N. 136).
- ALVAREZ, V. H. A.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, LOPES, A. S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. (Ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª Aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais. 1999. p. 143-167.
- ANDERSON, D. L.; BOWEN, J. E. **Nutrição da cana-de-açúcar**. Piracicaba. POTAFÓS, 1992. 40 p.
- ANDERSON, D. L. Soil and leaf nutrient interations following application of calcium silicate slag to sugarcane. **Fertilizer Research**, The Hague, v. 30, n. 1, p. 9-18, 1991.
- ANDERSON, D. L.; SNYDER, G. H.; MARTIN, G. G. Multi-year response of sugarcane to calcium silicate slag on everglades histosols. **Agronomy Journal**, Madison, v.83, p.870-874, 1991.
- ARAÚJO, L. S. **Escórias siderúrgicas e seus efeitos sobre a produtividade, qualidade industrial, e resistência da cana-de-açúcar à doenças e à broca-do-colmo**. 2010. 71 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.
- ARRUDA, D. P. **Avaliação de extratores químicos na determinação de silício disponível em solos cultivados com cana-de-açúcar**. 2009. 78 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, SP. 2009.
- BASTOS, J. C. H. A. G. **A escória de siderurgia como material corretivo e a interação com a adubação nitrogenada em cana-de-açúcar**. 2008. 69 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, SP.

- BRAIT, M. A. H. **Interação silício e fósforo na adsorção desses elementos em diferentes solos de cerrado**. 2008. 108 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Goiás, Jataí, GO.
- BRASSIOLI, F. B.; PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M. Avaliação agrônômica da escória de siderurgia na cana-de-açúcar durante cinco ciclos de produção. **Bragantia**, Campinas, v. 68, n. 2, p 381-387, 2009.
- CAMARGO, M. S. de. Silício em cana-de-açúcar. **Pesquisa & Tecnologia**, Campinas, v.8, n. 2, jul./dez. 2011.
- CARMO, C. A. F. de S.; ARAÚJO, W, S. de; BERNARDI, A. C. de C.; SALDANHA, M. F. C. **Métodos de análise de tecidos vegetais utilizados na Embrapa Solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2000. 41 p. (Embrapa Solos. Circular Técnica; 6).
- CARVALHO, R.; FURTINI NETO A. E.; SANTOS, C. D. dos; FERNANDES, L. A.; CURI, N; RODRIGUES, D. de C. Interações silício-fósforo em solos cultivados com eucalipto em casa de vegetação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 36, n. 3, p. 557-565, mar. 2001.
- CARVALHO, R.; FURTINI NETO, A. E.; CURI, N.; FERNANDES L. A.; OLIVEIRA JR., A. C. Dessorção de fósforo por silício em solos cultivados com eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 24, p. 69-74, 2000.
- CASTRO, S. S.; ABDALA, K. SILVA. A. A. BÔRGES, V. M. S. A expansão da cana de açúcar no cerrado e no estado de Goiás: elementos para uma análise espacial do processo. **Boletim Goiano de Geografia**. Goiânia, v. 30, n. 1, p. 171-191, jan./jun. 2010.
- CHILDERS, D. L.; CORMAN, J.; EDWARDS, M.; ELSER, J. J. Sustainability Challenges of Phosphorus and Food: Solutions from Closing the Human Phosphorus Cycle. **BioScience**, Washington, v. 61, p. 117-124, 2011.
- CLEMENTS, H.F. Effects of silicate on the growth and leaf freckle of sugarcane. **Proceedings of International Society of Sugar Cane Technologists**, p. 225-226, 1965.
- CONSECANA - Conselho dos Produtores de Cana-de-açúcar, Açúcar e Álcool do Estado de São Paulo. **Manual de instruções**. 5.ed. CONSECANA-SP, Piracicaba, 2006. 112p.
- CUNHA, A. S (Coord.) **Uma avaliação da sustentabilidade da agricultura nos cerrados**. Brasília: IPEA, 1994. 204 p.
- DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H., KORNDÖRFER, G. H. **Silicon in Agriculture**. Amsterdam: Elsevier, 2001. 403p.
- DEMATTÊ, J. L. I.; PAGGIARO, C. M.; BELTRAME, J. A.; RIBEIRO, S. S. **Uso de silicatos em cana-de-açúcar**. Informações Agronômicas, Piracicaba, n. 133, 6 p, 2011.

- DEREN, C. Plant genotype, silicon concentration, and silicon related responses. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. **Silicon in agriculture**. Amsterdam: Elsevier, 2001. Cap. 8. p.149-158.
- ELAWAD, S. H.; GASCHO, G. J.; STREET, J. J. Response of sugarcane to silicate source and rate. I. Growth and yield. **Agronomy Journal**, Madison, v.74, p. 481-483, 1982.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009. 412p.
- FERREIRA, D. F. Sisvar: um programa para análises e ensino de estatística. **Revista Symposium**, v.6, n. 2, p.36-41, jul./dez. 2008.
- FOLTRAN, R. **Aplicação foliar de silício associado ou não a maturadores em cana-de-açúcar**. 2013. 132f. Tese de doutorado (Doutorado em Agronomia) – Faculdades de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2013.
- FRANCO, H. C. J.; CANTARELLA, H.; TRIVELLIN, P. C. O.; VITTI, A. C.; OTTO, R.; FARONI, C. E.; SARTORI, R. H.; TRIVELLIN, M. O. Acúmulo de Nutrientes pela Cana-Planta. **STAB**, Piracicaba, v. 26, n.5, p. 41-45, 2008.
- GUPTA, U. C. **Boron and its role in crop production**. Charlottetown, Prince Edward Island: Agriculture Canada Research Station. 1993. p.46.
- ISLAM, M.; PATEL, R. K. Evaluation of removal efficiency of fluoride from aqueous solution using quick lime. **Journal of Hazardous Materials**, Amsterdam, v. 143, p. 303-310, 2007.
- KER, J. C. **Mineralogia, sorção e dessorção de fosfato, magnetização e elementos traços de Latossolos do Brasil**. 1995. 181 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- KLINK, C. A.; MACHADO, R. B. A conservação do Cerrado brasileiro. Belo Horizonte, **Megadiversidade**, v. 1, n. 1, jul. 2005, p. 148-155
- KORNDÖRFER, G. H. Uso do silício na agricultura. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba, n. 117, p. 9-11, 2007.
- KORNDÖRFER, G. H. Elementos benéficos. In: FERNANDES, M. S. (Ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. 432p.
- KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; NOLLA, A. **Análise de silício: solo, planta e fertilizante**. Uberlândia: GPSi/ICIAG/UFU, 2004. 34 p. (Boletim Técnico, 2)
- KORNDÖRFER, G. H.; PEREIRA, H. S.; CAMARGO, M. S. Papel do silício na produção de cana de açúcar. **STAB**, Piracicaba, v. 21, n. 2, p. 6 - 9, 2002.

- KORNDÖRFER, G. H.; SNYDER, G. H.; DATNOFF, L. E. Calibration of soil and plant silicon analysis for rice production. **Journal of Plant Nutrition**, Athens, v. 24, n. 7, p 1071 – 1084, 2001.
- 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 de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 1, p 101 – 106, 1999.
- KORNDÖRFER, G. H.; DATNOFF, L. E. **Adubação com silício: uma alternativa no controle de doenças da cana de açúcar e do arroz**. Informações Agronômicas. Piracicaba. n. 70, p. 1-5, 1995.
- LEITE, P. C. **Interação silício-fósforo em Latossolo-Roxo cultivado com sorgo em casa de vegetação**. 1997. 87 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- MADEIROS, L. B.; VIEIRA, A. O.; AQUINO, B. F. Micronutrientes e silício nas folhas de cana-de-açúcar: Escória siderúrgica aplicado no solo. **Engenharia Ambiental**, Espírito Santo do Pinhal, v.6, p.27-37, 2009.
- MARTINEZ, H. E. P.; CARVALHO, J. G.; SOUZA, R. B. Diagnose foliar. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. (ed.). **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª Aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais. 1999. p. 143-167.
- MATCHENKOV, V. V.; CALVERT, D. V. Silicon as a beneficial element for sugarcane. **Journal American Society of Sugarcane Technologists**. [S.l.], v. 22, p. 21. 2002.
- Mc KEAGUE, J. A.; CLINE, M. G. Silica in soils. **Advances in Agronomy**, New York, v.15, n. 3, p. 339-397, 1963.
- MELO, S. P. **Silício e fósforo para estabelecimento do capim-marandu num Latossolo Vermelho-Amarelo**. 2005. 110 p. Tese (Doutorado em Agronomia) Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP.
- MYERS, N.; MITTERMAYER, R. A.; MITTERMAYER, C. G.; FONSECA, G. A.; KENT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, 403, p. 853-858, 2000.
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F. de; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2007. 1017p.
- OLIVEIRA, E. C. A. de. **Dinâmica de nutrientes em cana-de-açúcar em sistema irrigado de produção**. 2008. 73 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife.

OLIVEIRA, M. G. A. **Determinação adsorção e deslocamento recíproco de silício e fósforo em Latossolos do Triângulo Mineiro**. 1984. 68 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

ORLANDO FILHO, J. (Coord.). **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba: IAA/Planalsucar, 1983. 369 p. (Planalsucar, 2).

PARFITT, R. L. Anion adsorption by soils and soils materials. **Advances in Agronomy**, San Diego, n. 30, p.1-50, 1978.

PRADO, F. 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.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M. Resposta da cana-de-açúcar à aplicação da escória de siderurgia como corretivo de acidez do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 1, p 199 – 207, 2001.

PRADO, R. M.; FERNANDES, F. M. **Resposta da cana-de-açúcar à aplicação de escória silicatada como corretivo de acidez do solo**. 2000. 97 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, SP.

QUEIROZ, A. A. **Reação de fontes de silício em quatro solos do cerrado**. 2003. 39p. Monografia (Graduação em Agronomia) – Universidade Federal de Uberlândia. Instituto de Ciências Agrárias, Uberlândia, MG.

RAIJ, B. V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. (eds.) **Recomendações de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo**. Boletim Técnico do Instituto Agronômico, Campinas, n. 100, 1997. 285 p.

RAIJ, B. V.; CAMARGO, O. A. Sílica solúvel em solos. **Bragantia**, Campinas, v. 32, p 223-231, 1973.

RIBEIRO, A. C.; FIRME, D. J.; MATOS, A. C. M. Avaliação da eficiência de uma escória de aciaria como corretivo da acidez. **Revsita Ceres**, Viçosa, v. 33, p 242-248, 1986.

SAHA, S. Treatment of aqueous effluent for fluoride removal. **Water Research**, Nova Iorque, v. 27, p. 1347-1350, 1993.

SANO, E. E.; ROSA, R.; BRITO, J. L. S.; FERREIRA, L. G. Mapeamento semi detalhado do uso da terra do Bioma Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Rio de Janeiro, v. 43, n. 1, jan. 2008, p.153-156.

SANO, E. E.; FERREIRA, L. G. Monitoramento semi detalhado (escala 1:250.000) de ocupação de solos do cerrado: considerações e proposta metodológica. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSOREAMENTO REMOTO, 2005, Goiânia. **Anais...** INPE, 2005, p. 3309-3316.

SAVANT, N. K.; DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H. Depletion of plant-available silicon in soils: as possible cause of declining rice yields. **Communications in soil science and plant analysis**, Nova Iorque, v. 28, p. 1245-1252, 1997.

SHIKI, S. Sistema agroalimentar no Cerrado brasileiro: caminhando para o caos? In: SILVA, J. G.; SHIKI, S.; ORTEGA, A. C. (orgs.) **Agricultura, meio ambiente e sustentabilidade do Cerrado brasileiro**. Uberlândia, UFU. 1997. 372 p.

SILVA, F. A. S.; AZEVEDO, C. A. V. Versão do programa computacional Assistat para o sistema operacional. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 4, n.1, p 71-78, 2002.

SILVEIRA JUNIOR, e G.; PENATTI, C.; KORNDORFER, G. H.; CAMARGO, M. S. de. Silicato de cálcio e calcário na produção e qualidade da cana-de-açúcar - Usina Catanduva. In: XXIX Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 2003, Ribeirão Preto. **Anais... Solo: Alicerce dos Sistemas de Produção**, p. 66.

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.

SOUSA, R. T. X.; KORNDÖRFER, G. H.; WANGEN. D. R. B. Aproveitamento de silício proveniente de escória siderúrgica por cultivares de cana-de-açúcar. **Bragantia**, Campinas, v. 69, n. 3, p. 669-676, 2010.

SOUZA, E. C. A.; FERREIRA, M. E. Zinco. In: FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. (Eds.). **Micronutrientes na agricultura**. Piracicaba: Potafos / CNPq, 1991. p.219-242.

Statistical Package for the Social Sciences Inc. **SPSS statistics for Windows, version 17.0**. Chicago: SPSS Inc, 2008.

VALE, L. A. R. **Avaliação do potencial de uso agrícola da fluorita com óxido de silício, derivado da fabricação de fertilizantes fosfatados – AgroSiCa**. 2016. 86 p. Tese (Doutorado em Recursos Naturais e Uso da Terra) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

VOLKWEISS, S. J. **Fontes e métodos de aplicação**. In FERREIRA, M. E.; CRUZ, M. C. P. (eds.). **Micronutrientes na agricultura**. Piracicaba: POTAFOS / CNPq, 1991. p.391-412.

WHITTENM, G.; RITCHIE, G. S. P. A comparison of soil tests to predict the growth and nodulation of subterranean clover in aluminium toxic topsoils. **Plant Soil**. S. 1., v. 136, p. 11-24, 1991.

XIE, Z. M.; WU, W. H.; XU, J. M., Translocation and transformation of fluorides in the environment and their biological effects. **Adv Env Sci**. S. 1., v. 7, p. 40-53, 1999. (In Chinese)

ZHANG, G. Y.; YU, T.R. Coordination adsorption of anions. In: YU, T. R. (Ed.) **Chemistry of Variable Charge Soils**. New York, Oxford University Press., 1997. p. 175-218.

## ANEXOS

### Anexo A – Caracterização química dos fertilizantes utilizados no estudo.

Tabela 1A. Caracterização química do produto Agrosilício®

Ca <sup>1</sup>	Mg <sup>1</sup>	Si Total <sup>2</sup>	Si Solúvel <sup>3</sup>	PN	PRNT
%					
25,7	6,6	10,7	6,1	91,9	78,2
Cu <sup>4</sup>	Fe <sup>4</sup>	Zn <sup>4</sup>	Mn <sup>4</sup>	Cd <sup>4</sup>	Ni <sup>4</sup>
%					
0,0	0,2	0,0	0,3	0,0	0,2

<sup>1</sup>Extração ácida HCl concentrado; <sup>2</sup>Si total extraído com HCl + HF concentrados; <sup>3</sup>Si Solúvel extraído com Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 10 g L<sup>-1</sup> + NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 16 g L<sup>-1</sup>. <sup>4</sup>Digestão ácida HCl 1:1.

Tabela 2A. Caracterização química do produto AgroSiCa

Característica	Teor
pH em água	10,23 ± 0,20
Umidade	33 ± 2,80 %
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (total)	0,23 ± 0,02 %
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (água)	<LQ
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (CNA + água)	0,17 ± 0,01 %
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (Ác. Cítrico)	0,26 ± 0,01 %
Ca <sup>1</sup>	22,06 ± 0,32 %
Mg <sup>1</sup>	0,48 ± 0,04 %
Si Total <sup>2</sup>	9,08 %
Si solúvel <sup>3</sup>	3,57 %
PN	11,52 ± 0,5 %
PRNT	9,53 ± 1,55 %
Fluoreto (HCl)	17,56 ± 0,86 %
Fluoreto (CNA)	0,31 ± 0,11 %
Fluoreto (água)	0,027 ± 0,003 %
Fluoreto (Ác. Cítrico)	0,25 ± 0,14 %

LQ: = Limite de Quantificação (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> água) = 0,06 mg kg<sup>-1</sup>. <sup>1</sup>Extração ácida HCl concentrado; <sup>2</sup>Si total extraído com HCl + HF concentrados; <sup>3</sup>Si Solúvel extraído com Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> 10 g L<sup>-1</sup> + NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 16 g L<sup>-1</sup>.

Fonte: Vale, 2016.

**Anexo B – Caracterização química e física do solo da área de instalação do experimento.**

Tabela 1B. Caracterização química e física (0-25 cm) do solo classificado como LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico (LVAd) (Fazenda Santa Fé do Cedro, Uberaba-MG. 2013).

<b>pH</b> H <sub>2</sub> O	<b>P</b>	<b>K</b>	<b>Al<sup>3+</sup></b>	<b>Ca<sup>2+</sup></b>	<b>Mg<sup>2+</sup></b>	<b>SB</b>	<b>T</b>	<b>V</b>	<b>M.O.</b>
	----- mg dm <sup>-3</sup> -----		----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----					-- % --	dag kg <sup>-1</sup>
4,7	1,0	87,1	0,3	1,2	0,5	1,9	3,7	47,8	2,4
<b>Si</b>	<b>B</b>	<b>Cu</b>	<b>Fe</b>	<b>Mn</b>	<b>Zn</b>	<b>Areia</b>	<b>Silte</b>	<b>Argila</b>	
	----- mg dm <sup>-3</sup> -----						----- g kg <sup>-1</sup> -----		
3,1	0,1	0,8	25,6	1,3	0,5	566	323	111	

P, K, Ca, Mg = Resina; Al = KCl 1 mol L<sup>-1</sup>; SB = Soma de Bases; T = CTC a pH 7,0; V = Saturação por bases; M.O. = Walkley e Black; Si = CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup>; B = Água quente; Cu, Fe, Mn, Zn = DTPA; Areia, Silte, Argila = Pipeta.

Tabela 2B. Caracterização química (25-50 cm) do solo classificado como LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico (LVAd) (Fazenda Santa Fé do Cedro, Uberaba-MG. 2013).

<b>pH</b> H <sub>2</sub> O	<b>Si</b>	<b>P</b>	<b>K</b>	<b>Al<sup>3+</sup></b>	<b>Ca<sup>2+</sup></b>	<b>Mg<sup>2+</sup></b>	<b>SB</b>	<b>T</b>	<b>V</b>	<b>M.O.</b>
	----- mg dm <sup>-3</sup> -----		----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----					-- % --	dag kg <sup>-1</sup>	
4,5	3,3	1,0	57,2	0,5	0,6	0,2	0,9	2,9	31,5	1,5

Si = CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup>; P, K, Ca, Mg = Resina; Al = KCl 1 mol L<sup>-1</sup>; SB = Soma de Bases; T = CTC a pH 7,0; V = Saturação por bases; M.O. = Walkley e Black.

## CAPÍTULO 2 - Silicato de cálcio aplicado em diferentes doses e épocas na produção de cana-de-açúcar no estado da Louisiana (EUA)

### RESUMO

SANTOS, GUSTAVO ALVES. **Silicato de cálcio aplicado em diferentes doses e épocas na produção de cana-de-açúcar no estado da Louisiana (EUA)**. 2017. 29 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.<sup>1</sup>

A aplicação de Si nos canaviais da Louisiana, quando feita, utiliza altas doses em pré-plantio, porém uma alternativa é a aplicação anual, em conjunto com outros nutrientes. Comparar a eficiência de Si aplicado anualmente e em pequenas doses, versus a aplicação de altas doses no plantio da cana-de-açúcar, através do teor de Si no solo, pH do solo, produção de colmos e de açúcar, acúmulo de Si e disponibilidade de nutrientes essenciais no solo foi o objetivo desse estudo. O experimento foi instalado em delineamento experimental de blocos casualizados, com quatro repetições e oito tratamentos sendo uma testemunha sem aplicação de Si, um padrão com a aplicação de 4,5 t ha<sup>-1</sup> de CaSiO<sub>3</sub> no plantio, dois tratamentos com aplicação na data do plantio e anual, sendo 2,2 t ha<sup>-1</sup> no plantio + 1,1 t ha<sup>-1</sup> anual e 1,1 t ha<sup>-1</sup> no plantio e anualmente, além de quatro tratamentos com doses crescentes (0,6; 1,1; 1,7 e 2,2 t ha<sup>-1</sup>) aplicadas anualmente. A fonte de Si utilizada foi um silicato de cálcio com 12 % de Si total, 23% de Ca e 7 % de Mg e o solo da área de instalação do experimento apresentava 40 mg dm<sup>-3</sup> de Si. As parcelas foram compostas por três linhas com 12 m de comprimento espaçadas 1,8 m entre si. A aplicação dos tratamentos foi realizada na data do plantio, manualmente, em linha, antes da abertura dos sulcos com posterior incorporação ao solo, abertura do sulco e plantio. As aplicações anuais foram realizadas manualmente, numa faixa de aproximadamente, 15 cm ao lado da linha, nos meses de março e abril de 2013 a 2015 (período de condução do experimento). Foram avaliados o teor de ATR, a concentração de Si e o Si acumulado no colmo, a produção de colmos, de açúcar e os teores de Si, P, K, Ca, Mg, S, Na, Zn e Cu além do pH do solo. Foi feita a análise de variância utilizando-se o procedimento PROC MIXED no software SAS<sup>®</sup> 9.3 para testar o efeito dos tratamentos sobre todos os parâmetros mensurados e as diferenças nos parâmetros significativamente afetados pelos tratamentos foram identificadas através da comparação das médias dos quadrados mínimos (LSD) a 0,10 de significância. Baseado nas respostas de produção de colmos e de açúcar, nas alterações do pH e na disponibilidade dos nutrientes no solo, incluindo Si, a aplicação anual de CaSiO<sub>3</sub> em pequenas doses mostrou potencial como sendo uma boa prática para a adubação com Si na cultura da cana-de-açúcar.

**Palavras-chave:** aplicação anual, produção de colmos, produção de açúcar, *Saccharum officinarum* L., silício.

---

<sup>1</sup>Comitê Orientador: Gaspar Henrique Korndörfer – UFU (Orientador) e Hamilton Seron Pereira – UFU (Co-orientador).

## ABSTRACT

SANTOS, GUSTAVO ALVES. **Calcium silicate applied at different rates and time in sugarcane production in Louisiana State (USA)**. 2017. 29 p. Thesis (Ph.D. in Agronomy) - Federal University of Uberlândia.<sup>2</sup>

Si application in sugarcane areas in Louisiana State is not a very common practice and is usually made using high rates applied before planting, however an alternative is the annual application of Si and other nutrients together. To compare the efficiency of small rates of Si applied annually versus high Si rates applied at sugarcane planting, evaluating soil Si and pH, cane and sugar yield, Si uptake and soil essential nutrients availability was the objective of this study. The trial was established in a randomized complete block design, with four replications and eight treatments including a check treatment without Si application, a standard treatment with 4.5 t ha<sup>-1</sup> de CaSiO<sub>3</sub> applied at planting, two treatments with at planting and annual application using 2.2 t ha<sup>-1</sup> at planting + 1.1 t ha<sup>-1</sup> annually e 1.1 t ha<sup>-1</sup> at planting and annually and four treatments with increasing rates (0.6; 1.1; 1.7 e 2.2 t ha<sup>-1</sup>) applied annually. The Si source used was a calcium silicate containing 12% of total Si, 23 % of Ca and 7 % of Mg and the soil in the area where the trial was established presented an initial soil Si content of 40 mg dm<sup>-3</sup>. The plots consisted of three 1.8 m wide x 2 m long rows. Treatments application were made at planting date, manually, linearly, prior to opening of the furrows followed by incorporation, furrows opening and cane planting. Annual application were made by hand, approximately 15 cm from the middle of the row, in March and April of 2013 from 2015 (period that the trial was conducted). The parameters analyzed were TRS content, Si uptake and accumulated Si, cane and sugar yield, soil Si, P, K, Ca, Mg, S, Na, Zn, Cu and pH. A variance analysis was made using PROC Mixed in SAS to test the effect of treatments on all the measured parameters and the differences in that parameters significantly affected by treatments were identified using Least square means comparison ( $P < 0.10$ ). Based on cane and sugar yield response, changes on soil pH, and nutrient availability including silicon, annual CaSiO<sub>3</sub> application at modest rates showed potential as a good practice for silicon fertilization in sugarcane.

**Keywords:** annual application, cane yield, *Saccharum officinarum* L., silicon, sugar yield.

---

<sup>2</sup>Supervising Committee: Gaspar Henrique Korndörfer – UFU (Supervisor) and Hamilton Seron Pereira (Co-supervisor).

## 1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é comercialmente produzida em quatro estados ao longo dos Estados Unidos: Louisiana, Flórida, Texas e Havaí. Na Louisiana a atividade é parte importante da história e da economia do estado, sendo caracterizada também como uma das indústrias históricas americanas. Nos primeiros anos da produção de cana, as produtividades obtidas eram de 36,0 a 45,0 t ha<sup>-1</sup> (LEGENDRE et al., 2000), porém nos anos seguintes, a introdução de novas variedades com elevado potencial produtivo e resistência a pragas aumentou a produtividade em todo o estado, atingindo valores médios de 67,0 a 112,0 t ha<sup>-1</sup> (LEGENDRE, 2001).

Em 2015, com aproximadamente 166 mil hectares de cana-de-açúcar colhidos e com produtividade média estimada de 78,0 t ha<sup>-1</sup>, o estado da Louisiana foi o segundo maior em área plantada, sucedendo o estado da Flórida, porém o menos produtivo dos Estados Unidos (USDA, 2016). Ainda, de acordo com Hawthorn (2010), aproximadamente 40% do total de açúcar proveniente de cana dos Estados Unidos é produzido na Louisiana. Também, em termos sociais a indústria canavieira da Louisiana, com suas atividades de plantio, colheita, processamento e refinaria gera de 27 a 32 mil empregos diretos no estado (LEGENDRE et al., 2000).

No estado da Louisiana a cultura da cana-de-açúcar é cultivada, principalmente, na região sul, em um ciclo tradicional de três a quatro anos, com plantio realizado após determinado tempo de pousio do solo (LOFTON et al., 2012; GREENLAND, 2005). Nessa região dos EUA o cultivo da cana é feito, praticamente, durante 9 meses apenas, sendo, portanto, menor em comparação com outras regiões produtoras de cana, onde esse período pode ser superior a 12 meses (LOFTON et al., 2012).

No geral, a recomendação é fazer o plantio nos meses de agosto ou setembro, visto que, plantios tardios resultam em produtividades significativamente menores tanto para cana planta quanto para primeira soqueira (VIATOR et al., 2005). Depois do plantio, a brotação inicial cresce até cerca de 1 m de altura até a ocasião do inverno (dezembro a fevereiro), que devido às baixas temperaturas, causa congelamento e morte da parte aérea das plantas. Após esse período, a partir da biomassa presente no solo, a cana rebrota durante as estações de primavera (março a maio) e verão (junho a agosto) seguintes, dando origem assim à safra de cana planta (GREENLAND, 2005).

Durante o período de crescimento, a cultura da cana passa por fases distintas, caracterizadas por emergência, perfilhamento, crescimento e maturação, cada uma com duração aproximada de um a três meses (LOFTON et al., 2012). A fase de crescimento

propriamente dito é caracterizada por taxas máximas de desenvolvimento, ocorrendo nos meses de junho, julho e agosto, e resultando em plantas com altura de 2,5 a 3,0 m e dossel bastante cheio no final de agosto (GREENLAND, 2005).

Nos últimos anos, a colheita tem sido feita a partir do final de setembro até o início de janeiro, antes mesmo da maturação fisiológica da cultura, buscando assim evitar danos por congelamento (GREENLAND, 2005). O primeiro corte é feito no mês de dezembro do ano seguinte ao plantio, o segundo corte é feito no mês de novembro do ano seguinte ao primeiro corte e a colheita da segunda do soqueira (terceiro corte) se dá no mês de outubro, no terceiro anos após o plantio (LOFTON, 2012).

Após a colheita, a cana é então processada nas usinas do Estado, conhecidas como biorrefinarias, localizadas próximas às áreas de cana e que operam somente três meses por ano (período de colheita), produzindo açúcar, melaço, água, vapor e eletricidade (KIM; DAY, 2010).

Como mencionado, a Louisiana é um dos poucos estados americanos que produz cana-de-açúcar e essa é considerada uma cultura acumuladora de Si, no entanto, pouco se conhece sobre a disponibilidade e o efeito do uso de Si nos diferentes solos agrícolas do estado (BABU et al., 2013).

Os solos que compõem a maior parte da Louisiana variam significativamente e uma das razões para essa alta variabilidade é o processo de deposição, principalmente a deposição fluvial em áreas próximas ao rio Mississippi. Essa alta variabilidade pode influenciar propriedades físicas e químicas do solo tais como textura, pH e disponibilidade de nutrientes (HODGES, 1997; STANTURF; SCHOENHOLTZ, 1998) e, conseqüentemente, interfere drasticamente nas recomendações de adubação (LOFTON, 2012).

Johnson e Richard (2005) relataram que em áreas de produção de cana, não só as propriedades do solo mostram intenso grau de variabilidade, mas também há variações entre os tipos de solo utilizados para o cultivo da cana, dentre os quais destacam-se quatro principais: “Commerce” e “Cancienne” como solos de textura franco-siltosa, e “Sharkey” e “Schriever” como solos argilosos, ressaltando-se que essas são as texturas de solo mais comuns nos solos dos canaviais da Louisiana.

Esses autores também relatam que as alterações nas características ou no tipo do solo de cultivo da cana-de-açúcar resultam em variações na produção de colmos, que pode ir de 31,0 a 134,0 t ha<sup>-1</sup> e também na produção de açúcar, podendo obter-se de 2,7 a 14,6 t ha<sup>-1</sup> em um mesmo ciclo de produção. Assim, a elevada variabilidade nas

características dos solos gera necessidade de planejamento diversificado no manejo de insumos agrícolas, devendo haver adequações às características particulares dos solos das áreas de produção de cana da Louisiana (JOHNSON; RICHARD, 2005).

Baseado nas diferenças de solo, nos seus efeitos para a produção de cana e de açúcar e na necessidade de manejos variados é que se pensa no uso de Si no programa de adubação da cultura da cana-de-açúcar com expectativa de respostas positivas.

A aplicação de Si nos canaviais da Louisiana, quando feita, segue o recomendado para aplicação de calcário, ou seja, altas doses da fonte aplicadas antes do plantio. No entanto essas duas características podem limitar, por parte dos produtores, a adoção do uso de Si na cultura da cana, em função das grandes quantidades recomendadas e também da necessidade de incorporação, o que aumentaria os custos de produção.

Como alternativas então, surgem a redução da dose de Si recomendada por aplicação e a aplicação em conjunto com outros nutrientes, como por exemplo fósforo e potássio, que, por critérios de recomendação já estabelecidos, são aplicados anualmente, durante os meses de março ou abril. Dessa forma, sem a necessidade de incorporação, com economia na quantidade de operações de aplicação e na aquisição do insumo e com os resultados benéficos do Si na cultura da cana, seu uso passa a ser atrativo para o produtor.

Diante do exposto, comparar a eficiência de Si aplicado anualmente e em pequenas doses, versus a aplicação de altas doses no plantio da cana-de-açúcar, através do teor de Si no solo, pH do solo, produção de colmos e de açúcar, acúmulo de Si e disponibilidade de nutrientes essenciais no solo foi o objetivo da realização desse estudo.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1 Caracterização da fonte de silício

Para o estudo da aplicação de Si em cana-de-açúcar no estado americano da Louisiana, foi utilizada como fonte de Si um silicato de cálcio ( $\text{CaSiO}_3$ ), subproduto da produção de aço, apresentando em sua composição 12 % Si total, 23% de cálcio e 7 % de magnésio. Os demais elementos presentes no fertilizante estão apresentados na Tabela 1A, no ANEXO A.

### 2.2. Delineamento experimental

O experimento foi montado em delineamento experimental de blocos casualizados, com quatro repetições e com os tratamentos baseados na época de aplicação e na dose aplicada, de acordo com a tabela abaixo (Tabela 1).

Tabela 1. Quantidade e época de aplicação de  $\text{CaSiO}_3$  em cada tratamento.

Plantio		Aplicação anual		TOTAL
2012	2013	2014	2015	
----- t ha <sup>-1</sup> -----				
0	0	0	0	0
4,5	0	0	0	4,5
2,2	1,1	1,1	1,1	5,5
1,1	1,1	1,1	1,1	4,4
0	0,6	0,6	0,6	1,8
0	1,1	1,1	1,1	3,3
0	1,7	1,7	1,7	5,1
0	2,2	2,2	2,2	6,7

As parcelas experimentais foram compostas por três linhas de cana com 12 m de comprimento espaçadas 1,8 m entre si, totalizando assim, 65 m<sup>2</sup> de área por parcela. Entre as parcelas foram adotados espaços nas cabeceiras com dois metros sem cana plantada.

### 2.3 Instalação

O ensaio foi instalado na Estação de Pesquisa de Açúcar (Sugar Research Station), a qual está localizada na cidade de Saint Gabriel, Louisiana (EUA) e é parceira do Centro Agrícola da Universidade Estadual da Louisiana (The Louisiana State University Agricultural Center), um dos institutos da Universidade Estadual da Louisiana (Louisiana State University - LSU) (Figura 1).



Figura 1. Imagem de satélite da área de instalação do experimento. Estação de Pesquisa de Açúcar, Saint Gabriel, Louisiana (EUA).

O solo da área é classificado como “Commerce silt loam soil” (USDA, 2013), textura franco-siltosa, com  $40 \text{ mg dm}^{-3}$  de Si (extraído em ácido acético  $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ ). Informações detalhadas sobre as características do solo estão apresentados no ANEXO B (Tabela 1B).

O plantio do canavial foi realizado em setembro de 2012, com a distribuição mecânica dos toletes, variedade LSU 01-299 (informações em anexo – ANEXO C) nos sulcos de plantio. A adubação NPK de plantio e também as adubações anuais foram feitas baseadas nas recomendações atuais do LSU AgCenter.

A aplicação dos tratamentos, realizada na data do plantio, foi feita manualmente, em linha, antes da abertura dos sulcos (Figura 2). Em seguida, a fonte de Si foi incorporada ao solo, para posterior abertura do sulco e plantio dos toletes.



Figura 2. Detalhe da aplicação da fonte de Si em linha, antes da abertura do sulco.

As aplicações anuais foram realizadas nos meses de março e abril de 2013 a 2015, também com aplicação manual, no entanto nesse caso, posicionou-se o fertilizante, aproximadamente, 15 cm de cada lado da linha de cana (Figura 3).



Figura 3. Detalhe da aplicação anual da fonte de Si, aproximadamente 15 cm ao lado da linha de cana.

## 2.4 Condução

O ensaio foi conduzido por três anos avaliando-se assim cana planta (2013), primeira e segunda soqueiras (2014 e 2015, respectivamente). Os tratamentos culturais (adubação, controle de plantas infestantes, etc.) foram realizados de acordo com o programa da estação, sem que interferissem nos tratamentos.

O experimento foi acompanhado periodicamente pela equipe da LSU de modo a mantê-lo sempre em boas condições de condução e avaliação.

## 2.5 Avaliações

Antes de cada colheita, 10 colmos da linha central da parcela, selecionados de forma aleatória, foram cortados manualmente, despilhados, despontados, pesados, triturados e então submetidos à análise de umidade e ART feitas por sistemas de escaneamento (Spectra Can) e infravermelho (Near Infrared) seguindo metodologia descrita por Gravois et al., (2008) e ilustrada pela figura abaixo (Figura 4).



Figura 4A



Figura 4B



Figura 4C

Figura 4. Processamento das amostras de cana para análise tecnológica, com detalhes do equipamento de processamento e análise (4A), do processo de trituração das amostras (4B) e da amostra preparada sendo processada (4C).

O material resultante dessa análise foi sub amostrado e analisado quanto à concentração de Si segundo metodologia descrita por Korndörfer et al. (2001) o que gerou os resultados de concentração de Si no colmo. Tais valores associados aos de massa seca (obtidos a partir da determinação da umidade da massa úmida colhida) resultaram nos valores de Si acumulado no colmo.

A colheita da cana foi realizada em diferentes épocas para cada um dos cortes, sendo o primeiro em dezembro de 2013, o segundo em novembro de 2014 e o terceiro em outubro de 2015. Foi feita mecanicamente e, a cada linha colhida de cada uma das parcelas, obtinha-se o peso dos colmos, informado pela célula de carga acoplada ao transbordo. Utilizando-se o peso dos dez colmos cortados antes da colheita e do peso da parcela colhida determinou-se a produção de colmos por hectare.

Após as colheitas foram coletadas amostras de solo na profundidade de 0 a 15 cm e, para isso a amostragem foi feita na lateral das linhas de cana (faixa de aplicação dos fertilizantes, 15 cm ao lado da linha de plantio) em quatro pontos para cada linha, desprezando-se as laterais externas, totalizando assim 16 pontos de coleta por parcela. As amostras coletadas foram submetidas à análise de Si (ácido acético 0,5 mol L<sup>-1</sup>) segundo metodologia descrita por Korndörfer et al. (2001), pH e os nutrientes P, K, Ca, Mg, S, Na, Zn e Cu (Mehlich-3) segundo metodologia descrita por (MEHLICH, 1984).

## **2.6 Análises estatísticas**

A análise de variância foi realizada utilizando-se o procedimento PROC MIXED no software SAS<sup>®</sup> 9.3 (SAS, 2012) para testar o efeito dos tratamentos sobre todos os parâmetros mensurados.

As diferenças nos parâmetros significativamente afetados pelos tratamentos foram identificadas através da comparação das médias dos quadrados mínimos (LSD) a 0,10 de significância.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Concentração de Si no colmo e Si acumulado no colmo

Nos três anos de avaliação não foram observadas diferenças entre os tratamentos, para a concentração de Si no colmo, a qual apresentou média de 0,6; 0,8 e 0,4% nos colmos da cana planta, primeira e segunda soqueiras, respectivamente (Tabela 2).

Tabela 2. Efeito da dose e da época de aplicação de  $\text{CaSiO}_3$  na concentração de Si no colmo e no Si acumulado no colmo.

Dose de $\text{CaSiO}_3$			Concentração de Si no colmo			Si acumulado no colmo		
Plantio	Anual	Total	2013	2014	2015	2013	2014	2015
----- t ha <sup>-1</sup> -----			----- % -----			----- kg ha <sup>-1</sup> -----		
0	0	0	0,6 a	0,8 a	0,4 a	184 a	204 a	96 a
4,5	0	4,5	0,7 a	0,7 a	0,4 a	200 a	200 a	104 a
2,2	1,1	5,5	0,6 a	0,8 a	0,5 a	180 a	223 a	108 a
1,1	1,1	4,4	0,6 a	0,8 a	0,4 a	196 a	210 a	90 a
0	0,6	1,8	0,6 a	0,8 a	0,4 a	181 a	219 a	101 a
0	1,1	3,3	0,6 a	0,8 a	0,4 a	174 a	223 a	96 a
0	1,7	5,1	0,6 a	0,8 a	0,4 a	185 a	234 a	110 a
0	2,2	6,7	0,6 a	0,7 a	0,4 a	166 a	195 a	101 a

Médias seguidas por letras distintas na coluna diferem entre si pelo teste LSD a 0,10 de significância.

Análise semelhante pode ser feita para os resultados de Si acumulado no colmo, para os quais também não se nota diferença entre a quantidade aplicada e a época de aplicação de Si para a cultura da cana-de-açúcar (Tabela 2). Para essa variável, foram observadas variações de 166 a 200, de 195 a 234 e de 90 a 110 kg ha<sup>-1</sup> de Si no colmos produzidos em 2013, 2014 e 2015, respectivamente (Tabela 2).

A determinação das concentrações de Si em partes da planta, na folha por exemplo, pode, segundo McCray e Mylavarapu (2010), ser um indicador útil do nível de absorção de Si. Segundo esses autores, para o crescimento ótimo da planta de cana-de-açúcar é requerida a concentração foliar de Si mínima de 0,6 % e valores iguais ou superiores à este resultam também em ótima produção de açúcar (McCray et al., 2010). A concentração de Si foliar está também relacionada à produtividade da cultura, o que se comprova, por exemplo, por um levantamento feito por McCray et al. (2010) que mostrou perda de produtividade em 25 % dos solos orgânicos da Flórida cultivados com cana, dos quais 10 % foram devido à concentração de Si foliar insuficiente.

Os resultados apresentados mostram as concentrações de Si no colmo e, espera-se que nessa parte (colmo) os valores sejam menores que aqueles encontrados nas folhas, o que é análogo à afirmação de Oliveira (2004) ao dizer que o conteúdo médio de Si de raízes é menor se comparado com o caule e folhas, e se assemelha à de Korndörfer e Datnoff (1995) que mostram gradiente de 0,14% de Si em folhas jovens para até 6,7% em folhas velhas.

A explicação para esse fato é a de que a distribuição do Si na planta ou em suas partes é determinada pela taxa de transpiração (JONES e HANDRECK, 1967) e uma vez depositado, principalmente nas áreas de máxima transpiração (KORNDÖFER, 2007), o Si não é mais móvel dentro da planta, o que faz com que tecidos mais velhos, folhas no caso, apresentem maior concentração do elemento quando comparado com partes mais novas (colmos) (MA e YAMAJI, 2006).

Assim, as concentrações médias de Si no colmo de 0,6 e 0,8 % nos anos de 2013 e 2014, e até mesmo os 0,4 % encontrados em 2015, estando próximos ou dentro das faixas ótimas de Si foliar citadas por McCray e Mylavarapu (2010), e McCray et al. (2010) indicam nutrição adequada da planta com Si.

Resultados semelhantes à esses, sem reposta para o aumento da concentração de Si no colmo em resposta à aplicação de Si via solo, também foram encontrados por Camargo et al. (2009), porém Anderson et al. (1991) encontraram incrementos no teor de Si na planta em resposta à aplicação de escória como fonte de Si.

Em um trabalho semelhante, McCray e Ji (2013) ao compararem aplicações de diferentes escórias como fonte de Si, em pré-plantio ou anualmente, observaram maior concentração de Si em folhas de cana, em cana planta e cana soca, quando o nutriente foi fornecido antes do plantio da cultura.

No que se refere ao acúmulo de Si no colmo, pode-se entender que os resultados encontrados estão de acordo com Samuels (1969), Ross et al., (1974) e Epstein (1994) que afirmam que a cultura da cana pode acumular quantidades de até 380 kg ha<sup>-1</sup> ou ainda 408 kg ha<sup>-1</sup> de Si, além de Korndörfer et al. (2004) que citam 200 a 250 kg ha<sup>-1</sup> como a extração de Si estimada para a cultura da cana-de-açúcar, porém tais acúmulos consideram toda a parte aérea, isto é, colmos, folhas verdes e secas (ou palha), e por isso, certamente expressam maiores valores do que os obtidos apenas nos colmos.

Essas quantidades de Si acumuladas pela cultura da cana, mesmo este nutriente não sendo considerado essencial, mostram que esse é o elemento mais absorvido e conseqüentemente mais acumulado pela cultura, superando N, K e P, que segundo

Samuels (1969) são acumulados nas quantidades de 180, 140 e 20 kg ha<sup>-1</sup> respectivamente, além do Ca e do Mg (DATNOFF et al., 2001).

Camargo et al. (2013), trabalhando com doses crescentes de Si aplicadas em três tipos de solo, obtiveram resultados parcialmente diferentes, com acúmulo de Si na parte aérea linearmente crescente em resposta ao aumento da dose de Si para cana planta e primeira soqueira, porém na segunda soqueira, assim como no resultado desse trabalho, não se observou efeito das doses de Si sobre a quantidade de Si acumulada na parte aérea.

### 3.2 pH do solo e teor de nutrientes

De maneira geral, o pH do solo para os três anos de estudo foi superior para a aplicação de 1,1 t ha<sup>-1</sup> de CaSiO<sub>3</sub> no plantio da cana e também em aplicações anuais mas, os resultados desse tratamento não diferem dos obtidos no tratamento padrão com toda a aplicação (4,5 t ha<sup>-1</sup>) feita na ocasião do plantio, sendo, ambos, superiores à aplicação anual da menor dose de CaSiO<sub>3</sub> (0,6 t ha<sup>-1</sup>) (Tabela 3).

Os teores de Si no solo por sua vez, mostram comportamento diferente para cada um dos anos de avaliação, porém, sempre com a mesma tendência de melhores resultados (73,8 a 141 mg dm<sup>-3</sup> de Si) onde foi feita aplicação de Si, em comparação à testemunha (Tabela 3) que, em todos os anos, obteve o mais baixo teor de Si no solo (40 mg dm<sup>-3</sup> em 2013, 47,2 mg dm<sup>-3</sup> em 2014 e 60,7 mg dm<sup>-3</sup> em 2015), juntamente com o tratamento onde se aplicou a menor de todas as quantidades testadas, cujos resultados foram 35,2; 51,8 e 77,1 mg dm<sup>-3</sup> de Si, nos anos de 2013, 2014 e 2015, respectivamente (Tabela 3).

Principalmente para o último ano, os tratamentos com aplicações anuais de Si apresentam maiores resultados de Si no solo (Tabela 3), e, certamente, esse fato se deve também ao local de amostragem posicionado sobre a região de aplicação anual do fertilizante, e não sobre o local de aplicação no plantio ou ainda em região intermediária.

Os teores dos demais nutrientes no solo não variaram em função dos tratamentos em nenhum dos anos de avaliação, exceto o de Mg após o segundo corte e os de Ca e Zn após o último corte (Tabela 3). Para o Mg, a interpretação pode ser feita da mesma maneira como se fez pra o Si, ou seja, no ano de 2014, a testemunha apresentou o menor teor (291 mg dm<sup>-3</sup>), o qual não difere do tratamento com a aplicação anual de 0,6 t ha<sup>-1</sup> de CaSiO<sub>3</sub>, porém é inferior aos demais (Tabela 3).

No último ano (2015) os teores de Ca e de Zn no solo, quando aplicadas 2,2 t ha<sup>-1</sup> de CaSiO<sub>3</sub>, foram superiores aos da testemunha e do tratamento padrão com incrementos que atingem até 484 mg dm<sup>-3</sup> de Ca e 1,4 mg dm<sup>-3</sup> de Zn (Tabela 3).

Tabela 3. Efeito da dose e da época de aplicação de CaSiO<sub>3</sub> na disponibilidade de nutrientes e no pH do solo após primeiro, segundo e terceiro corte.

----- Primeiro corte, 2013 -----																						
Dose de CaSiO <sub>3</sub>			pH	Si <sup>(1)</sup>	P	K	Ca	Mg	S	Na	Zn	Cu										
Plantio	Anual	Total											----- t ha <sup>-1</sup> -----						----- mg dm <sup>-3</sup> -----			
0	0	0	5,9	ab	40,0	c	21,2	a	94,1	a	1621	a	365	a	6,3	a	16,2	a	1,2	ab	2,2	a
4,5	0	4,5	6,4	a	67,0	ab	22,6	a	86,7	a	1812	a	402	a	6,8	a	17,6	a	1,4	ab	2,4	a
2,2	1,1	3,3	6,0	ab	61,3	ab	22,7	a	94,2	a	1865	a	389	a	8,5	a	17,5	a	1,5	a	2,4	a
1,1	1,1	2,2	6,3	a	60,0	b	23,0	a	96,7	a	1899	a	394	a	7,4	a	16,2	a	1,4	ab	2,3	a
0	0,6	0,6	5,5	b	35,2	c	26,2	a	101	a	1686	a	365	a	7,4	a	17,1	a	1,1	b	2,3	a
0	1,1	1,1	6,2	ab	71,0	ab	20,1	a	97,8	a	1955	a	422	a	7,3	a	16,8	a	1,4	ab	2,4	a
0	1,7	1,7	5,9	ab	73,8	a	23,3	a	98,4	a	1814	a	384	a	8,0	a	16,3	a	1,3	ab	2,2	a
0	2,2	2,2	5,9	ab	71,0	ab	26,6	a	100	a	1750	a	368	a	8,0	a	15,6	a	1,3	ab	2,2	a
----- Segundo corte, 2014 -----																						
0	0	0	5,8	bc	47,2	f	25,3	a	84,9	a	1481	a	291	c	10,5	a	10,9	a	1,2	a	2,0	a
4,5	0	4,5	6,5	ab	85,6	bcd	23,8	a	91,6	a	1706	a	329	ab	10,0	a	12,8	a	1,2	a	2,1	a
2,2	1,1	4,4	6,4	abc	91,2	abc	26,7	a	89,3	a	1883	a	359	ab	10,8	a	12,6	a	1,9	a	2,2	a
1,1	1,1	3,3	6,8	a	101	a	25,5	a	86,9	a	1781	a	339	a	10,8	a	11,4	a	1,4	a	2,0	a
0	0,6	1,2	5,7	c	51,8	f	33,4	a	90,9	a	1696	a	315	bc	10,3	a	11,8	a	1,0	a	2,1	a
0	1,1	2,2	6,3	abc	83,1	d	24,8	a	88,3	a	1715	a	326	ab	13,1	a	11,8	a	1,6	a	2,0	a
0	1,7	3,4	6,5	ab	70,3	e	28,5	a	88,2	a	1734	a	343	ab	10,8	a	11,8	a	1,5	a	2,0	a
0	2,2	4,5	6,4	abc	79,4	de	31,5	a	84,2	a	1740	a	336	ab	11,2	a	10,4	a	1,5	a	2,0	a

continua...

----- Terceiro corte, 2015 -----																						
Dose de CaSiO <sub>3</sub>			pH	Si <sup>(1)</sup>		P	K		Ca	Mg		S	Na		Zn	Cu						
Plantio	Anual	Total		t ha <sup>-1</sup>			mg dm <sup>-3</sup>															
0	0	0	5,8	bc	60,7	h	23,8	a	118	a	1580	c	319	a	5,0	a	16,2	a	2,1	b	2,1	a
4,5	0	4,5	6,4	ab	84,3	fg	21,8	a	114	a	1730	bc	338	a	4,6	a	16,1	a	2,0	b	2,1	a
2,2	1,1	5,5	6,4	ab	107	de	24,7	a	116	a	1884	ab	350	a	5,4	a	19,2	a	2,4	b	2,2	a
1,1	1,1	4,4	6,6	a	114	bcde	23,6	a	117	a	1844	b	349	a	5,7	a	16,8	a	2,1	b	2,0	a
0	0,6	1,8	5,7	c	77,1	g	28,9	a	124	a	1713	bc	331	a	5,4	a	16,6	a	1,9	b	2,2	a
0	1,1	3,3	6,2	abc	101	e	20,5	a	115	a	1706	bc	337	a	5,1	a	17,3	a	2,1	b	2,0	a
0	1,7	5,1	6,2	abc	110	cde	25,1	a	111	a	1740	bc	333	a	5,6	a	16,7	a	2,2	b	2,0	a
0	2,2	6,7	6,6	a	141	a	29,7	a	121	a	2064	a	389	a	7,0	a	18,9	a	3,3	a	2,2	a

Médias seguidas por letras distintas na coluna, em cada corte (ano), diferem entre si pelo teste LSD a 0,10 de significância.

<sup>(1)</sup>Extraído em Ácido Acético 0,5 mol L<sup>-1</sup>

Aumentos no pH do solo em resposta ao uso de elevadas doses de fontes de Si, como os obtidos nesse trabalho, são esperados pois materiais provenientes de resíduos industriais ou biomassa vegetal e que contêm Si, geralmente são aplicados em doses elevadas, e o fato da maioria desses materiais apresentarem também efeito corretivo de acidez, faz com que os valores de pH dos solos que recebem essas aplicações, em geral, aumentam substancialmente (TUBAÑA et al., 2012; HAYNES et al., 2013).

O solo da área de instalação do experimento, em um estudo conduzido por Babu et al. (2014) juntamente com outros quatro tipos de solo, foi o que apresentou maior aumento de pH em resposta à aplicação de Si proveniente do mesmo silicato de cálcio utilizado no presente estudo.

McCray e Ji (2013) ao testarem a aplicação de dois silicatos de cálcio em um solo mineral e outro orgânico não obtiveram efeito dos tratamentos sobre o pH do solo mineral, o qual sem qualquer aplicação já estava próximo da neutralidade, mas o fez no solo orgânico onde o pH saiu de 4,9 para 5,1 em resposta à aplicação de 6,72 t ha<sup>-1</sup>.

O teor de Si no solo, para solos da Louisiana, pode ser classificado como “BAIXO” (12 a 50 mg kg<sup>-1</sup>), “MÉDIO” (51 a 100 mg kg<sup>-1</sup>) ou “ALTO” (101 a 240 mg kg<sup>-1</sup>) de acordo com diversos autores (SNYDER, 2001; KORNDÖRFER et al., 2001; NARAYANASWAMY; PRAKASH, 2009; LIANG et al., 1994; XU et al.; 2001).

Seguindo essa classificação, no primeiro ano de estudo a aplicação de Si em qualquer um dos tratamentos elevou sua disponibilidade no solo de “BAIXA”, resultado da testemunha, para “MÉDIA”, exceto para a menor dose (0,6 t ha<sup>-1</sup>) aplicada anualmente (Tabela 3).

Para o teor de Si no solo analisado após o segundo corte da cana pode-se fazer interpretação semelhante, no entanto, para esse ano a ressalva que se faz é que a aplicação de 1,1 t ha<sup>-1</sup> de CaSiO<sub>3</sub> no plantio e anualmente alterou a classificação em dois níveis, atingindo a categoria “ALTO” (Tabela 3).

No último ano (2015) os tratamentos com aplicações anuais de Si, exceto na menor dose (0,6 t ha<sup>-1</sup>), atinge a classificação de “ALTA” disponibilidade do elemento no solo, superando assim o tratamento padrão e a testemunha, cujos teores são classificados como “MÉDIO” (Tabela 3).

Em relação à variação dos resultados, o intervalo de 35,2 e 141,0 mg dm<sup>-3</sup> está compreendido naquele encontrado por Babu et al. (2013) em seu trabalho de classificação dos níveis de Si no solo no Estado da Louisiana, intervalo esse que abrange teores de Si no solo de 3 a 300 mg dm<sup>-3</sup>, com maioria dos resultados inferiores a 10 mg dm<sup>-3</sup>.

A predominância de baixos teores de Si no solo se deve à erosões severas e transportes de sedimentos que ocorrem frequentemente na região devido às intensas precipitações e à textura grosseira do solo, e também ao sistema de cultivo contínuo de espécies acumuladoras de Si, como arroz e cana-de-açúcar, que retiram do solo quantidades consideráveis de Si, porém cria potencial de resposta à adubação silicatada (BABU et al., 2013), o que corrobora com os resultados obtidos nesse trabalho que mostram aumentos no teores de Si no solo em função da sua aplicação em diferentes doses e épocas.

Outra razão que certamente explica os aumentos nos teores de Si no solo em resposta à aplicação dos tratamentos é o teor inicial de Si da área de instalação do experimento ( $40 \text{ mg dm}^{-3}$ ) ser inferior ao nível crítico de Si no solo para o Estado da Louisiana que, segundo proposta de Babu (2015), equivale à  $50 \text{ mg dm}^{-3}$ .

Considerando esse valor, observa-se que o tratamento testemunha permaneceu com teor de Si no solo abaixo do nível crítico nos dois primeiros anos de avaliação e que a aplicação de Si, em qualquer uma das doses ou épocas estudadas, alterou a classificação do Si no solo para valores superiores ao crítico (Tabela 3). No terceiro ano (2015), mesmo o solo que não recebeu Si estando com teor superior ao nível crítico, a aplicação dos tratamentos também resultou em incrementos na disponibilidade do elemento no solo (Tabela 3).

A comparação entre uma única aplicação antes do plantio da cana e aplicações anuais de Si também foi feita por McCray e Ji (2013) que encontraram, em cana planta, maior disponibilidade de Si no solo em resposta ao uso do elemento em pré plantio, porém em cana soca não mais se observou diferença significativa.

Quanto aos demais nutrientes, esses últimos autores citados, também não encontraram diferença nos teores de Mg no solo. As poucas respostas na disponibilidade dos demais nutrientes no solo podem ser explicadas por Babu et al. (2013) ao afirmar que os solos da Louisiana são, em grande parte, solos aluviais, o que no geral lhes confere a característica de serem solos naturalmente férteis, ou seja, com boa disponibilidade de nutrientes, o que reduz a possibilidade de resposta em estudos relacionados à fertilidade do solo.

### 3.3 Produção de colmos e de açúcar

No primeiro corte da cana, os valores de TCH variaram de 98 a 116 t ha<sup>-1</sup>, embora sem diferença estatística entre os tratamentos (Figura 5) sendo o tratamento com a aplicação no plantio e anual de 1,1 t ha<sup>-1</sup> de CaSiO<sub>3</sub> foi o mais produtivo (Figura 5).

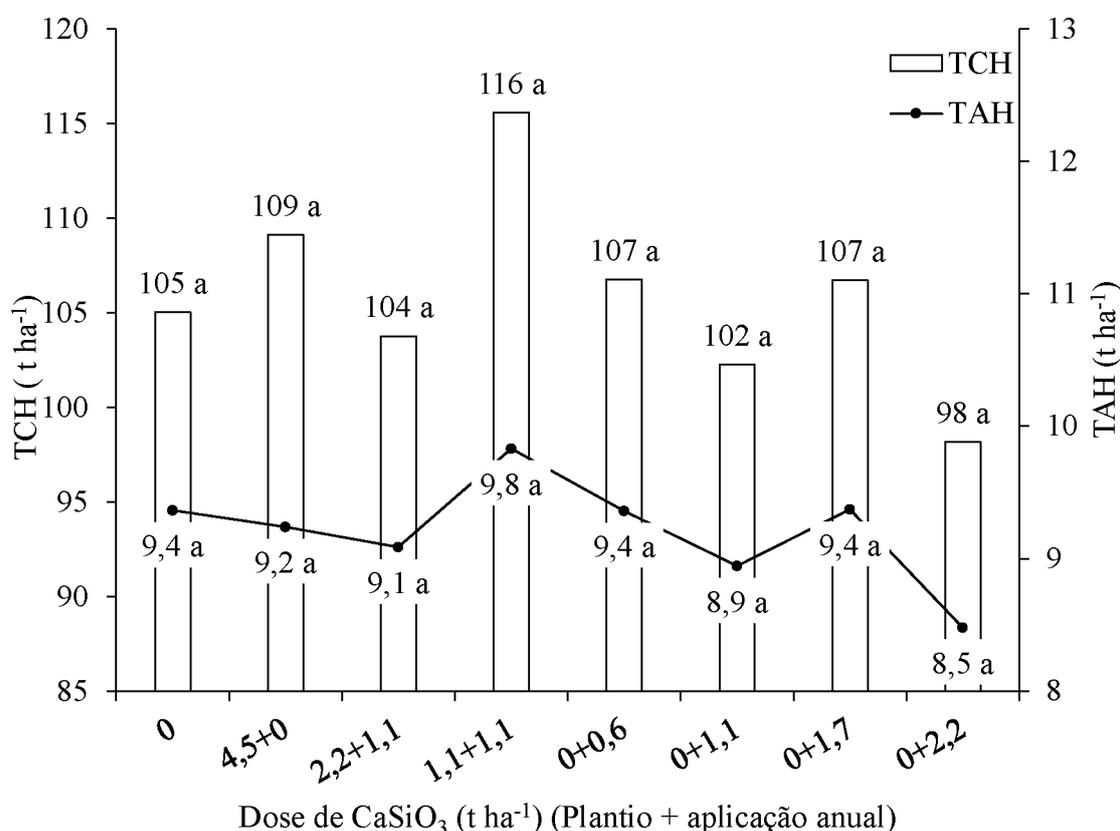


Figura 5. Efeito da dose e da época de aplicação de CaSiO<sub>3</sub> na produção de colmos (TCH) e de açúcar (TAH) (Primeiro corte, 2013) (Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste LSD a 0,10 de significância).

A não diferença entre os tratamentos também foi observada para a produção de açúcar nesse primeiro corte (Figura 5), mas nesse caso, a amplitude de variação dos resultados é menor, atingido o máximo de 9,8 t ha<sup>-1</sup> e o mínimo de 8,5 t ha<sup>-1</sup> (Figura 5).

No segundo corte, a aplicação anual do silicato de cálcio na forma de escória nas doses de 1,1 ou 1,7 t ha<sup>-1</sup> resultou em valores de TCH de 103 t ha<sup>-1</sup> (Figura 6) valores esse que, embora sem diferença estatística, superam os resultados de todos os demais tratamentos com incrementos de até 9 t ha<sup>-1</sup> de colmos (Figura 6).

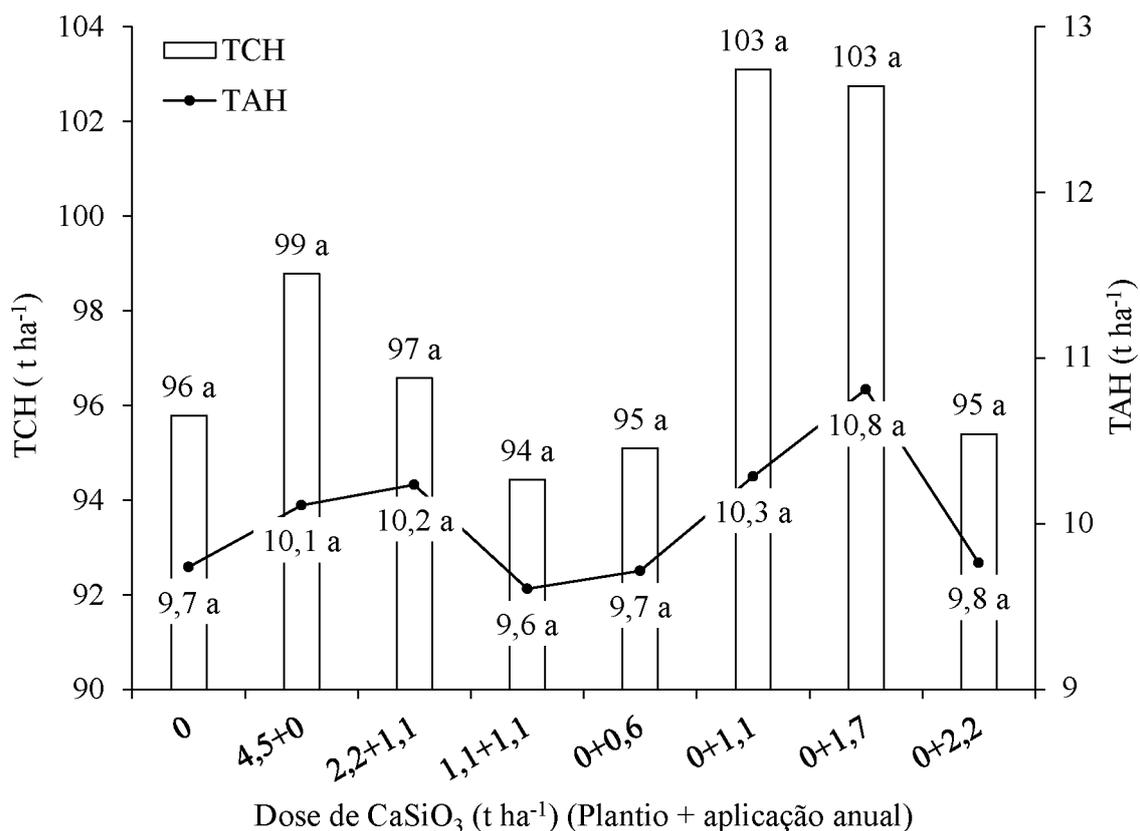


Figura 6. Efeito da dose e da época de aplicação de CaSiO<sub>3</sub> na produção de colmos (TCH) e de açúcar (TAH) (Segundo corte, 2014) (Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste LSD a 0,10 de significância).

Novamente os tratamentos não interferiram na produção de açúcar, embora exista por exemplo, variação superior à 1,0 t ha<sup>-1</sup> entre os tratamentos com a dose de 1,7 t ha<sup>-1</sup> de CaSiO<sub>3</sub> aplicada anualmente, cujo valor de TAH é de 10,8 t ha<sup>-1</sup>, e a testemunha, o tratamento com a aplicação anual de 0,6 t ha<sup>-1</sup> ou a aplicação de 1,1 t ha<sup>-1</sup> em ambas as épocas, cujos resultados são 9,7 t ha<sup>-1</sup> de açúcar (Figura 6).

A aplicação anual do silicato de cálcio na dose de 1,7 t ha<sup>-1</sup> também se destaca pelo seu resultado de TCH no terceiro corte (92 t ha<sup>-1</sup>) (Figura 7), o maior obtido, apesar de não diferir estatisticamente dos demais, mesmo sendo até 9 t ha<sup>-1</sup> superior (Figura 7).

Nesse último corte, assim como nos demais, não foram detectadas diferenças entre os valores de TAH, a qual variou entre 8,7 e 9,5 t ha<sup>-1</sup> de açúcar (Figura 7).

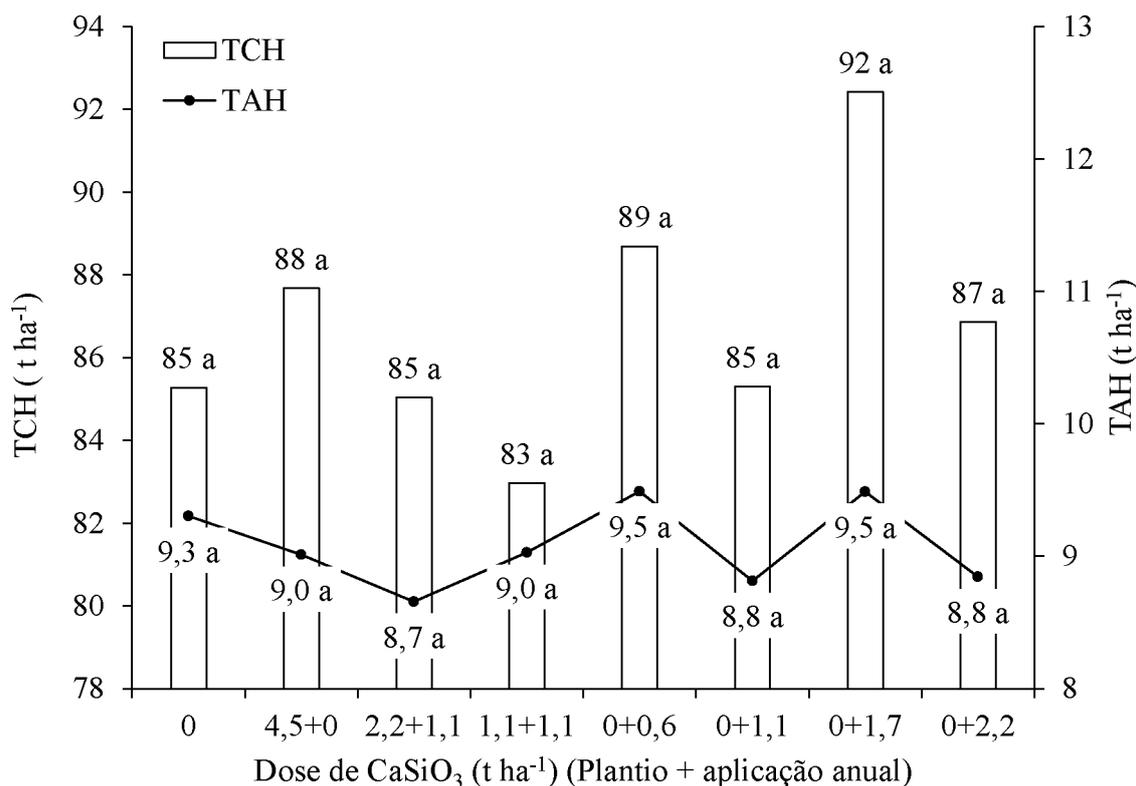


Figura 7. Efeito da dose e da época de aplicação de CaSiO<sub>3</sub> na produção de colmos (TCH) e de açúcar (TAH) (Terceiro corte, 2015) (Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste LSD a 0,10 de significância).

Os valores de TCH encontrados no trabalho variaram, nos três anos de avaliação, de 116 a 83 t ha<sup>-1</sup>, intervalo esse que se assemelha àquele usado como média de produtividade de cana no Estado da Louisiana, e que vai de 88 a 100 t ha<sup>-1</sup>. Especificamente para o ano de 2015, a variação de 83 a 92 t ha<sup>-1</sup> de colmos, com consequente média de 87,5 t ha<sup>-1</sup>, também está próxima à média geral de produtividade do Estado que foi de 83,1 t ha<sup>-1</sup> (USDA, 2016).

Considerando os valores médios pagos pela tonelada de açúcar e de cana na Louisiana nos últimos anos, os quais estão em torno de US\$ 500,00 e US\$ 573,00, respectivamente, e que a aplicação de Si, em áreas próximas aos locais de produção do fertilizante, custa, aproximadamente, US\$ 30,00 por tonelada de insumo aplicada, a produção necessária para cobrir o custo de aplicação dos tratamentos utilizados nesse experimento seria de 0,1 a 0,7 t ha<sup>-1</sup> de açúcar ou 0,1 a 0,6 t ha<sup>-1</sup> de cana. Como observado nos três anos de estudo, apesar de não haver diferença estatística, a aplicação de Si pode

incrementar em até 11 t ha<sup>-1</sup> a produção de cana e em até 1,1 t ha<sup>-1</sup> a produção de açúcar, o que seria suficiente para trazer retorno financeiro.

Resultados positivos da aplicação de silicato de cálcio sobre TCH e TAH em áreas da Flórida cultivadas por três anos são relatados por vários autores (GASCHO e ANDREIS 1974; ANDERSON et al., 1987; MARTINS, 1991; ANDERSON et al., 1991; McCRAY et al., 2011) com algumas comprovações de que os efeitos se devem ao fornecimento de Si mais do que ao efeito de aumento de pH ou de fornecimento de Ca.

O trabalho de McCray e Ji (2013) mostrou que a aplicação anual de doses moderadas de Si foi inferior àquela feita com maior dose e antes do plantio da cana, isto é, resultou em menor valor de TCH da cana planta e da primeira soqueira, e menor valor de TAH em cana planta. No entanto o autor afirma que o uso de menores doses em aplicações anuais pode ser uma alternativa, desde que as doses não sejam tão baixas.

Os incrementos em TCH citados para cana planta, primeira e segunda soqueiras, apesar de não significativos, são semelhantes aos obtidos por McCray e Ji (2011) que obtiveram resposta da cultura da cana-de-açúcar à aplicação de silicato de cálcio com incrementos de produtividade de até 20 t ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> enquanto que a não aplicação resultou em 23% de perda de produtividade.

Nesse aspecto, Anderson et al. (1991) mostram que a aplicação de Si em cana apresenta efeito sobre a longevidade do canavial, visto que em seu trabalho em soqueiras que não tinham sido adubadas com Si sofreram redução de 45 % em TCH e 50 % em TAH ao passo que, quando houve aplicação de Si, esses resultados caíram pra 28 e 29 % respectivamente.

Tais resultados diferem em parte dos obtidos nesse estudo onde observa-se que a aplicação de 2,2 t ha<sup>-1</sup> no plantio mais 1,1 t ha<sup>-1</sup> anualmente ocasionou as maiores reduções de produtividade em três anos de ciclo, superiores às do tratamento sem aplicação de Si e daquele com todo o Si aplicado no plantio, sendo de 33 t ha<sup>-1</sup> a queda em TCH e 0,2 t ha<sup>-1</sup> a redução em TAH, única redução observada para esse parâmetro entre os tratamentos.

### **3.4 ATR (Açúcar teoricamente recuperável)**

A aplicação de CaSiO<sub>3</sub> em diferentes épocas e doses não influenciou o ATR em nenhum dos cortes da cana (Tabela 4), valores esses que variaram de 76,9 a 81,0, de 90,5

a 96,1 e de 92,3 a 98,7 kg de açúcar TC<sup>-1</sup> em 2013, 2014 e 2015 respectivamente (Tabela 4).

Allorerung (1989) em solos ácidos da Indonésia, com aplicação de duas escórias nas doses de 1 e 3 t ha<sup>-1</sup>, mesmo obtendo aumento do rendimento de colmos e de açúcar, também não observou efeito sobre a percentagem de açúcar no colmo.

Tabela 4. Efeito da dose e da época de aplicação de CaSiO<sub>3</sub> no ATR da cana.

Plantio	Dose de CaSiO <sub>3</sub>		ATR		
	Anual	Total	2013	2014	2015
----- t ha <sup>-1</sup> -----			----- kg TC <sup>-1</sup> -----		
0	0	0	81,0 a	92,1 a	98,7 a
4,5	0	4,5	76,9 a	92,8 a	93,4 a
2,25	1,1	5,55	79,5 a	96,1 a	92,5 a
1,1	1,1	4,4	77,4 a	92,3 a	98,7 a
0	0,6	1,8	79,6 a	92,8 a	97,0 a
0	1,1	3,3	79,3 a	90,5 a	93,7 a
0	1,7	5,1	79,6 a	95,4 a	93,1 a
0	2,25	6,75	78,3 a	92,6 a	92,3 a

Médias seguidas por letras distintas na coluna diferem entre si pelo teste LSD a 0,10 de significância.

### 3.5 Resultados acumulados

O acúmulo de Si no colmo foi numericamente superior para o tratamento com a aplicação anual de silicato de cálcio na dose de 1,7 t ha<sup>-1</sup>, o qual atingiu 530 kg ha<sup>-1</sup> de Si, o que representa 47 kg ha<sup>-1</sup> de Si a mais que a quantidade acumulada nos colmos das plantas testemunhas (Tabela 5).

O acúmulo de Si se mostrou diretamente correlacionado com os resultados de produção acumulada de colmos, ou seja, o tratamento de maior quantidade de Si acumulado correspondeu também ao maior valor de TCH que equivale à 302 t ha<sup>-1</sup> (Tabela 5) e representa um incremento numérico que chega a 16 t ha<sup>-1</sup> de colmos a mais em três anos de cultivo da cultura da cana-de-açúcar.

Os valores de TAH acumulada apresentaram variação de 27,1 a 29,7 t ha<sup>-1</sup> (Tabela 5) e, apesar de não haver diferença estatística entre os tratamentos, observa-se que a aplicação de Si resulta em produção de açúcar numericamente superior à testemunha com incremento de até 1,3 t ha<sup>-1</sup> em três anos (Tabela 5).

Tabela 5. Efeito da dose e da época de aplicação de  $\text{CaSiO}_3$  no Si absorvido pela planta, na produção acumulada de colmos (TCH) e de açúcar (TAH) (Soma de três cortes).

Plantio	Dose de $\text{CaSiO}_3$		Si acumulado no colmo	TCH	TAH
	Anual	Total			
----- t ha <sup>-1</sup> -----			--- kg ha <sup>-1</sup> ---	----- t ha <sup>-1</sup> -----	
0	0	0	483 a	286 a	28,4 a
4,5	0	4,5	505 a	296 a	28,4 a
2,25	1,1	5,55	512 a	285 a	28,0 a
1,1	1,1	4,4	496 a	293 a	28,5 a
0	0,6	1,8	502 a	291 a	28,6 a
0	1,1	3,3	493 a	291 a	28,0 a
0	1,7	5,1	530 a	302 a	29,7 a
0	2,25	6,75	463 a	280 a	27,1 a

Médias seguidas por letras distintas na coluna diferem entre si pelo teste LSD a 0,10 de significância.

Resultados mais expressivos que os descritos foram obtidos por Anderson et al. (1991) que aplicando 20 t ha<sup>-1</sup> de escória como fonte de Si obteve 39 % de aumento na produção acumulada de colmos e 50 % na produção acumulada de açúcar em três anos de ciclo.

#### **4 CONCLUSÕES**

Baseado nas respostas de produção de colmos e de açúcar, nas alterações do pH e na disponibilidade dos nutrientes no solo, incluindo Si, a aplicação anual de  $\text{CaSiO}_3$  em pequenas doses, mostrou potencial como sendo uma boa prática para a adubação com Si na cultura da cana-de-açúcar cultivada no Estado da Louisiana.

## REFERÊNCIAS

- ALLORERUNG, D. **Influence of steel slag application to red/yellow podzolic soils on soil chemical characteristics, nutrient content and uptake, and yield of sugarcane plantations (*Saccharum officinarum* L.)**. Bogor, Indonésia: Faculty of Agriculture/IPB, 1989. p. 14-42. (Bulletin -Pusat-Penelitian-Perkebunan-Gula-Indonesia. No. 136).
- ANDERSON, D. L.; SNYDER, G. H.; MARTIN, F. G. Multi-year response of sugarcane to calcium silicate slag on everglades Histosols. **Agronomy Journal**, Madison, v. 83, p. 870-874, 1991.
- ANDERSON, D. L.; JONES, D. B.; SNYDER, G. H. Response of a rice sugarcane rotation to calcium silicate slag on Everglades Histosols. **Agronomy Journal**, Madison, v.79, p. 531-535, 1987.
- BABU, T. **Calibration And Categorization Of Plant Available Silicon in Louisiana Soils**. 2015. 170 f. Dissetation (PhD in The School of Plant, Environmental, and Soil Sciences) - Louisiana State University, Baton Rouge, 2015.
- BABU, T.; DATNOFF, L.; YZENAS, J.; TUBANA, B. **Silicon Status of Louisiana Soils Grown to Different Field Crops**. In: INTERNATIONAL ANNUAL MEETING AMERICAN SOCIETY OF AGRONOMY/ CROP SCIENCE SOCIETY OF AMERICA/ SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA, Tampa, 2013. Disponível em: <[http://www.researchgate.net/publication/268116031\\_Silicon\\_Status\\_of\\_Louisiana\\_Soils\\_Grown\\_to\\_Different\\_Field\\_Crops](http://www.researchgate.net/publication/268116031_Silicon_Status_of_Louisiana_Soils_Grown_to_Different_Field_Crops)>. Acesso em: 24 ago. 2015.
- BABU, T.; TUBANA, B.; DATNOFF, L. YZENAS, J.; MAITI, K. **Release Pattern of Monosilicic Acid from Different Sources of Silicon in Louisiana Soils**. In: INTERNATIONAL ANNUAL MEETING AMERICAN SOCIETY OF AGRONOMY/ CROP SCIENCE SOCIETY OF AMERICA/ SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA, 2014. Disponível em: <<https://scisoc.confex.com/crops/2014am/webprogram/Paper86293.html>>. Acesso em: 30 ago. 2015.
- CAMARGO, M. S.; ROCHA, G.; KORNDÖRFER, G. H. silicate fertilization of Tropical soils: silicon availability and recovery index of sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, p. 1267-1275, 2013.
- CAMARGO, M. S.; WYLER, P.; KORNDÖRFER, G. H. 2009. Silicon absorption by sugarcane: effect of soils type and silicate fertilization. **Proceedings of International Plant Nutrition Colloquium**. Disponível em: <<http://escholarship.org/uc/item/8kh8h1vj>>. Acesso em: 8 jan. 2017.
- DATNOFF, L. E., SNYDER, G. H., KORNDÖRFER, G. H. **Silicon in Agriculture**. Amsterdam: Elsevier, 2001. 403 p.
- ELLIOTT, C. L., SNYDER, G. H. Autoclave-Induced Digestion for the Colorimetric Determination of Silicon in Rice Straw. **Journal of Agriculture and Food Chemistry**, Davis, v. 39, p. 1118-1119, 1991.

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

**Commerce series**. 2013. Disponível em: <[https://soilseries.sc.egov.usda.gov/OSD\\_Docs/C/COMMERCE.html](https://soilseries.sc.egov.usda.gov/OSD_Docs/C/COMMERCE.html)>. Acesso em: 17 ago. 2015.

GASCHO, G. J.; ANDREIS, H. J. Sugarcane Response to Calcium Silicate Slag Applied to Organic and Sand Soils. In: INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGARCANE TECHNOLOGISTS, **Proceedings...** v. 15, p. 543-551, 1974.

GRAVOIS, K. **Sugarcane Production Handbook 2014**. Baton Rouge. LSU AgCenter, Research and Extension. 2013. 84 p.

GRAVOIS, K.; BISCHOFF, K.; HAWKINS, G.; PONTIF, M.; MARTSON, D.; PRESCOTT, B. NIR Technology for Sugarcane Quality Analyses at the LSU AgCenter's Sugarcane Sucrose Laboratory. **Journal of the American Society of Sugar Cane Technologists**, [S. l.], v. 28, p. 55-56, 2008.

GREENLAND, D. Climate Variability and Sugarcane Yield in Louisiana. **Journal of Applied Meteorology**, Boston, v. 44, p. 1655-1666, 2005.

HAWTHORN, C. 2010. **Agricultural statistics**. USDA-NASS. Disponível em <[http://www.nass.usda.gov/Statistics\\_by\\_Subject/index.php?sector=CROPS](http://www.nass.usda.gov/Statistics_by_Subject/index.php?sector=CROPS)>. Acesso em: 20 Ago. 2015.

HAYNES, R. J.; BELYAEVA, O. N.; KINGSTON, G. Evaluation of industrial wastes as sources of fertilizer silicon using chemical extractions and plant uptake. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, S. l., v.176, p. 238–248, 2013.

HODGES, J. D. Development and evolution of bottomland hardwood sites. **Forest Ecology and Management**, Fort Collins, v. 90, p. 117-125. 1997.

JOHNSON, R. M.; RICHARD Jr., E.P. Sugarcane yield, sugarcane quality, and soil variability in Louisiana. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, p. 760-771. 2005.

JONES, L. H. P.; HANDRECK, K. A. Silica in soils, plants, and animals. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 19, p. 107-149, 1967.

KIM, M.; DAY, D. F. Composition of sugar cane, energy cane, and sweet sorghum suitable for ethanol production at Louisiana sugar mills. **Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology**, Fairfax, v. 38, p. 803–807, 2011

KORNDÖRFER, G. H. Uso do silício na agricultura. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 117, p. 9-11, 2007.

KORNDÖRFER, G. H., SNYDER, G. H. ULLOA, M., POWELL., DATNOFF, L. E. Calibration of soil and plant silicon analysis for rice production. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 24, p. 1071-1084. 2001.

KORNDORFER, G. H.; SNYDER, G. H.; ULLOA, M.; POWELL, G.; DATNOFF, L. E. Calibration of soil and plant Silicon analysis for rice production. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 24, p. 1071–108, 2001.

KORNDÖRFER, G. H.; DATNOFF, L. E. **Adubação com silício: uma alternativa no controle de doenças da cana de açúcar e do arroz**. Informações Agronômicas. Piracicaba. n. 70, p. 1-5, 1995.

LEGENDRE, B.L. **Sugarcane production handbook**. Pub. 2859. Louisiana State University AgCenter, Baton Rouge, LA. 2001.

LEGENDRE, B. L.; SANDERS, F.S.; GRAVIOS, K.A. 2000. **Sugarcane production best management practices**. Pub. 2833. Louisiana State University AgCenter, Baton Rouge, LA.

LIANG, Y. C.; MA, T. S.; LI, F. J.; FENG, Y. J. Silicon availability and response of rice and wheat to Si in calcareous soils. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Athens, v. 25, p. 2285–2297, 1994.

LOFTON, J. **Improving Nitrogen Management in Sugarcane Production of the Mid-South Using Remote Sensing Technology**. 2012. 124 f. Dissertation (PhD in The School of Plant, Environmental, & Soil Sciences). Louisiana State University. Baton Rouge. 2012.

LOFTON, J.; TUBANA, B. S., KANKE, Y.; TEBOH J., VIATOR, H. DALEN, M. Estimating Sugarcane Yield Potential Using an In-Season Determination of Normalized Difference Vegetative Index. **Sensors**, Basel, v. 12, p. 7529-7547. 2012.

MA, J.F.; YAMAJI, N. Silicon uptake and accumulation in higher plants. **Trends in Plant Science**, Oxford, v. 11, p. 392–397, 2006.

MARTINS, M. **Efeito da calagem na cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum spp*) em solo sob vegetação de cerrado**. 1991, 85 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba. 1991.

McCRAE, J. M.; JI, S. Comparison of Silicon Sources for Sugarcane on Mineral and Organic Soils in Florida. **Journal American Society of Sugar Cane Technologists**, S. 1., v. 33, 2013.

McCRAE, J.M.; RICE, R. W.; BAUCUM, L. E. **Calcium Silicate Recommendations for Sugarcane on Florida Organic Soils**. University of Florida, Gainesville, FL. Florida Cooperative Extension Service Fact Sheet SS-AGR-350. UF/IFAS Electronic Data Information Source (EDIS) Database. 2011. Disponível em: <<http://edis.ifas.ufl.edu/pdf/files/SC/SC09200.pdf>>. Acesso em: 12 nov. 2016.

McCRA Y, J.M.; MYLAVARAPU, R. **Sugarcane nutrient management using leaf analysis**. Florida Cooperative Extension Service Fact Sheet SS-AGR-335. UF/IFAS Electronic Data Information Source (EDIS) Database. University of Florida, Gainesville, FL. 2010. Disponível em: <<http://edis.ifas.ufl.edu/pdf/files/AG/AG34500.pdf>>. Acesso em: 26 jan. 2017.

McCRA Y, J. M.; JI, S.; POWELL, G.; MONTES, G.; PERDOMO, R.; LUO, Y. Boundary lines used to determine sugarcane production limits at leaf nutrient concentrations less than optimum. **Communications in soil science and plant analysis**, Athens, v. 41, p. 606–622, 2010.

MEHLICH, A. Mehlich-3 soil test extractant: a modification of Mehlich-2 extractant. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Athens, v. 15, p. 1409-1416. 1984.

NARAYANASWAMY, C.; PRAKASH, N. B. Calibration and categorization of plant available silicon in rice soils of south India. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 32, p. 1237-1254, 2009.

OLIVEIRA, L. A.; CASTRO, N. M. Ocorrência de Sílica nas Folhas de *Curatella americana* L. e de *Davilla elliptica* St. Hil. **Revista Horizonte Científico**, S. l., v.4, p.1-16, 2002.

ROSS, L.; NABABSING, P. CHEONG, Y. W. Y. Residual effect calcium silicate applied to sugarcane soils. In: **Proceedings of International Society of Sugar Cane Technologists**, v.2, p. 539 – 542, 1974.

SNYDER, G. H. Methods for silicon analysis in plants, soils and fertilizers. In: DATNOFF, L. E.; SNYDER, G. H.; KORNDÖRFER, G. H. (Ed.). **Silicon in agriculture: Silicon deposition in higher plants**. The Netherlands: Elsevier Science. 2001. p. 185-196.

TUBAÑA, B.; NARAYANASWAMY, C.; DATNOFF, L. E.; et al. Changes in pH and extractable nutrients of selected soils from the Midwest and South USA as influenced by different rates of iron calcium silicate slag. **ASA-CSSA-SSSA International Annual Meetings**, Cincinnati, p. 21–24, Oct. 2012.

USDA (United States Department of Agriculture), NASS (National Agricultural Statistics Service), Agricultural Statistics Board. **Crop production**. 2016. Disponível em: <<http://www.usda.gov/nass/PUBS/TODAYRPT/crop0216.pdf>>. Acesso em: 16 maio 2016.

Soil Survey Staff, Natural Resources Conservation Service, United States Department of Agriculture. **Soil Series Classification Database**. Disponível em: <[http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/class/?cid=nrcs142p2\\_053583](http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/soils/survey/class/?cid=nrcs142p2_053583)>. Acesso em 17 Ago. 2015.

SAMUELS, G. Silicon and Sugar. **Sugar y Azucar**, Engliword, v. 65, p. 25 – 29. 1969.

SAS. **The SAS system for Windows**. Version 9.3. Cary: SAS Institute. 2012.

STANTURF, J.A.; SCHOENHOLTZ, S. H. Soils and landforms. In: MESSINA, M.G.; CONNER, W.H. (eds). **Southern forested wetlands**: ecology and management. Boca Raton, FL. Lewis Publishers/CRC Press. 1998. p.123-147.

VIATOR, R. P.; GARRISON, D. D.; DUFRENE, E. O. Jr., TEW, T. L.; RICHARD, E. P. Jr. **Planting method and timing effects on sugarcane yield**. Online. Crop Management. 2005. Disponível em:  
<<http://pubag.nal.usda.gov/pubag/downloadPDF.xhtml?id=11891&content=PDF>>.  
Acesso em: 20 Ago. 2015.

XU, G.; ZHAN, X.; CHUNHUA, L.; BAO, S.; LIU, X.; CHU, T. Assessing methods of available Si in calcareous soils. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, Athens, v. 32, p. 787-801, 2001.

## ANEXOS

### Anexo A – Caracterização da fonte de Si utilizada.

Tabela 1A. Composição química da fonte de Si utilizada.

<b>Elemento</b>	<b>%</b>
Silício	14
Cálcio	23
Magnésio	7
Enxofre	0,5
Manganês	1,6
Ferro	14
Alumínio	7

Si: HNO<sub>3</sub>-HCL (bloco digestor) e determinação em ICP. Demais elementos: HNO<sub>3</sub>-HCl (microondas) e determinação em ICP.

**Anexo B** - Caracterização do solo da área de instalação do experimento.

- Caracterização do solo “**Commerce silt loam soil**” - A série “Commerce” pertence à ordem dos Inceptisols, que correspondem, na Classificação Brasileira de Solos, aos Cambissolos. Esse tipo de solo está tipicamente presente em áreas de cultivo de relevo plano. Tratam-se de solos profundos, com alguns problemas de drenagem, de permeabilidade moderada que se formaram nas áreas de acúmulo de sedimentos aluviais argilosos. Estão presentes no mesmo nível das planícies aluviais do Rio Mississippi e de seus afluentes, com inclinação dominante menor que 1 %, podendo chegar até a 5 % (USDA, 2013).

Tabela 1B. Caracterização química (0-15 cm) do solo classificado como “Commerce silt loam” (Sugar Research Station. Saint Gabriel, Louisiana. EUA. 2012).

<b>pH</b> H <sub>2</sub> O	<b>P</b>	<b>K</b>	<b>Ca<sup>2+</sup></b>	<b>Mg<sup>2+</sup></b>	<b>SB</b>	<b>T</b>	<b>Si</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>S</b>	<b>Na</b>
	---- mg dm <sup>-3</sup> ----		----- cmol <sub>e</sub> dm <sup>-3</sup> -----				----- mg dm <sup>-3</sup> -----				
6,3	26,5	131,5	9,1	3,3	12,4	16	40	3,1	2,7	9,9	28

P, K, Ca, Mg, S, Na, Zn e Cu = Mehlich-3; Si = Ácido acético 0,5 M; SB = Soma de Bases; T = CTC.

**Anexo C** – Caracterização da variedade plantada no experimento.

- Caracterização da variedade de cana-de-açúcar **LSU 01-299** - tem hábito de crescimento muito ereto e apresenta produção de soqueira e rendimento de açúcar extremamente bons, principalmente em soqueiras mais velhas. É resistente à Ferrugem marrom (*Puccinia melanocephala*), à Escaldadura das folhas (*Xanthomonas albilineans*) e à Broca da cana-de-açúcar (*Diatraea saccharalis*), porém suscetível à Estria marrom (*Cochliobolus stenospilus*) e ao Carvão (*Ustilago scitaminea*). Devido à sua boa característica de produção de soqueira, se adapta bem a solos pesados (GRAVOIS, 2013).