



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

**FONTES DE FÓSFORO E ENXOFRE PARA CANA-DE-AÇÚCAR**

BRUNO NICCHIO

2018

BRUNO NICCHIO

**FONTES DE FÓSFORO E ENXOFRE PARA 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/Solos, para obtenção do título de “Doutor”.

Orientador

Prof. Dr. Gaspar Henrique Korndörfer

Co-orientador

Prof. Dr. Hamilton Seron Pereira

Co-orientadora

Prof<sup>ª</sup>. Dr.<sup>ª</sup> Brenda Servaz Tubana

UBERLÂNDIA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2018

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

---

N584f  
2018 Nicchio, Bruno, 1990-  
Fontes de fósforo e enxofre para cana-de-açúcar [recurso eletrônico]  
/ Bruno Nicchio. - 2018.

Orientador: Gaspar Henrique Korndörfer.  
Coorientador: Hamilton Seron Pereira.  
Coorientadora: Brenda Servaz Tubana  
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa  
de Pós-Graduação em Agronomia.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2018.631>

Inclui bibliografia.

1. Agronomia. 2. Cana-de-açúcar - Nutrição. 3. Fosfatos. 4. Sulfatos.  
I. Korndörfer, Gaspar Henrique (Orient.) II. Pereira, Hamilton Seron  
(Coorient.) III. Tubana, Brenda Servaz (Coorient.) IV. Universidade  
Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. V.  
Título.

---

CDU: 631

Gerlaine Araújo Silva - CRB-6/1408

BRUNO NICCHIO

## **FONTES DE FÓSFORO E ENXOFRE PARA 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/Solos, para obtenção do título de “Doutor”.

APROVADA em 10 de SETEMBRO de 2018.

Prof. Dr. Hamilton Seron Pereira (Co-orientador)	UFU
Eng. Agr. <sup>a</sup> Dr. <sup>a</sup> Raffaella Rossetto	APTA
Eng. Agr. <sup>o</sup> Dr. Robson Thiago Xavier de Sousa	CMAA
Eng. Agr. <sup>a</sup> Dr. <sup>a</sup> Lilian Aparecida de Oliveira	Pesquisadora

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

UBERLÂNDIA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2018

## DEDICATÓRIA

Àquele que me salvou e investe incessantemente em minha vida: JESUS! Aos meus amados pais, Mario Tadeu Nicchio e Maria Avany Matos Costa Nicchio que investiram em minha vida, com amor, entrega e educação. À minha amada esposa Mariana Vitorino Candeiro Nicchio pelo amor, carinho e doçura e aos meus irmãos Mario Tadeu Nicchio Júnior e Katarine Nicchio Lopes pelo apoio e incentivo.

Aos meus mentores Paulo e Rosangela Mazzali pelos conselhos, orações, decretos, direcionamentos, incentivo e carinho.

## AGRADECIMENTOS

Grato a Deus pela oportunidade e possibilidade de vivenciar experiências incríveis ao longo deste importante processo em minha vida. Agradeço especialmente à minha esposa Mariana por estar sempre ao meu lado, aos meus pais Mario Tadeu e Maria Avany Nicchio, aos meus irmãos Tadeu Júnior, Katarine, Wesley e Gêssica, à minha sogra Rita e cunhada Carolina por todo incentivo, motivação e carinho. Ao tio e Prof. Dr. Roberto Candeiro, pelo exemplo, apoio e incentivo desde o início desde sonho, obrigado. Aos avós Adelina e José Luiz, sogro Carlos e primo Caio por todo investimento e apoio nesta jornada.

Ao meu orientador Prof. Gaspar e co-orientador Prof. Hamilton pelo investimento, confiança, incentivo, exemplo e orientação desde o início.

Aos amigos de pós-graduação e graduação, Gustavo, Lucélia, Ana Carolina, Camila, Bárbara, Dayane, Rafael Arrieta, Tiago, Antônio, Luiz Henrique, Luiz Felipe, Bruno Guimarães, Artur e Mariana pelo companheirismo, colaboração e auxílio durante a realização dos experimentos.

À todos do Laboratório de Tecnologia de Fertilizantes “LAFER”, do Laboratório de Análises de Solo “LABAS” e do Grupo de Pesquisa Silício na Agricultura “GPSi” pela ajuda e auxílio.

À Dra. Brenda Servaz Tubana, durante o intercâmbio no exterior, pela co-orientação, oportunidade, contribuição e auxílio para o aprimoramento de meu programa de doutorado. Aos amigos, Murilo, Flávia, Marylin, Daniel, Jose, Joseph, Samuel, Wooiklee, membros do Grupo de Fertilidade do Solo da Universidade do Estado da Louisiana pelo companheirismo e colaboração durante o período de intercâmbio.

À usina Vale do Tijuco e Ouroeste, à Estação de Pesquisa de Açúcar e ao senhor Keith Dugas pelo fornecimento das áreas experimentais no Brasil e nos EUA, juntamente com a cooperação dos técnicos responsáveis e colaboradores para execução dos trabalhos de pesquisa.

Às empresas Vale Fertilizantes, Mosaic S/A e Sulvaris Inc. pelo fornecimento do material para realização da pesquisa.

Aos membros da banca Dr. Hamilton Seron Pereira, Dr. Robson Thiago Xavier de Sousa, Dr.<sup>a</sup> Lilian Aparecida de Oliveira e Dr.<sup>a</sup> Raffaella Rossetto pela participação nas considerações e contribuições deste trabalho.

À Universidade Federal de Uberlândia, Instituto de Ciências Agrárias e Programa de Pós-Graduação em Agronomia que permitiram a realização do doutorado, pelo suporte e conhecimentos concedidos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa (processo nº88881.135080/2016-01) de estudos no Exterior modalidade Doutorado Sanduíche (PDSE) realizado na Universidade do Estado da Louisiana, EUA.

MUITO OBRIGADO!

## EPÍGRAFE

“Eu vi o futuro, e decidir viver lá, eu vi o futuro, e fiz dele a  
minha morada.”

**Renê Terra Nova**

*“Porque Dele e por Ele, e para Ele, são todas as coisas;  
Glória, pois, a Ele eternamente. Amém.”*

**Romanos 11:36**

## SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRATC	ii
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUÇÃO GERAL	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1. Cultura da cana-de-açúcar ( <i>Saccharum officinarum</i> L.)	5
2.2. Fósforo	6
2.2.1. Fósforo no solo	6
2.2.2. Fósforo na cultura da cana-de-açúcar	8
2.2.3. Fontes de Fósforo	10
2.3. Enxofre	12
2.3.1. Enxofre no solo	12
2.3.2. Enxofre na cultura da cana-de-açúcar	14
2.3.3. Fontes de Enxofre	15
REFERÊNCIAS	20
CAPÍTULO 2: Avaliação da mistura de fosfatos acidulados, fosfatos naturais e fontes de enxofre aplicados em solos de diferentes texturas	29
RESUMO	30
ABSTRATC	31
1. INTRODUÇÃO	32
2. MATERIAL E MÉTODOS	33
2.1. Descrição das fontes de fósforo e enxofre	33
2.2. Delineamento experimental	34
2.3. Instalação	34
2.4. Avaliações	36
2.5. Análises estatísticas	37
3. RESULTADOS	38
3.1. Latossolo Vermelho distrófico (Textura Argilosa/LVd – 1)	38
3.2. Latossolo Vermelho distrófico (Textura Média/LVd – 2)	47
3.3. Neossolo Quartzarênico Órtico típico (Textura Arenosa/RQo)	55
4. CONCLUSÕES	62

REFERÊNCIAS	63
CAPÍTULO 3: Avaliação da mistura de fosfatos acidulados, fosfatos naturais e fontes de enxofre na produção de cana-de-açúcar	69
RESUMO	70
ABSTRATC	71
1. INTRODUÇÃO	72
2. MATERIAL E MÉTODOS	73
2.1. Delineamento experimental	73
2.2. Instalação	75
2.3. Avaliações	79
2.4. Análises estatísticas	81
3. RESULTADOS	82
3.1. Usina Bunge – Experimento 1	82
3.1.1. Cana planta	82
3.1.2. Cana soca	95
3.1.3. Produção acumulada	102
3.2. Companhia Mineira de Açúcar e Álcool – Experimento 2	104
3.2.1. Cana planta	104
3.2.2. Cana soca	110
3.2.3. Produção acumulada	119
4. CONCLUSÕES	120
REFERÊNCIAS	121
CAPÍTULO 4: Sulfur fertilization in Louisiana sugarcane production systems	128
ABSTRATC	129
RESUMO	130
1. INTRODUCTION	131
2. MATERIAL AND METHODS	134
2.1. Description of sulfur sources	134
2.2. Experimental design	135
2.3. Establishment of Field Trials	136
2.4. Sampling and Analysis	140
2.5. Statistical Analysis	142
3. RESULTS AND DISCUSSION	143

3.1. Leaf and stalk S content, and S stalk removal rate	143
3.2. Cane quality parameters (BRIX, Sucrose and Purity)	147
3.3. Millable Stalk and Sugar Yield	150
3.4. Chemical properties of soil	153
4. CONCLUSIONS	159
REFERENCES	160

## RESUMO

NICCHIO, BRUNO NICCHIO. **Fontes de fósforo e enxofre para cana-de-açúcar.** 2018. 177f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia<sup>1</sup>.

O fósforo (P) e o enxofre (S) desempenham papel fundamental no rendimento da cana-de-açúcar, com isso, a aplicação desses nutrientes influencia de forma direta na produtividade desta cultura. Com base nessa premissa, objetivou-se avaliar o desempenho de fontes de fósforo e enxofre na cultura da cana-de-açúcar em de casa-de-vegetação e campo. O estudo de casa-de-vegetação foi conduzido em solos de textura argilosa, média e arenosa. Os tratamentos avaliados foram: testemunha, SFT, SFT + S<sup>0</sup>, SFT + Gesso, MAP + S<sup>0</sup>, MAP + Gesso, FNR Reativo + S<sup>0</sup>, FNR Bayóvar + Gesso, FN alta reatividade + SFT + S<sup>0</sup> e FN baixa reatividade + SFT + S<sup>0</sup> (dose de 120 mg kg<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 40 mg kg<sup>-1</sup> de S). A mistura de fertilizantes fosfatados e enxofre elementar (S<sup>0</sup>) foi mais eficiente em aumentar a massa seca e os teores de fósforo em solo de textura média. O fosfato natural de baixa reatividade incorporado com SFT e S<sup>0</sup> no grânulo e os fosfatos misturados com gesso foram mais eficientes em aumentar o enxofre acumulado em cana-de-açúcar e os teores de enxofre em solo de textura argilosa. O fosfato natural de alta reatividade incorporado com SFT e S<sup>0</sup> no grânulo e os fosfatos misturados com S<sup>0</sup> foram mais eficientes em aumentar os teores de fósforo em solo de textura arenosa. Os estudos de campo foram conduzidos com aplicação dos tratamentos no sulco de plantio da cana em duas áreas, avaliados por dois cultivos. Os tratamentos avaliados foram: testemunha, SFT, SFT + S<sup>0</sup>, SFT + Gesso, MAP + S<sup>0</sup>, MAP + Gesso, FNR Bayóvar + S<sup>0</sup>, FNR Bayóvar + Gesso, FN alta reatividade + SFT + S<sup>0</sup> e FN baixa reatividade + SFT + S<sup>0</sup> (dose de 120 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 40 kg ha<sup>-1</sup> de S). A mistura de fertilizantes fosfatados (SFT, MAP e FNR Bayóvar) e enxofre elementar foi eficiente em aumentar a produção de colmos e açúcar e os teores de fósforo no solo. O fosfato natural de alta e baixa reatividade ambos incorporados com SFT e S<sup>0</sup> no grânulo foram mais eficientes em aumentar os teores de fósforo no solo que o fosfato natural reativo Bayóvar misturados com enxofre elementar e gesso. O efeito positivo dos tratamentos com gesso em relação ao enxofre elementar pode estar relacionado à intensidade do estresse hídrico e as condições de cultivo verificado em um dos experimentos. Experimentos de campo também foram realizados em área produtora de cana-de-açúcar no estado da Louisiana, EUA, com objetivo de estudar o efeito agrônômico de diferentes fontes de enxofre em cana-de-açúcar. Quatro experimentos de campo foram realizados, com diferentes tratamentos (fontes de S elementar micronizado, sulfato, tiossulfato, Microessentials/MES15 e controle). Os resultados deste estudo mostraram que as fontes de S contendo sulfato e MST (S elementar micronizado) foram efetivas em elevar o S foliar e concentração e acúmulo de S no colmo. A produção de colmos e de açúcar das parcelas tratadas com S, independentemente da fonte, foram numericamente superiores às parcelas controle para ambos os locais, ou seja, St. Gabriel e Donaldsonville. Para o site de Donaldsonville, a aplicação de fosfato MST aumentou o conteúdo de BRIX e sacarose do caldo de cana. Além disso, as aplicações de fosfato MST e Microessentials foram eficientes em aumentar o S foliar, concentração e acúmulo no colmo e teor de P em solo siltoso.

**Palavras-chave:** fosfatos, MAP, sulfato, enxofre elementar e *Saccharum spp.*

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

## ABSTRACT

NICCHIO, BRUNO NICCHIO. **Sources of phosphorus and sulfur for sugarcane.** 2018. 177p. Thesis (Doctorate's degree in Agronomy) - Federal University of Uberlândia<sup>1</sup>.

Phosphorus (P) and sulfur (S) have fundamental importance on sugarcane; therefore, the application of these nutrients directly affects the productivity of this crop. Based on that, this study evaluated the performance of phosphorus and sulfur sources in the sugarcane crop. Different sources were evaluated in greenhouse and field experiments. The greenhouse study was conducted on clayey, silty clay and sandy soils. The treatments evaluated were control, TSP, TSP + S<sup>0</sup>, TSP + Gypsum, MAP + S<sup>0</sup>, MAP + Gypsum, Reactive Bayovar Phosphate + S<sup>0</sup>, Reactive Bayovar Phosphate + Gypsum, high reactivity Natural Phosphate + TSP + S<sup>0</sup>, and low reactivity Natural Phosphate + TSP + S<sup>0</sup> (rate of 120 mg kg<sup>-1</sup> of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and 40 mg kg<sup>-1</sup> of S). The mixture of phosphate fertilizers and elemental sulfur (S<sup>0</sup>) was more efficient, increasing dry mass and phosphorus content in the medium texture soil. The low reactivity natural phosphate incorporated with SFT and S<sup>0</sup> in the granule and the phosphates mixed with gypsum were more efficient, increasing sulfur accumulated in sugarcane and sulfur contents in clayey soils. The high reactivity natural phosphate incorporated with SFT and S<sup>0</sup> in the granule and the phosphates mixed with S<sup>0</sup> were more efficient in increasing phosphorus content in sandy soil. The field studies were conducted with application of treatments in the cane planting furrow in two areas, evaluated for two cropping seasons. The treatments evaluated were control, TSP, TSP + S<sup>0</sup>, TSP + Gypsum, MAP + S<sup>0</sup>, MAP + Gypsum, Reactive Bayovar Phosphate + S<sup>0</sup>, Reactive Bayovar Phosphate + Gypsum, high reactivity Natural Phosphate + TSP + S<sup>0</sup>, and low reactivity Natural Phosphate + TSP + S<sup>0</sup> (rate of 120 kg ha<sup>-1</sup> of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and 40 kg ha<sup>-1</sup> of S). The mixture of phosphate fertilizers (TSP, MAP and Reactive Bayovar Phosphate) and elemental sulfur was efficient increasing the production of cane tonnage and sugar yield, and the phosphorus levels in the soil. High and low reactivity natural phosphates, both incorporated with SFT and S<sup>0</sup> in the granule, were more efficient increasing phosphorus content in the soil than the natural reactive phosphate Bayovar mixed with elemental sulfur and gypsum. The positive effect of gypsum treatments in relation to elemental sulfur may be related to the intensity of the water stress and the conditions of cultivation observed in one of the experiments. Field experiments were also done with different treatments (elemental micronized S, sulfate, thiosulfate, Microessentials/MES15 and control). The results of this study showed that S sources containing sulfate and MST (micronized elemental sulfur) were effective in raising leaf S, and stalk S content and accumulation. Cane tonnage and sugar yield of S-treated plots, regardless of source were numerically greater than the control plots for both locations, i.e., St. Gabriel and Donaldsonville. The application of phosphate MST increased BRIX and sucrose content of cane juice at the Donaldsonville site. Moreover, both phosphate MST and Microessentials applications were effective in raising leaf and stalk S content, stalk S accumulation and soil P contents on a silt loam soil.

**Keywords:** Phosphate, sulfate, elemental sulfur and *Saccharum* spp.

---

<sup>1</sup>Supervising committee: Gaspar Henrique Korndörfer – UFU (Supervisor), Hamilton Seron Pereira – UFU (Co-supervisor) and Brenda Servaz Tubana (Co-supervisor).

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, cultura de grande importância para o agronegócio brasileiro. Estima-se uma área de colheita em 8.738,6 milhões de hectares para safra 2017/2018, com uma produção estimada de 635,6 milhões de toneladas (redução de 3,3% à safra anterior). No entanto, estima-se um aumento de 0,2% na produtividade da safra 2017/2018 em relação à anterior na ordem de 72,73 t ha<sup>-1</sup> (CONAB, 2018).

O cultivo de grandes culturas tem crescido atualmente e um fator que tem influenciado o aumento na produtividade de maneira drástica é o uso de fertilizantes minerais (BANCO MUNDIAL, 2009; IFA, 2008; FAO, 2013). Até 2061, estima-se que mais 77% do crescimento futuro na produção agrícola será em função do aumento de produtividade, o que torna os fertilizantes, insumos de grande relevância para esse aumento (FAO, 2013).

Segundo a Associação Internacional da Indústria de Fertilizantes (IFA, 2008), os maiores consumidores de fertilizantes minerais no mundo são: China (30%), Índia (13%), Estados Unidos (12%), Brasil (6%) e os demais países. De acordo com a Associação Nacional para Difusão de Adubos (ANDA), o consumo de “NPK” no Brasil, aumentou na ordem de 14,02% no período de 2015 a 2017, com aumento na importação de 24,74%. Nos últimos anos, o país apresentou índices crescentes de importação de fertilizantes minerais, sendo mais de 50% para os fertilizantes fosfatados, e mais de 80% para os sulfatados (IFA, 2008).

De acordo com o MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (2009a), o Brasil é o 4º maior consumidor mundial de fertilizantes fosfatados, e seu consumo tem crescido muito mais do que a produção agrícola nas últimas décadas como resultado da intensificação do processo produtivo no campo. A produção mundial de concentrado de rocha fosfática é de cerca de 167 milhões de toneladas, com a China produzindo 30% do total, Estados Unidos, 19%, Marrocos, 17% e Brasil responsável por apenas 3,7% (6,3 milhões de toneladas).

No caso do enxofre, cerca de 69 milhões de toneladas são produzidas anualmente no mundo em todas as suas formas para serem consumidos pela indústria mundial. No Brasil, seu uso mais importante e preponderante é na indústria de fertilizantes, por ser integrante na produção de fertilizantes NPK, utilizados na agricultura brasileira, entretanto o país detém apenas 1,2% das reservas mundiais, o que

justifica ser um dos maiores importadores, atrás apenas de países como China, Marrocos, EUA, Tunísia e Índia (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2009b).

A cana-de-açúcar ocupa áreas de cultivo com diferentes níveis de nutrientes, como o fósforo (P) e enxofre (S) e desta maneira o suporte através da adubação é necessário para obtenção de altas produtividades. O P e S exercem funções importantes no enraizamento, perfilhamento, absorção de nutrientes, aumento na produção de colmos e teor de sacarose da cana. Porém, em função da interação desses nutrientes com solos tropicais em sua maioria altamente intemperizados e com alto poder de fixação, a eficiência da fertilização destes elementos é reduzida. Aliado a esses fatores, baixos teores de matéria orgânica e altos teores de óxidos de Fe e Al são comuns nesses solos, desfavorecendo a disponibilidade de S e reduzindo sua movimentação em solos argilosos ou elevando sua percolação em solos arenosos.

As fontes de P mais comuns são classificadas como elevada, intermediária e baixa solubilidade de acordo com sua matéria-prima e tipo de processamento. Os fosfatos de alta solubilidade, apesar de serem mais caros, são fontes que apresentam elevados teores de P solúvel, mas, devido ao processo de fixação de P no solo, sua eficiência pode ser reduzida. Os fosfatos de intermediária e baixa solubilidade são fontes que apresentam baixos teores de P solúvel e maior parte do P na forma insolúvel, que pode ser solubilizado ao longo do tempo, entretanto, essas fontes são pouco eficientes em função da matéria-prima (origem ígnea ou metamórfica) conter altos níveis de contaminantes (óxidos de Fe e Al).

A mistura destes fosfatos no mesmo grânulo pode ser uma ferramenta alternativa como meio de aumentar a solubilização desses fosfatos de baixa ou intermediária solubilidade e de reduzir as perdas de P provenientes dos fosfatos solúveis. O P proveniente do fosfato solúvel seria aproveitado na fase inicial da cultura e o P proveniente do fosfato insolúvel seria solubilizado pela solução ácida formada no grânulo ao longo do desenvolvimento da cultura.

Mesmo assim, segundo César (2016), a dissolução do fosfato solúvel pode ser muito rápida, o que tornaria a solubilização do fosfato natural mais lenta. Assim, uma possível forma de aumentar a eficiência desta associação seria o emprego de enxofre elementar ( $S^0$ ) na mistura, pois a oxidação e acidez gerada pelo  $S^0$  em contato com o fosfato insolúvel no mesmo grânulo poderiam atuar na melhoria da solubilização do fosfato (RAJAN; WATKINSON; SINCLAIR, 1996). A estratégia ideal para o melhor aproveitamento de P e S pela cana-de-açúcar pode ser adubação conjunta desses

elementos no sulco de plantio através de fontes que apresentem maior eficiência e efeito residual, visando melhor nutrição da cana e estabelecimento das soqueiras.

Outra vantagem da incorporação no grânulo ou mistura física do S<sup>0</sup> com fosfatos seria a disponibilização de S para a cultura de forma localizada, já que os fosfatos granulados são comumente aplicados no sulco de plantio da cana-de-açúcar. No Brasil, a deficiência de S em diversas culturas agrícolas é uma realidade, ao mesmo tempo, diversos estudos nos EUA têm indicado número crescente de casos de deficiências de S em solos agricultáveis e aumento considerável consumo de S pelas culturas, como a cana-de-açúcar.

Assim, o uso de fontes de fósforo associadas com fontes de enxofre pode aumentar sua eficiência na disponibilização de nutrientes para as plantas. Com base no exposto acima, este trabalho teve o objetivo de avaliar o efeito da mistura de fosfatos acidulados, fosfatos naturais e fontes de enxofre aplicados em solos de diferentes texturas; avaliar a aplicação das fontes de fósforo e enxofre na produtividade, parâmetros tecnológicos, absorção foliar de cana-de-açúcar e atributos químicos em solos de cerrado brasileiro; e estudar o efeito de diferentes fontes de enxofre na produtividade, parâmetros tecnológicos, absorção e concentração de enxofre em cana-de-açúcar no Estado da Louisiana (EUA).

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

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

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.), cuja cadeia produtiva gera milhões de postos de trabalho, desenvolvimento de novas tecnologias e produção dos mais variados produtos. Além disso, o setor sucroenergético destaca-se na cadeia produtiva de biocombustíveis devido ao grande potencial de produção de etanol e aos respectivos subprodutos, assim como sua utilização para alimentação animal e produção de cachaça. Além da produção de etanol e açúcar, as unidades produtoras têm condições de ampliar sua atuação como fornecedor de energia limpa e renovável, cogeração de energia elétrica proveniente da queima do bagaço e da palha, e obtenção de créditos de carbono (CONAB, 2018).

O aumento da demanda mundial por etanol oriundo de fontes renováveis, aliado às grandes áreas cultiváveis e condições edafoclimáticas favoráveis à cana-de-açúcar tornam o país promissor para a exportação dessa commodity, o que justifica as crescentes pesquisas voltadas para obtenção de maiores incrementos de produtividade. A produção de etanol deverá alcançar um patamar de 29 bilhões de litros, com redução de apenas 2,7% em relação à safra anterior, em razão da preferência pela produção de açúcar (CONAB, 2018). Grande parte do açúcar comercializado no mundo é proveniente da produção brasileira, que deve alcançar uma produção de 39,46 milhões de toneladas na safra 2017/2018 e até 47,34 milhões de toneladas até 2018/2019 (BRASIL, 2014; NASCIMENTO, 2016; CONAB, 2018).

O cultivo da cana-de-açúcar ocorre em épocas alternadas e nas mais variadas condições climáticas em função da extensão territorial do país, além disso, é possível que o Brasil seja o único país com duas épocas de colheita anuais: a safra de parte da Região Nordeste vai de setembro a abril e a do Centro-Sul e demais regiões vão de março a dezembro, correspondendo aos períodos mais secos nessas regiões (ALFONSI et al., 1987; SOUSA, 2014).

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. Na maioria das pesquisas as extrações dos nutrientes encontraram-se na seguinte ordem para macronutrientes: K>N>Ca>Mg>S>P (MAEDA, 2009). Para uma produção de 100 t ha<sup>-1</sup>, a cana-de-açúcar necessitaria de uma extração de nutrientes da ordem de 143 kg de nitrogênio (N), 43 kg fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>), 210 kg potássio (K<sub>2</sub>O), 87 kg cálcio (Ca), 49 kg magnésio (Mg) e 44 kg enxofre (S). No caso dos micronutrientes

seriam necessários 7,318 g de ferro (Fe), 2,470 g de manganês (Mn), 592 g de zinco (Zn), 339 g de cobre (Cu), e 235 g de boro (B) (ORLANDO FILHO, 1993).

O ambiente de produção de cana-de-açúcar é definido em função de diversas condições do solo (físicas, hídricas, morfológicas, químicas e mineralógicas) 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. Além do mais, esse ambiente é associado 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 (PRADO, 2005; DINARDO-MIRANDA et al., 2008).

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. Sendo assim, o emprego de fontes alternativas como fornecedores de nutrientes nessas áreas produtoras é de suma importância, conforme observado por diversos autores na literatura (KORNDÖRFER, 1994; KORNDÖRFER; MELO, 2009; RAMOS, 2013; NICCHIO, 2014; TEIXEIRA, 2014; SOUSA, 2014; SANTOS, 2017).

## **2.2. Fósforo**

### **2.2.1. Fósforo no solo**

Os solos variam na sua capacidade de suprir fósforo (P) para as plantas em função das formas em que este nutriente se encontra e também da quantidade e do grau de disponibilidade de cada forma, bem como das características físicas que afetam a sua condução através da solução do solo até o contato com a raiz. O grau de intemperismo do solo, evidenciado pelas suas características mineralógicas (tipo de argila, presença de minerais, óxidos de ferro e alumínio e etc.) possibilita avaliar a reserva total e o grau de disponibilidade de P a longo prazo (RAIJ, 1991; SOUSA; LOBATO, 2002).

A principal forma química do P no solo é o íon ortofosfato ( $H_2PO_4^-$ ). Em geral, os solos brasileiros apresentam baixo teor disponível de P no solo devido às reações de sorção que ocorrem naturalmente em função da interação de íons em solução com a fase sólida do solo (óxidos, hidróxidos, argilominerais, carbonatos e matéria orgânica). Mas

a intensidade dessas reações é variável devido às diferentes energias apresentadas pelos componentes dos solos (MALAVOLTA, 2006; HINSINGER, 2001). A natureza e a energia dessas ligações permitem classifica-las em adsorção, fixação e precipitação, as quais juntas compõem o complexo de sorção (PINTO, 2012).

A adsorção do íon fosfato ocorre quando o mesmo é fixado pelo componente do solo (adsorvente). Essa ligação pode ocorrer com a presença de molécula de água interpondo o íon fosfato com o componente do solo, tornando-a pouco estável. Mas, com a desidratação desta ligação em função de sua maior força de atração, o íon fosfato liga-se diretamente ao componente do solo/adsorvente (hidroxilas) tornando-a covalente com uma ou mais ligações (NOVAIS et al., 2007; MEURER, 2010; PINTO, 2012).

Em solos mais ácidos, o P já nas primeiras horas depois de aplicado tende a precipitar-se com ferro (Fe), alumínio (Al) e manganês (Mn), ou ainda, ser adsorvido pela superfície das argilas e dos óxidos de Fe e Al formando compostos de menor solubilidade, consequência da mineralogia e pH desses solos (SOUSA; LOBATO, 2002; EMBRAPA, 2007; NOVAIS et al., 2007). O pH é um fator determinante na forma química de P na solução e a disponibilidade máxima do P acontece quando o pH está ao redor de 6,5. O P na solução é encontrado nas formas iônicas  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  (fosfato diácido),  $\text{HPO}_4^{2-}$  (fosfato monoácido) ou  $\text{PO}_4^{3-}$  (fosfato) (RAIJ, 1991; RAIJ, 2011; SILVA, 2011).

No solo, as diferentes formas de P relacionadas à sua disponibilidade são agrupadas em três frações: o fósforo em solução o fósforo lábil e o fósforo não lábil. Na solução do solo o teor de P é normalmente baixo em solos de Cerrado, menor que  $0,1 \text{ mg dm}^{-3}$  (em maior proporção na forma de  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$  e em menor  $\text{HPO}_4^{2-}$ ) estando em equilíbrio rápido com as formas lábeis da fase sólida. O P não-lábil (forma indisponível as plantas) está em maior proporção do P inorgânico do solo e que só lentamente pode voltar as formas lábeis (GOEDERT et al., 1986; RAIJ et al., 1991).

A indisponibilidade de P pode ser tão mais intensa quanto mais intemperizado, ácido, argiloso e oxidico for o solo, e com isso, tornam-se necessárias aplicações de P superiores às requisitadas pelas culturas (EMBRAPA, 2007). Assim a análise de solo é de suma importância para quantificação de P disponível (somatório do P-solução e P-Lábil) no solo e melhor recomendação de adubação (SOUSA et al., 2004; SILVA, 2011). A mobilidade do P no solo é mínima e, conseqüentemente, suas perdas por lixiviação são desprezíveis (CAIONE, 2011).

Também é importante considerar o teor de P nativo do solo. Em áreas cultivadas com cana-de-açúcar no estado do Alagoas, a resposta à adubação fosfatada foi dependente da disponibilidade de P no solo e não houve resposta da adubação fosfatada quando os teores de P foram maiores que  $9 \text{ mg dm}^{-3}$  de P (ALBUQUERQUE et al., 1980). Resultados se assemelham ao de Weber et al. (1993) que obtiveram repostas mais consistentes em área com teor de fósforo nativo abaixo de  $9 \text{ mg dm}^{-3}$ .

Segundo Peres et al. (2014), tendo conhecimento de como as características do solo influenciam na disponibilidade de P, fica implícita a sua importância para a determinação da forma e dose de aplicação do fertilizante fosfatado, além da cultura, do clima e do sistema de cultivo adotado.

### **2.2.2. Fósforo na cultura da cana-de-açúcar**

A absorção de P pelas plantas ocorre em grande parte como íon ortofosfato primário ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ), mas pode ser absorvido em menor parte como íon ortofosfato secundário ( $\text{HPO}_4^{2-}$ ) (BARBOSA FILHO, 1987; LOPES, 1989; RAIJ, 2011). Este nutriente é importante em uma série de processos fisiológicos das plantas, sendo mais conhecido pela sua função de transferência de gene e energia, para o crescimento e reprodução dos vegetais. É parte integrante de várias moléculas químicas, como açúcares fosfatados, nucleotídios, coenzimas, fosfolipídios, ácido fítico, além de ser parte estrutural do difosfato e trifosfato de adenosina (ADP e ATP). Do mesmo modo, o P faz parte na formação de proteínas, processo de divisão celular, sínteses, fotossíntese, respiração, armazenamento de energia e aumento na eficiência da utilização de água (ALEXANDER, 1973; NAHAS, 1991; MALAVOLTA et al., 1997; KORNDÖRFER, 2004; NICCHIO, 2014).

No metabolismo da cana-de-açúcar o P desempenha função-chave no processo de divisão celular, formação de proteínas, fotossíntese, armazenamento de energia, desdobramento de açúcares, respiração e fornecimento de energia a partir do ATP e formação de sacarose (KORNDÖRFER, 2004). O fornecimento de P em quantidade adequada favorece o melhor enraizamento, o perfilhamento e a absorção dos demais nutrientes (SANTOS et al., 2002; CAIONE, 2011; RAMOS, 2013).

A extração de P pela cana-de-açúcar é relativamente pequena quando comparado com o N e o potássio (K). De acordo com Orlando Filho (1993), para uma produção de  $100 \text{ t ha}^{-1}$  a extração de nutrientes que a cultura necessitaria seria de 143 kg de nitrogênio (N), 43 kg fósforo ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ), 210 kg potássio ( $\text{K}_2\text{O}$ ). Deste modo, a exportação

de P pela cultura é cerca de 8 vezes menor que a de N e K que pode variar de acordo com a variedade e do tipo de solo em que está sendo cultivada (GOMES, 2003).

De acordo com Santos (2012), além dos benefícios relacionados à produtividade no campo, o P também pode aumentar a qualidade da cana-de-açúcar, essencial nas unidades industriais produtoras de açúcar. O P também é importante para o processo de fermentação alcoólica, ou seja, para a transformação do açúcar em etanol, pois favorece a ação das leveduras (SILVA et al., 2006; CALHEIROS et al., 2011).

O P é um nutriente móvel nos tecidos vegetais estando presente nas regiões de crescimento mais ativo das plantas, apresentando deficiências inicialmente nas folhas mais velhas, tornando-as mais finas, estreitas, curtas e arroxeadas (ESTÉVES, 1986; STAUFFER; SULEWSKI, 2004). Quando as plantas estão adequadamente nutridas, de 85% a 95% do P orgânico encontra-se nos vacúolos e na ocorrência de deficiência, o P não metabolizado sai do vacúolo e é redistribuído para os órgãos mais novos (VITTI et al., 2004).

Na cana-de-açúcar a deficiência de P pode reduzir a brotação, perfilhamento, altura das plantas, diâmetro de colmo, encurtamento dos entrenós e conseqüentemente menor produtividade. Também reduz a absorção de nitrogênio dificultando o processo de clarificação do caldo durante a fabricação do açúcar, tornando-o de menor qualidade e menor valor econômico (STUPIELLO, 1987; KORNDÖRFER, 2004; MAHADEVAIAH et al., 2007).

Segundo Sousa (2011), a adubação fosfatada na cultura da cana-de-açúcar depende dos teores de P disponíveis no solo e a produtividade esperada. Em geral, são recomendadas nas áreas de expansão das regiões canavieiras e nos solos de cerrado, doses na faixa de 160 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> no sulco de plantio, valor que contrasta com a dosagem comumente empregada nas áreas tradicionais, da ordem de 120 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Rodella; Martins (1988) preconizam que a aplicação da dose adequada de P em cana planta é de grande importância para o estabelecimento e desenvolvimento de perfilhos, o que colabora para a obtenção de soqueiras em melhores condições de produtividade. Além de todos os fatores já citados, conforme descrito por Pereira et al. (1995), fatores como clima, variedade, manejo do solo e adubação exercem influência sobre a produtividade da cana-de-açúcar.

### 2.2.3. Fontes de Fósforo

Em termos mundiais, mais de 99% dos fertilizantes fosfatados são produzidos a partir de reservas de rochas fosfáticas pelo tratamento com ácidos e no Brasil, mais de 50% dos fertilizantes fosfatados consumidos são importados (LOPES et al., 2004).

No Brasil, a matéria-prima básica para produção de fertilizantes fosfatados são os minerais de apatita, predominando a Fluorapatita [ $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6\text{F}_2$ ]. As fontes de fósforo podem ser divididas basicamente em solúveis, pouco solúveis e insolúveis (KORNDÖRFER et al., 1999). As principais fontes de P utilizadas são os fosfatos totalmente acidulados (superfosfato simples – SSP e superfosfato triplo – SFT), os fosfatos de amônio (monoamônio fosfato – MAP e diamônio – DAP) obtidos por acidulação total e termofosfato (termofosfato magnésiano) obtido por processos térmicos com consumo de elevada quantidade de energia. Os fosfatos alternativos (parcialmente acidulados) e os fosfatos naturais (fosfatos de Arad, Gafsa, Bayóvar, Araxá e etc.) são obtidos pela moagem da rocha fosfática com reatividade e eficiência agrônômica relativa dependente da mineralogia da rocha (PROCHNOW; ALCARDE; CHIEN, 2004; EMBRAPA, 2007).

A garantia desses produtos fertilizantes é sempre feita com base na quantidade de  $\text{P}_2\text{O}_5$  solúvel em água ( $\text{H}_2\text{O}$ ), ácido cítrico (AC) e Citrato Neutro de Amônio +  $\text{H}_2\text{O}$  (CNA+ $\text{H}_2\text{O}$ ), de tal forma que contenha elevada fração de  $\text{P}_2\text{O}_5$  solúvel em CNA+ $\text{H}_2\text{O}$  também solúvel em água (84% a 92%; Fração de  $\text{P}_2\text{O}_5$  solúvel em água) conforme previsto na legislação brasileira (GOERDERT; SOUSA, 1984; SOUSA; LOBATO, 2004; PROCHNOW et al., 2004). A característica mais importante dos fertilizantes fosfatados é a sua eficiência agrônômica, a qual expressa sua capacidade de promover o maior acréscimo de produtividade por unidade de P aplicado (SOUSA; LOBATO, 2004; NICCHIO, 2014).

A maior parte da matéria-prima utilizada na fabricação dos fosfatos é constituída de uniões de minerais agrupados sob o termo genérico de rocha fosfórica (ou fosfática ou fosfatada) que inclui uma ampla variedade de rochas quanto à composição mineralógica (PROCHNOW; ALCARDE; CHIEN, 2004). As reservas brasileiras constituem em sua maioria de rochas com altos níveis de contaminantes, particularmente de óxidos de Fe e Al que possuem quantidade limitada de P disponível para as plantas (MALAVOLTA; ALCARDE 1986). Na região do Cerrado são encontradas algumas das principais jazidas do País, todavia, a origem ígnea ou

metamórfica aliado a estrutura bem cristalizada, faz com que os fosfatos naturais sejam de baixa reatividade (MALAVOLTA, 1981; HOROWITZ; MEURER, 2004).

As rochas fosfáticas podem ser divididas em rochas de alta, média e baixa reatividade. Em geral, as rochas de origem sedimentar apresentam alta reatividade e as de origem ígnea e metamórfica baixa reatividade. Segundo Braithwaite et al. (1990), um fosfato natural é considerado reativo quando 30% do P-total for solubilizado em solução de ácido cítrico (2%). Segundo Léon et al. (1986), as rochas de alta eficiência são aquelas provenientes da Tunísia (Gafsa), Israel (Arad), Peru (Bayóvar) e Carolina do Norte (USA). As de média reatividade são vindas do centro da Flórida e Tennessee (USA), Pesca e Huila (Colômbia) e as de baixa eficiência são de Patos de Minas, Abaeté e as de muito baixa são as de Catalão e Tapira.

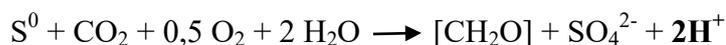
Para o uso das rochas fosfáticas, torna-se necessário sua solubilização, o que pode elevar os custos de processamento relacionados às dificuldades de tratamento, acidulação e purificação da rocha fosfórica (RIEDER, 1986; PROCHNOW; ALCARDE; CHIEN, 2004). Segundo Novais et al. (2007), os fosfatos de elevada solubilidade correspondem a mais de 90% do  $P_2O_5$  aplicado na agricultura brasileira, e em geral, sua eficiência é maior em curto prazo e reduzida com o passar do tempo, resultado dos processos envolvendo o P no solo. No caso dos fosfatos insolúveis, sua eficiência a longo prazo é maior, pois a disponibilização de P aumenta com o tempo decorrido da sua aplicação ao solo (RAJAN; WATKINSON; SINCLAIR, 1996; HOROWITZ; MEURER, 2004). Por outro lado, o uso de fontes com solubilidade intermediária poderiam apresentar fosfatos com cinética de liberação do fósforo mais ajustada a demanda da cultura e com maior eficiência na disponibilização de P para as plantas (CARMO, 1986; GOEDERT et al., 1990; CÉSAR, 2016; SANDIM, 2016).

Com base nesta premissa, e, como meio de melhorar a solubilização dos fosfatos naturais, a mistura de fosfato natural reativo (alta ou baixa reatividade) com fosfato acidulado tem sido pesquisada (CÉSAR, 2016). O princípio desta mistura é que a fração do fosfato totalmente acidulado forneça P na fase inicial de desenvolvimento da cultura, favorecendo o sistema radicular para posterior aproveitamento da fração proveniente do fosfato natural. Além disso, uma solução ácida é formada na região do grânulo durante o processo de solubilização da fração do fosfato acidulado, o que facilitaria a solubilização do fosfato natural (CHIEN, 1996; CÉSAR, 2016). Trabalhos científicos nesse sentido já realizados em culturas como milho, soja, trigo e azevém, demonstraram que os fosfatos naturais (alta ou baixa reatividade) associados com SFT foram

equivalentes ou mais eficientes que os fosfatos totalmente acidulados (NACHTIGALL et al., 1989; CHIEN, 1996; PROCHNOW et al., 2004; OLIVEIRA JUNIOR, 2007; FRANZINI et al., 2009; CÉSAR, 2016).

No entanto, de acordo com César (2016), a dissolução do SFT associado com fosfatos naturais (alta ou baixa reatividade) no mesmo grânulo pode ser muito rápida. Com isso, a fração do fosfato natural não solubilizada no solo por meio da acidez gerada através SFT, pode ficar em contato restrito com o solo e prótons de  $H^+$  necessários para sua solubilização, reduzindo a influência do SFT na solubilização do fosfato natural (WILLIAMS, 1971). Uma possível forma de aumentar a eficiência desta associação é o emprego de enxofre elementar ( $S^0$ ) na mistura, pois o contato íntimo do  $S^0$  com o fosfato natural atuaria na solubilização do fosfato em função da oxidação e acidez gerada por meio do  $S^0$  (RAJAN; WATKINSON; SINCLAIR, 1996; NASCIMENTO, 2016).

A reação de oxidação do  $S^0$  a  $SO_4^{2-}$  no solo promove a liberação de prótons ( $H^+$ ) e conseqüentemente acidificando o meio, ocorrendo da seguinte forma (SAIK, 1995; ALVAREZ-V et al., 2007; CÉSAR, 2012):



Uma outra fonte de S que poderia aumentar a eficiência de fontes de P é o gesso, pois ao reduzir compostos de Al, a mistura favoreceria a redução de fixação de P proveniente do fosfato, resultando em melhor disponibilização de P e desenvolvimento do sistema radicular das plantas (SARMENTO et al., 2002; SOARES, 2016).

## **2.3. Enxofre**

### **2.3.1. Enxofre no solo**

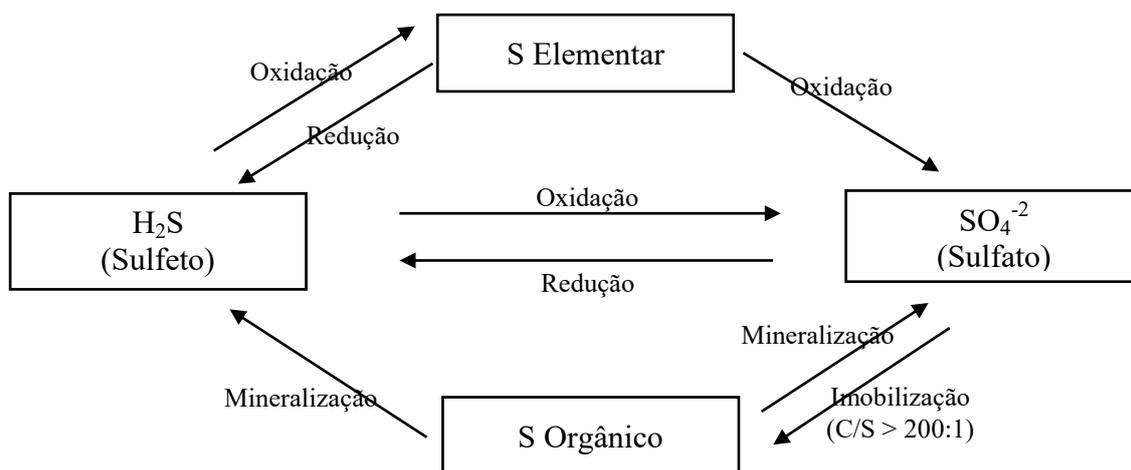
Estima-se que o enxofre (S) seja o nono elemento mais abundante da terra e pode ser encontrados na forma de sulfetos, sulfatos e elementar. Após o oxigênio e silício é o constituinte mais abundante dos minerais. Nos solos tropicais, o S está presente nas formas orgânica (mais predominante, cerca de 90%) e inorgânica. Os minerais primários, como sulfetos metálicos de Fe, Zn, Cu, Ca, Mg e o gesso são as fontes originais de S no solo, mas com intemperismo outros compostos e formas de S podem ser gerados (STIPP; CASARIN, 2010).

A entrada de S no solo pode ocorrer por intemperismo de minerais sulfatados, águas da chuva e irrigação, deposição atmosférica, resíduos vegetais e animais, adições de fertilizantes minerais ou orgânicos e pesticidas. Por outro lado, as saídas deste

elemento estão relacionadas com as exportações pelas culturas agrícolas, lixiviação, erosão, queimada e emissão de gases sulfurados. Em solos mal drenados (várzea), a forma menos oxidada de S ( $\text{H}_2\text{S}$  sulfeto – gás altamente volátil) é predominante e a redução do sulfato ocorre principalmente em condições de anaerobiose e na presença de substâncias doadoras de elétrons, como a matéria orgânica. O agente de tal reação é a bactéria anaeróbica *Desulfovibrio desulfuricans*. Por outro lado, em solos bem drenados e oxigenados a forma mais oxidada (sulfato – fonte para as plantas) é predominante e pode ser encontrada na solução do solo adsorvido a partículas de argila ou em complexos organominerais. O agente de oxidação são os *Thiobacillus* (MALAVOLTA, 2006; STIPP; CASARIN, 2010).

Processos bióticos e abióticos controlam as transformações de S no solo (Figura 1). As transformações bióticas estão relacionadas aos processos de mineralização, imobilização, oxi-redução e assimilação de S pela planta, enquanto as transformações abióticas acontecem em função dos processos de adsorção, dessorção, precipitação e dissolução do S inorgânico. Fatores como temperatura do solo, pH, umidade, quantidade e tipos de argilominerais, óxidos de ferro e alumínio, conteúdos de carbono e N tem importância relativa em cada processo citado anteriormente (NORMAN et al., 2002; STIPP; CASARIN, 2010).

A figura 1 apresenta o ciclo do S no solo de forma simplificada.



**Figura 1.** Ciclo simplificado do S no solo (Adaptado de VITTI; OTTO; SAVIETTO, 2015).

O ânion  $\text{SO}_4^{2-}$  é a forma mineral de S mais encontrada no solo e a principal absorvida pelas plantas em condições aeróbicas. Mas, solos argilosos com altos teores de óxidos de Fe e Al apresentam grande capacidade de adsorção de  $\text{SO}_4^{2-}$ , o que pode

reduzir sua movimentação no solo. Por outro lado, em solos arenosos o  $\text{SO}_4^{2-}$  pode ser perdido por percolação já que sua movimentação nesses solos é maior, geralmente por apresentarem baixo conteúdo de matéria orgânica e menor reservas de S orgânico (STIPP; CASARIN, 2010). Solos com teores de S inferiores a  $10 \text{ mg dm}^{-3}$  podem apresentar maiores repostas à adubação (FIORINI et al., 2016).

O uso intensivo dos solos visando altas produtividades e emprego constante de adubos concentrados em NPK com baixas concentrações de S (teor de S < 1 %) tem contribuído para limitação da produção agrícola. Outros fatores também tem contribuído, como: baixos níveis de S em solos tropicais; baixa fertilidade e matéria orgânica do solo (teor de matéria orgânica < 2%); redução das reservas de S do solo, resultante das perdas de matéria orgânica por mineralização e erosão; excesso de calagem, que pode deslocar os íons sulfato no perfil pelo aumento de cargas negativas no complexo de troca do solo; redução do uso de pesticidas com S; e, aumento de exportação de nutrientes pelas culturas (RHEINHEIMER et al., 2005; SALES, 2007; STIPP; CASARIN, 2010; FIORINI et al., 2016).

### **2.3.2. Enxofre na cultura da cana-de-açúcar**

O enxofre (S) juntamente com o nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K) é um nutriente-chave com grande importância ao desenvolvimento das plantas. O S participa de vários compostos, como aminoácidos, proteínas, coenzimas, sulfolipídeos, flavonóides, lipídeos, glucosinolatos, polissacarídeos, compostos não saturados, sulfóxidos, alcalóides, nucleotídeos, compostos reduzidos e entre outros. Aliado ao N o S faz parte de todas as funções e processos que são parte da vida da planta, da absorção iônica aos papéis de RNA e DNA, além de controle hormonal para crescimento e diferenciação celular (STIPP; CASARIN, 2010; FIORINI et al., 2016).

Para que seja absorvido pela planta, o S aplicado via solo deve ser transportado até a superfície das células da raiz. A extração do íon da solução do solo e a taxa de transpiração determinam a quantidade transportada via fluxo de massa, principal mecanismo de absorção do S (SILVA et al., 1998).

O suprimento adequado de S aos vegetais aumenta a utilização de N na síntese proteica (Rubisco), elevando o índice fotossintético das folhas e a produção da cultura (SILVA et al., 2003). As quantidades de S extraídos pelos vegetais superiores são variáveis, de 0,02% a 1,8% na matéria seca e de acordo com Orlando Filho (1993), para uma produção de  $100 \text{ t ha}^{-1}$  de cana-de-açúcar, a extração de S pode chegar a 44 kg.

Segundo Rajj et al. (1997), os níveis adequados de S foliar para cana-de-açúcar podem variar de 3-5 g kg<sup>-1</sup>. O suprimento adequado de S eleva a produção de colmos e o teor de sacarose da cana-de-açúcar (MALAVOLTA; MORAES, 2007; STIPP; CASARIN, 2010; VITTI; OTTO; SAVIETTO, 2015).

Por ser um elemento relativamente imóvel na planta, o S apresenta sintomas visuais de deficiência inicialmente nas partes mais novas, com clorose (amarelecimento) nas folhas novas em toda extensão do limbo foliar. Em estágios mais avançados, além da clorose, a deficiência ocasiona colmos mais curtos e crescimento reduzido à cana-de-açúcar (VITTI; OTTO; SAVIETTO, 2015). Sua deficiência se assemelha ao do N pelo fato de exercerem funções similares na planta (LAVRES JÚNIOR et al., 2008), inibindo a redução de N-NO<sup>3</sup>, o que pode diminuir o aproveitamento de N e em níveis extremos de deficiência reduzir a formação de clorofila (DIAS et al., 2017).

A importância do S para cana-de-açúcar tem sido abordada há algum tempo, mas de modo geral, este nutriente tem sido negligenciado em estudos que envolvem a adubação e nutrição da cultura (BOLOGNA-CAMPBELL, 2007).

### **2.3.3. Fontes de Enxofre**

Como o S é livre na natureza, sua ocorrência se dá principalmente em depósitos vulcânicos ou sedimentares e encontra-se nos carvões, petróleos (diesel S550) e gás natural sob forma de compostos orgânicos. O S é matéria-prima utilizada largamente na agricultura brasileira, que consome 53% da produção, seguida das indústrias químicas com 47%. Cerca de 70 a 80% da produção está relacionada diretamente à produção de ácido sulfúrico (ácido fosfórico e fertilizantes), indústria química, metalúrgica, papel, celulose, açucareira e outros como indústria de borracha, inseticidas, fungicidas, detergentes, corantes e etc (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2009b; STIPP; CASARIN, 2010).

Em torno de 69 milhões de toneladas de S são produzidas anualmente no mundo, em todas as suas formas para serem consumidos pela indústria mundial. Os maiores países exportadores do mundo são (por ordem decrescente): o Canadá, Rússia, Arábia Saudita, Emirados Árabes Unidos, Cazaquistão, Japão e Irã, representando mais de 70% da produção mundial. Como principais países importadores, temos a China, Marrocos, os EUA, a Tunísia, a Índia e o Brasil. Nos últimos 30 anos, de 1978 a 2007, o consumo aparente de enxofre no Brasil praticamente quadruplicou e os índices anuais de dependência (importações divididas pelo consumo aparente) são sempre superiores a

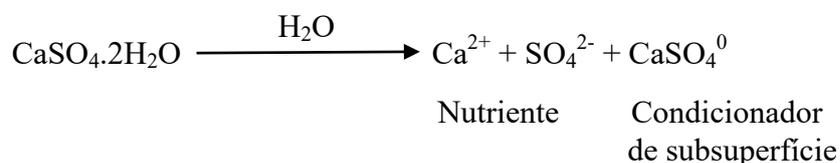
80% já que o país detém apenas 1,2% das reservas mundiais (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2009b).

A produção brasileira de enxofre provém basicamente de três fontes: coproduto na produção de xisto betuminoso; na recuperação do gás natural e do residual das refinarias de petróleo; e, no processo de sulfetos metálicos transformado em ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>). Apesar disso, o enxofre obtido como subproduto das metalúrgicas de diferentes metais, do petróleo e do xisto betuminoso, ainda não são suficientes para atender às necessidades do consumo brasileiro. As condições geológicas brasileiras para a ocorrência de novas jazidas são consideradas baixas, entretanto, a obtenção de S a partir de outras fontes parece estar se ampliando. A distribuição de combustível mais limpo ao reduzir o teor mínimo de S do diesel e a instalação de novos empreendimentos minerais com beneficiamento de metais associados à obtenção de ácido sulfúrico fazem parte deste processo (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2009b; PETROBRAS, 2009).

O enxofre obtido à partir do petróleo representa hoje somente 28% da produção brasileira, o que equivale apenas a 5% do consumo aparente. Como dito anteriormente, seu uso mais importante e preponderante é na indústria de fertilizantes, o que vale afirmar que é um elo indispensável da cadeia do NPK e um integrante constitutivo dos produtos finais fertilizantes utilizados pelos agricultores brasileiros (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2009b).

As fontes mais comuns de S têm o elemento na forma de sulfato como: sulfato de amônio, superfosfato simples, sulfato de cálcio (gesso), sulfato de potássio e outras combinações, especialmente de fertilizantes nitrogenados.

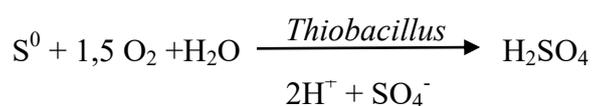
O gesso natural (gipsita, com 15% de S) e o gesso agrícola (resultado do tratamento da rocha fosfática com ácido sulfúrico), fonte tradicional de S para as culturas, é um sal neutro e tem como função diminuir a saturação por Al e aumentar os teores de Ca e S em profundidade, melhorando o condicionamento do solo e favorecendo o desenvolvimento das plantas. O gesso agrícola apresenta vantagem de ter o sulfato ligado ao Ca, o que facilita sua mobilidade no perfil do solo, conforme equação abaixo (VITTI; OTTO; SAVIETTO, 2015):



O gesso ao ser dissociado libera íons  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{SO}_4^{-2}$  na solução do solo e por isso é recomendado para solos que apresentam baixos teores de Ca e S. Aproximadamente 40% do total de Ca solúvel está presente como  $\text{SO}_4^{-2}$ , o que o torna potencialmente móvel no solo em profundidade, melhorando a fertilidade e aumentando a exploração das raízes. Em função dessas características, o gesso favorece a melhor absorção de água e nutrientes, propiciando uma maior tolerância das plantas aos veranicos (RAIJ, 2011; ROSSETTO; SANTIAGO, 2011; SOARES, 2016).

Outra fonte muito utilizada em alguns países e que recentemente tem despertado interesse no Brasil é o S elementar ( $\text{S}^0$ ), com um consumo de cerca de 1,6 milhão de toneladas anuais, sendo 90% desse total proveniente de importação, resultado da pequena produção nacional. As alternativas para o uso de  $\text{S}^0$  no solo são: S pastilha; S incorporado em grânulos fosfatados e S revestindo ureia, MAP e SFT. Esta fonte na forma granulada (pastilhas), finamente moída e biodegradável se destaca dos sais de sulfato por apresentar baixa solubilidade e maior concentração de S (>85%) comparada com 12% do superfosfato simples e 24% do sulfato de amônio. Porém, a disponibilização do S proveniente desta fonte depende da oxidação do  $\text{S}^0$  a sulfato, realizada principalmente por microrganismos do solo (CANTARELLA et al., 2007; STIPP; CASARIN, 2010; DIAS et al., 2017).

De acordo com Vitti; Otto; Savietto (2015), a reação de oxidação do S-elementar no solo, ocorre da seguinte forma:



Para que o  $\text{S}^0$  possa se tornar disponível para as plantas, deve ser oxidado a S-sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), forma que as plantas absorvem este nutriente. Essa oxidação é proveniente, principalmente de microrganismos específicos do solo, que estão relacionados com o teor de matéria orgânica. Mas, esse processo de oxidação depende de várias condições ambientais propícias para que se obtenha maior eficiência na adubação como:

- Temperatura: maiores taxas de oxidação ocorrem entre 30 °C e 40 °C;
- Umidade e aeração: taxas máximas ocorrem perto da capacidade de campo.

Em condições de baixa umidade a taxa de oxidação é limitada pela insuficiência de água

para a atividade microbiana e em alta umidade pode ser inadequada para atividade microbiana;

- Textura do solo e matéria orgânica: a tendência de oxidação aumenta quanto maior o teor de argila e matéria orgânica. Mas, a oxidação é mais dependente do teor de matéria orgânica do que da textura, em função de seu uso como fonte de energia para os microrganismos;

- Valores de pH: a oxidação aumenta à medida que aumenta o pH do solo (a velocidade de oxidação é maior em solos com pH próximo a 6,0);

- Presença de outros nutrientes: em solos mais férteis a oxidação do S pode ser maior em função da manutenção da população microbiana;

- Grânulometria: partículas de fertilizantes de tamanho inferior a 0,15 mm apresentam rápida oxidação do S<sup>0</sup>. A taxa de oxidação aumenta de acordo com a redução do tamanho de partícula, pois quanto menor o tamanho da partícula do adubo, maior será a área superficial das partículas;

- Superfície da partícula do adubo: a oxidação depende da superfície específica em função da exposição à atividade microbiana. Fontes pastilhadas são mais eficientes do que formas esféricas ou em blocos por causa de sua maior superfície específica;

- Dose de aplicação: taxa de oxidação varia de acordo com a dose;

- Dispersão do S<sup>0</sup> no solo: a inadequada dispersão das partículas de S em função do acúmulo excessivo do produto aliado ao caráter hidrofóbico das partículas pode reduzir a taxa de oxidação (JANZEN; BETTANY, 1987; CHIEN et al., 1988; GERMIDA; JANZEN, 1993; COWELL; SCHOENAU, 1995; HOROWITZ; MEURER, 2007; STIPP; CASARIN, 2010; VITTI; OTTO; SAVIETO, 2015; FIORINI et al., 2016).

A forma mais comum e eficiente de aplicação dos produtos com S<sup>0</sup> é sua associação com bentonita (granulado), já que a aplicação de S<sup>0</sup> na forma de pó, a campo, é difícil. A grande vantagem na utilização de argila expansiva é que quando fundida nas partículas do S<sup>0</sup>, seu volume aumenta em torno de 20 vezes em contato com a umidade do solo, favorecendo a exposição de grande área superficial das partículas finas de S<sup>0</sup> a atividade microbiana e conseqüentemente oxidação e disponibilização de S para as plantas (BOSWELL; SWANNEY; OWERS, 1988; TISDALE et al., 1993; VITTI; OTTO; SAVIETO, 2015; CÉSAR, 2016).

Nos últimos anos tem crescido o número de produtos no mercado incorporados com S<sup>0</sup> (fertilizantes nitrogenados e fosfatados), já que sua incorporação é uma

alternativa para aumentar a concentração de S aos fertilizantes minerais. O enriquecimento de fertilizantes fosfatados com S consiste em sua mistura no processo de granulação, aumentando o conteúdo de S no fertilizante sem reduzir os teores de P (VITTI; OTTO; SAVIETO, 2015). A associação de S também pode aumentar a eficiência de fosfatos complexos, ou seja, fosfatos acidulado e natural no mesmo grânulo (CÉSAR, 2016; SANDIM, 2016).

Alguns estudos verificaram que a mistura física de  $S^0$  com fertilizantes fosfatados aplicados na forma de pó ou farelada apresentaram resultados satisfatórios em áreas de pastagem, mas houve evidência de que a oxidação do S não gerou acidez suficiente para solubilização do fosfato de rocha (KITAMS; ATTOE, 1965; EVANS; MCDONALD; PRICE, 2006; EVANS; PRICE, 2009). Segundo os autores, para aumento de eficiência de fosfatos de rocha principalmente em solos ácidos ( $pH < 4,5$ ), faz-se necessário o tratamento dos fosfatos com  $S^0$ . Begum et al. (2004), avaliaram a associação de fosfato acidulado (SFT e MAP) com fosfato natural da Índia +  $S^0$  em solo alcalino ( $pH 8,5$  em  $H_2O$ ) com plantio de trigo. Os autores verificaram que o S favoreceu a solubilização do fosfato natural e esses tratamentos apresentaram resultados semelhantes a fonte padrão utilizada (MAP), com rendimento de até 80% na produção de grãos.

Nesse sentido, tem-se desenvolvido produtos a partir do  $S_0$  já os fertilizantes simples utilizados contêm ou não baixas concentrações de S em sua composição, aliado as questões logísticas e aos constantes aumentos nos preços do gesso agrícola, principal fonte de enxofre (CHIEN et al., 2011; VITTI; OTTO; SAVIETO, 2015; CÉSAR, 2016; SANDIM, 2016). Apesar disso, ainda há necessidade de mais estudos com intuito de avaliar o uso e eficiência de  $S^0$  quando misturado ou incorporado a fertilizantes fosfatados em diferentes tipos de solo e condições ambientais (ZHAO et al., 1996; HOROWITZ; MEURER, 2006; STIPP; CASARIN, 2010).

## REFERÊNCIAS

- ALBULQUERQUE, G. A. C.; MARINHO, M. L.; ARAÚJO FILHO, J. T. Competição de fontes de fósforo em cana-de-açúcar. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL. 1979. **Anais...** Maceió-AL: STAB, 1980. v. 2, p. 319-322.
- ALEXANDER, A. G. **Sugarcane physiology: a comprehensive study of the *Saccharum* souce-to-sink system.** Amsterdam: Elsevier, 1973. 752p.
- ALFONSI, R. R.; PEDRO, J. M. J.; BRUNIN, O.; BARBIERI, V. Condições climáticas para a cana-de-açúcar. In: PARANHOS, S. B. (Ed.). **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização.** 1. ed. Campinas: Fundação Cargill, 1987. v. 1, p. 42-55.
- ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA DIFUSÃO DE ADUBOS – ANDA. **Anuário estatístico do setor de fertilizantes 2018.** São Paulo. Disponível em: <(http://www.anda.org.br)> Acesso em: 07 ago. 2018.
- BANCO MUNDIAL. **Awakening Africa's Sleeping Giant, Prospects for Commercial Agriculture in the Guinea Savannah Zone and Beyond 2009.** New York. The International Bank for Reconstruction and Development: The World Bank, 2009. 236p.
- BARBOSA FILHO, M. A.; KINJO, T.; MURAOKA, T. Relações entre fósforo "extraível", frações inorgânicas de fósforo e crescimento do arroz em função de fontes de fósforo, calagem e tempo de incubação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 11, p. 147-55, 1987.
- BOLOGNA-CAMPBELL, I. **Balanco de nitrogênio e enxofre no sistema solo-cana-de-açúcar no ciclo de cana-planta.** 2007. 112f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2007.
- BOSWELL, C. C.; SWANNEY, B.; OWERS, W. R. Sulfur/sodium bentonite prills as sulfur fertilizers. 2. Effect of sulfur-sodium bentonite ratios on the availability of sulfur to pasture plants in the field. **Fertilizer Research**, v. 15, p. 33-46, 1988.  
<https://doi.org/10.1007/BF01049184>
- BRAITHWAITE, A. C.; EATON, A. C.; GROOM, P. S. Factors affecting the solubility of phosphate rock residues in 2% citric acid and 2% formic acid. **Fertilizer research**, v. 23, p. 37-42. 1990.  
<https://doi.org/10.1007/BF02656130>
- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Anuário estatístico da agroenergia 2014.** Brasília, 2014. 206p. (Boletim Técnico nº1).
- CAIONE, G. **Avaliação de fontes de fósforo no desenvolvimento, produtividade e composição bromatológica de cana-de-açúcar.** 2011. 74f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2011.

CALHEIROS, A. S.; OLIVEIRA, M. W.; FERREIRA, V. M.; BARBOSA, G. V. S.; LIMA, G. S. A.; ARISTIDES, E.V.S. Acúmulo de nutrientes e produção de sacarose de duas variedades de cana-de-açúcar na primeira rebrota, em função de doses de fósforo. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 29, n. 1, p. 26-29, 2011.

CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P. C. O.; VITTI, A. C.; Nitrogênio e enxofre na cultura da cana-de-açúcar. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S.; VITTI, G. C.; (Ed.). **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira**. Piracicaba: IPNI, 2007. p. 355-412.

CARMO, A. J. B. Fertilizantes e matérias-primas: preços, produção e consumo de 1980 e 1985. **Fertilizantes**, v. 8, n. 2, p. 1-5, 1986.

CÉSAR, F. R. C. F. **Eficiência agrônômica de misturas no mesmo grânulo de fosfatos acidulados, fosfatos naturais e enxofre elementar**. 2016. 136f. (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

CHIEN, S. H.; FRIESEN, D. K.; HAMILTON, B. W. Effect of application method on availability of elemental sulfur in cropping sequences. **Soil Science Society of American Journal**, v. 52, p. 165-169, 1988.  
<https://doi.org/10.2136/sssaj1988.03615995005200010029x>

CHIEN, S. H.; MENON, R. G.; BILLINGHAM, K. S. Phosphorus availability from phosphate rock as enhanced by water-soluble phosphorus. **Soil Science Society of America Journal**, v. 60, p. 1173-1177, 1996.  
<https://doi.org/10.2136/sssaj1996.03615995006000040031x>

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira: cana-de-açúcar, terceiro levantamento, dezembro/2017** - Companhia Nacional de Abastecimento. – Brasília: Conab 2018.

COWELL, L. E.; SCHOENAU, J. J. Stimulation of elemental sulfur oxidation by sewage sludge. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 75, p. 247-249, 1995.  
<https://doi.org/10.4141/cjss95-035>

DIAS, K. G. L. **Fontes e doses de foto do cafeeiro: produtividade, dinâmica de nutrientes no solo e nutrição mineral de plantas**. 2012, 90f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

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

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Aspectos relacionados ao manejo da adubação fosfatada em solos do cerrado**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2007. 32p.

ESTÉVES, A. A. Fisiologia de la caña de azucar. In: OSORIO C. E. B. (Ed.). **El cultivo de la caña de azucar**. Cali: Tecniacana, 1986. p. 27-41.

EVANS, J.; MCDONALD, L.; PRICE, A. Application of reactive phosphate rock and sulfur fertilizers to enhance the availability of soil phosphate in organic farming. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 75, p. 233-246, 2006.  
<https://doi.org/10.1007/s10705-006-9030-1>

EVANS, J.; PRICE, A. Influence of rates of reactive phosphate rock and Sulphur on potentially available phosphorus in organically managed soils in the south-eastern near-Mediterranean cropping region of Australia. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v.84, p.105-118, 2009.  
<https://doi.org/10.1007/s10705-008-9230-y>

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Relatório Anual da Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura** – FAO. New York, 2013.

FIORINI, I. V. A.; PINHO, R. G. V.; PIRES, L. P. M.; SANTOS, À. O.; FIORINI, F. V. A.; CANCELLIER, L. L.; RESENDE, E. L. Avaliação de fontes de enxofre e das formas de micronutrientes revestindo o npk na cultura do milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 15, n. 1, p. 20-29, 2016.  
<https://doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v15n1p20-29>

FRANZINI, V. I.; MURAOKA, T.; CORASPE-LEON, H. M.; MENDES, F. L. Eficiência de fosfato natural reativo aplicado em misturas com superfosfato triplo em milho e soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, p. 1092-1099, 2009.  
<https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009000900004>

GERMIDA, J. J.; JANZEN, H. H. Factors affecting the oxidation of elemental sulfur in soils. **Fertilizer Research**, v. 35, p. 101-114, 1993.  
<https://doi.org/10.1007/BF00750224>

GOEDERT, W. J.; SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. Fósforo. In: GOEDERT, W. J. (Ed.). **Solos dos cerrados: tecnologias e estratégias de manejo**. São Paulo: Nobel, 1986. p. 129-166.

GOEDERT, W. J.; SOUSA, D. M. G. Uso eficiente de fertilizantes fosfatados. In: SIMPÓSIO SOBRE FERTILIZANTES NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 1., 1984, Brasília. **Anais...** Brasília: Embrapa-DEP, 1984. p. 255-289. (Embrapa-DEP. Documentos, 14).

GOMES, J. F. F. **Produção de colmos e exportação de macronutrientes primários por cultivares de cana-de-açúcar (*saccharum spp.*)**. 2003. 75f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

HINSINGER, P. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. **Plant and Soil**, Crawley, v. 237, p. 173-195, 2001.  
<https://doi.org/10.1023/A:1013351617532>

- HOROWITZ, N.; MEURER, E. J. Eficiência agronômica de fosfatos naturais. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (Ed.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba, POTAFOS, 2004. p. 665-682.
- HOROWITZ, N.; MEURER, E. J. Relação entre atributos de solos e oxidação de enxofre elementar em quarenta e duas amostras de solos do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 3, p. 455-463, 2007.
- IFA - International Fertilizer Industry Association (IFA). **Report**. Paris, France, 2018. Disponível em: <www.fertilizer.org> Acesso em: 10 jan. 2018.
- JANZEN, H. H.; BETTANY, J. R. Measurement of sulfur oxidation in soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 143, p. 444- 452, 1987.  
<https://doi.org/10.1097/00010694-198706000-00008>
- KITTAMS, H. H.; ATTOE, O. J. Availability of phosphorus in rock phosphate-sulfur infusions. **Agronomy Journal**, v. 57, p. 331-334, 1965.  
<https://doi.org/10.2134/agronj1965.00021962005700040006x>
- KORNDÖRFER, G. H. A importância da adubação na qualidade da cana-de-açúcar: SÁ, M. E. de; BUZZETI, S. (Org.). **Importância da adubação na qualidade dos produtos agrícolas**. São Paulo: Ícone, 1994. cap. 7, p. 133-142.
- KORNDÖRFER, G. H. Fósforo na cultura da cana-de-açúcar. In: SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 1., 2004. São Pedro. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 2004. p. 291-305.
- KORNDÖRFER, G. H.; CABEZAS, W. A. L.; HOROWITZ, N. Eficiência agronômica de fosfatos naturais na cultura do milho. **Scientia Agricola**, São Paulo, v. 56, n. 2, p. 32-39, 1999.
- KORNDÖRFER, G. H.; MELO, S. P. Fontes de fósforo (fluida ou sólida) na produtividade agrícola e industrial da cana-de-açúcar. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 33, p. 92-97. 2009.
- LOPES, A. S. **Manual de fertilidade do solo**. Piracicaba: ANDA/POTAFÓS, 1989. 153p.
- LOPES, A. S.; SILVA, C. A. P.; BASTOS, A. R. R. Reservas de fosfatos e produção de fertilizantes fosfatados no Brasil e no mundo. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S (ed.). SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA, 2004, São Pedro-SP. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do fosfato. 2004. p. 11-34.
- 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.

MAHADEVAIAH, M. S.; KUMAR, Y.; GALIL, M. S. A.; SURESHA, M. S.; SATHISH, M. A.; NAGENDRAPPA, G. A simple spectrophotometric determination of phosphate in sugarcane juices, water and detergent samples. **E-Journal of Chemistry**, Daves, v. 4, p. 467-473, 2007.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 631p.

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

MALAVOLTA, E.; ALCARDE, J. C. Adequação da legislação sobre fosfato às tecnologias visando o aproveitamento de fosfatos brasileiros na produção de fertilizantes. In: ENCONTRO NACIONAL DE ROCHA FOSFÁTICA, 3., Brasília, 1986. **Anais...** Brasília: IBRAFOS, 1986. p. 177-198.

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

MEURER, E. J. **Fundamentos de química do solo**. Porto Alegre, Evangraf, 2010. 4ª ed. 266p.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Secretaria de Geologia, Mineiração e Transformação Mineral. Relatório Técnico: **Perfil do Fosfato**. Banco Mundial, J.Mendo Consultoria, Yara Kulaif. 2009a. 55p.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Secretaria de Geologia, Mineiração e Transformação Mineral. Relatório Técnico: **Perfil do Enxofre**. Banco Mundial, J.Mendo Consultoria, Yara Kulaif. 2009b. 44p.

NACHTIGALL, G. R.; BRAUNER, J. L.; ZOLEZZI, M.; TAPIA, F. Mistura de superfosfato triplo com fosfato de Jacupiranga no mesmo grânulo na eficiência do fosfato natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 13, p. 269-273, 1989.

NAHAS, E.; ASSIS, L. C. Efeito da adição ao solo de fosfato solúvel obtido por via microbiológica a partir de fluorapatita. **Revista Latinoamericana de Microbiologia**, México, v. 33, n. 2/3, p. 225-229, 1991.

NASCIMENTO, C. A. C. **Frações de fósforo no solo e aproveitamento de fosfatos pela cana-de-açúcar**. 2016. 77f. (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

NICCHIO, B. **Eficiência agrônômica de fontes alternativas de fósforo**. 2014. 109f. (Mestrado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

NORMAN, A. L.; GIESEMANN, A.; KROUSE, H. R.; JÄGER, H. J. Sulphur isotope fractionation during Sulphur mineralization: results of an incubation-extraction experiment with a Black Forest soil. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 34, p. 1425-1438, 2002. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(02\)00086-X](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00086-X)

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2007. p. 471-550.

OLIVEIRA JUNIOR, A. **Eficiência agronômica de fosfatos de rocha, utilizados isoladamente ou associados ao superfosfato triplo, para a cultura da soja**. 2007. 123f. (Doutorado – Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

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

PEREIRA, J. R.; FARIA, C. M. B.; MORGADO, L. B. Efeito de níveis e do resíduo de fósforo sobre a produtividade da cana-de-açúcar em vertissolo. **Pes. Agropec. Bra.**, Brasília, v. 30, v. 1, p. 43-48, 1995.

PERES, C. E. B. **Eficiência agronômica de fontes de fósforo e micronutrientes sobre a produtividade e qualidade tecnológica em soqueira de cana-de-açúcar**. 2014. 116f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos, Universidade de São Paulo, Pirassununga, 2014.

PETROBRAS. **Petrobrás, produtos e serviços**. Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <<http://www2.petrobras.com.br/minisite/refinarias/portugues/index.asp>>. Acesso em 10 jan. 2018.

PINTO, F. A. **Sorção e dessorção de fósforo em solos de Cerrado**. 2012. 46f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Campus Jataí, 2012.

PRADO, H. Ambientes de produção de cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil. Potafós, Piracicaba. **Informações Agronômicas**, n. 110, p. 13-17, 2005.

PROCHNOW, L. I.; ALCARDE, J. C.; CHIEN, S. H. Eficiência agronômica dos fosfatos totalmente acidulados. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. e (Ed.). **Fósforo na Agricultura Brasileira**, Piracicaba, SP: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. 2004. p. 605-651.

RAIJ, B. Van. **Fertilidade do solo e adubação**. São Paulo: Ed. Agronômica Ceres, 1991. 343p.

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

RAJAN, S. S. S.; WATKINSON, H.; SINCLAIR, A. G. Phosphate rocks for direct application to soils. **Advances in Agronomy**, v. 57, p. 77-159, 1996.

RAMOS, L. A. **Resíduos orgânicos e fertilizantes minerais na cultura da cana-de-açúcar e alterações nas características químicas do solo**. 2013. 90f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Programa de Pós Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2013.

RHEINHEIMER, D. S.; ALVAREZ, J. W. R.; FILHO, B. D. O.; SILVA, L. S.; BORTOLUZZI, E. C. Resposta de culturas à aplicação de enxofre e a teores de sulfato num solo de textura arenosa sob plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 3, p. 562-569, 2005.

<https://doi.org/10.1590/S0103-84782005000300011>

RIEDER, J. H. Destinação racional dos jazimentos fosfáticos nacionais. In: ENCONTRO NACIONAL DE ROCHA FOSFÁTICA, 3. Brasília, DF, 1986. **Anais...** São Paulo IBRAFOS, 1986. p.139-72.

RODELLA, A. A.; MARTINS, M. Efeitos de fontes e formas de aplicação de fósforo na produtividade da cana-de-açúcar, em cana planta. **Álcool e Açúcar**, Piracicaba, v. 45, n. 8, p. 26-30, 1988.

ROSSETTO, R.; SANTIAGO, A. D. **Gessagem**. EMBRAPA: Agência de Informação Tecnológica – AGEITEC. 2011. Disponível em: <[https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01\\_35\\_711200516717.html](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_35_711200516717.html)> Acesso em: 05 ago. 2018.

SAIK, R. D. The evolution of a sulphur bentonite fertilizer: one company's perspective. **Sulphur in Agriculture**, Washington, v.19, p.74-77, 1995.

SALES, H. B. **Importância do enxofre para a cultura da soja**. Manab, 2007. (Divulgação Técnica, n. 174).

SANDIM, A. S. **Solubilidade, efeito residual e eficiência agronômica de fontes alternativas de fosfatos**. 2016. 150f. (Doutorado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botocatu, 2016.

SANTOS, G. A. **Silício na produção de cana-de-açúcar**. 2017. 111f. (Doutorado em Agronomia) – Programa de Pós Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

SANTOS, H. Q.; FONSECA, D. M.; CANTARUTTI, R. B.; ALVAREZ, V. H.; NASCIMENTO JÚNIOR, D. Níveis críticos de fósforo no solo e na planta para gramíneas forrageiras tropicais, em diferentes idades. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 1, p. 173-182, 2002.

SARMENTO, P.; CORSI, M.; CAMPOS, F. P. Eficiência do fosfato natural de Gafsa associado à calagem e gesso e sintomas nutricionais da alfafa, *Medicago sativa* L. **Acta Scientiarum**, v. 24, n. 4, p. 1155-1161, 2002.

SILVA, D. J.; ALVAREZ, V. H.; RUIZ, H. A. Fluxo de massa e difusão de enxofre para raízes de milho em solos ácidos de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 22, n. 1, p. 109-114, 1998.

SILVA, D. J.; VENEGAS, V. H. A.; RUIZ, H. A.; SANT'ANNA, R. Translocação e redistribuição de enxofre em plantas de milho e de soja. **Pesquisa Agropecuária**

**Brasileira**, Brasília, DF, v. 38, n. 6, p. 715-721, 2003. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2003000600007>

SILVA, J. A.; SILVA, F. L. H.; ALVES, R. N. N.; SANTANA, D. P. Influência das variáveis nitrogênio, fósforo e o Brix na produção dos metabólitos secundários contaminantes totais da fermentação alcoólica. **Química Nova**, São Paulo, v. 29, n. 4, p. 695-698, 2006.

<https://doi.org/10.1590/S0100-40422006000400013>

SILVA, T. W. S. **Efeito residual de doses de fósforo no crescimento, produção e atributos tecnológicos da cana-de-açúcar**. 2011. 35f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) - Universidade Federal da Paraíba, Areia – PB. 2011.

SOARES, G. F. **Gesso e Fósforo na Sucessão Soja/Milho Safrinha 2016**. 74 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Jataí, 2016.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Adubação fosfatada em solos da região do Cerrado**. Informações Agronômicas, Piracicaba, n.102, p.1-16, 2003. (Encarte técnico).  
SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2002. 416 p.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E.; REIN, A. T. Adubação fosfatada. In: SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília: Embrapa Cerrados, 2004. p. 147-168.

SOUSA, R. T. X. **Fertilizante organomineral para a produção de cana-de-açúcar**. 2014. 81f. Tese (Doutorado em Agronomia/Fitotecnia) – Instituto de Ciências agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

SOUSA, R. T. X. **Fertilizantes fosfatados para cana-de-açúcar aplicados em pré-plantio (fosfatagem)**. 2011, 40f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Instituto de Ciências agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, 2011.

STAUFFER, M. D.; SULEWSKI, G. Fósforo – essencial para a vida. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (Ed.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba: Potafós/Anda, 2004. p. 1-11.

STIPP, S. R.; CASARIN, V. A importância do enxofre na agricultura brasileira. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 129, p. 14-20, 2010.

STUPIELLO, J. P. A cana-de-açúcar como matéria-prima. In: FUNDAÇÃO CARGILL. **Cana-de-açúcar: cultivo e utilização**. v. 2. Campinas, 1987.

TEIXEIRA, W. G.; SOUSA, R. T. X.; KORNDÖRFER, G. H. Resposta da cana-de-açúcar a doses de fósforo fornecidas por fertilizante organomineral. **Biosci. J.**, Uberlândia, v. 30, n. 6, p. 1729-1736, 2014.

TISDALE, S. L.; NELSON, W. L.; BEATON, J. D.; HAVLIN, J. L. Soil and fertilizer sulfur, calcium and magnesium. In: **Soil fertility and fertilizers**. 5ed. New York: MacMillan, 1993. p. 266-303.

VITTI, G. C.; OTTO, R.; SAVIETTO, J. Manejo do Enxofre na agricultura. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 152, p. 1-14, 2015.

VITTI, G. C.; WIT, A.; FERNANDES, B. E. P. Eficiência agronômica dos termofosfatos e fosfatos reativos naturais. In: SIMPÓSIO SOBRE FÓSFORO NA AGRICULTURA BRASILEIRA. 1., 2004, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: POTAFOS, 2004. p. 690-694.

WEBER, H.; BOLSANELLO, J.; AZEREDO, D. F. Doses e fontes de fósforo em cana-de-açúcar. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 5., 1993, Águas de São Pedro. **Anais...** Piracicaba: STAB, 1993. p. 70-75.

WILLIAMS, C. H. Reactions of surface-applied superphosphate with soil: II Movement of the phosphorus and sulphur into the soil. **Australian Journal of Soil Research**, v. 9, n. 1, p. 95-106, 1971.  
<https://doi.org/10.1071/SR9710095>

ZHAO, F. J.; LOKE, S. Y.; CROSLAND, A. R.; McGRATH, S. P. Method to determine elemental sulfur in soils applied to measure sulfur oxidation. **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 28, p. 1083-1087, 1996.  
[https://doi.org/10.1016/0038-0717\(96\)00073-9](https://doi.org/10.1016/0038-0717(96)00073-9)

**CAPÍTULO 2: AVALIAÇÃO DA MISTURA DE FOSFATOS ACIDULADOS,  
FOSFATOS NATURAIS E FONTES DE ENXOFRE APLICADOS EM SOLOS  
DE DIFERENTES TEXTURAS**

## RESUMO

NICCHIO, BRUNO NICCHIO. **Avaliação da mistura de fosfatos acidulados, fosfatos naturais e fontes de enxofre aplicados em solos de diferentes texturas.** 2018. 39f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia<sup>1</sup>.

Os solos brasileiros, no geral, apresentam baixos teores de fósforo (P) em função da natureza mineralógica dos solos, dos processos envolvendo este nutriente e da elevada extração por parte das culturas agrícolas. As fontes de P mais utilizadas são solúveis/aciduladas, porém, sua eficiência nos solos de cerrado pode ser reduzida. Já os fosfatos naturais apresentam baixa eficiência no momento da aplicação, mas com efeito residual maior de acordo com o material de origem da fonte. Desta maneira, pressupõe-se que a aplicação conjunta desses fosfatos poderia aumentar a eficiência em disponibilizar P no solo para as plantas. Além disso, a mistura de enxofre poderia aumentar a eficiência desses fosfatos. Nesse contexto, objetivou-se avaliar o efeito da aplicação de fosfatos acidulados, fosfatos naturais e fontes de enxofre em solos de diferentes texturas. Estudos de casa-de-vegetação foram conduzido em solos de textura argilosa, média e arenosa. Os tratamentos avaliados foram: testemunha, SFT, SFT + S<sup>0</sup>, SFT + Gesso, MAP + S<sup>0</sup>, MAP + Gesso, FNR Reativo + S<sup>0</sup>, FNR Bayóvar + Gesso, FN alta reatividade + SFT + S<sup>0</sup> e FN baixa reatividade + SFT + S<sup>0</sup>, aplicados na dose de 120 mg kg<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 40 mg kg<sup>-1</sup> de S, respectivamente. Os experimentos foram conduzidos por um período de 12 semanas e foram avaliados: altura e diâmetro de plantas, massa seca da parte aérea, concentração e acúmulo de P, S Ca e Mg na planta e pH, P, S Ca e Mg no solo. Os fertilizantes foram aplicados no volume total de 10 kg de solo por vaso antes do plantio de muda pré-brotada (MPB) de cana-de-açúcar (variedade RB 86-7515). A mistura de fertilizantes fosfatados e enxofre elementar (S<sup>0</sup>) foi mais eficiente em aumentar a massa seca e os teores de fósforo em solo de textura média. O fosfato natural de baixa reatividade incorporado com SFT e S<sup>0</sup> no grânulo e os fosfatos misturados com gesso foram mais eficientes em aumentar o enxofre acumulado em cana-de-açúcar e os teores de enxofre em solo de textura argilosa. O fosfato natural de alta reatividade incorporado com SFT e S<sup>0</sup> no grânulo e os fosfatos misturados com S<sup>0</sup> foram mais eficientes em aumentar os teores de fósforo em solo de textura arenosa.

**Palavras-chave:** casa-de-vegetação, fosfato reativo, SFT, enxofre elementar, gesso e *Saccharum spp.*

---

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

## ABSTRACT

NICCHIO, BRUNO NICCHIO. **Evaluation of the mixture of acidulated phosphates, natural phosphates and sulfur sources applied in soils of different textures.** 2018. 39p. Thesis (Doctorate's degree in Agronomy) - Federal University of Uberlândia<sup>1</sup>.

Brazilian soils, in general, present low levels of phosphorus (P) due to their mineralogical nature, the processes involving this nutrient and its high extraction by agricultural crops. The most used P sources are soluble/acidulated; however, their efficiency in Cerrado soils can be reduced. Natural phosphates present low efficiency at the moment of application, but with greater residual effect, according to the source material. Therefore, it is assumed that the joint application of these phosphates could increase the efficiency in providing P in the soil for the plants. In addition, mixing sulfur could increase the efficiency of these phosphates. In this context, this study evaluated the effect of the application of acidulated phosphates, natural phosphates and sulfur sources in soils of different textures. Greenhouse studies were conducted on clayey, medium and sandy texture soils. The treatments evaluated were: control, TSP, TSP + S<sup>0</sup>, TSP + Gypsum, MAP + S<sup>0</sup>, MAP + Gypsum, Reactive Bayovar Phosphate + S<sup>0</sup>, Reactive Bayovar Phosphate + Gypsum, high reactivity Natural Phosphate + TSP + S<sup>0</sup>, and low reactivity Natural Phosphate + TSP + S<sup>0</sup>, applied at a dose of 120 mg kg<sup>-1</sup> of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and 40 mg kg<sup>-1</sup> of S, respectively. Fertilizers were applied to the total volume of 10 kg of soil per pot before planting pre-sprouted sugarcane seedlings (variety RB 86-7515). The experiments were conducted for 12 weeks and plant height, diameter, and dry mass, concentration and accumulation of P, S, Ca and Mg in the plant and soil pH, P, S, Ca and Mg were evaluated. The mixture of phosphate fertilizers and elemental sulfur (S<sup>0</sup>) was more efficient in increasing dry mass and phosphorus content in medium texture soil. The low reactivity natural phosphate incorporated with SFT and S<sup>0</sup> in the granule and the phosphates mixed with gypsum were more efficient in increasing sulfur accumulated in sugarcane and sulfur contents in clayey soils. The high reactivity natural phosphate incorporated with SFT and S<sup>0</sup> in the granule and the phosphates mixed with S<sup>0</sup> were more efficient in increasing the phosphorus content in sandy soil.

**Keywords:** greenhouse, TSP, elemental sulfur, gypsum and *Saccharum* spp.

---

<sup>1</sup>Supervising committee: Gaspar Henrique Korndörfer – UFU (Supervisor) and Hamilton Seron Pereira – UFU (Co-supervisor).

## 1. INTRODUÇÃO

Os solos brasileiros, em geral, são altamente intemperizados, resultado de sua mineralogia e no cerrado, esses solos apresentam baixa fertilidade natural devido à alta acidez, baixa saturação por bases e disponibilidade de nutrientes, na qual o fósforo (P) se destaca. Além disso, a capacidade de adsorção de P faz com que a eficiência de absorção e utilização desse nutriente pelas plantas sejam mais baixas.

Deste modo, o uso de fontes que apresentem maior eficiência para disponibilizar P no solo é de suma importância. Os fosfatos solúveis (acidulados) ao serem aplicados no solo aumentam rapidamente o teor de P, porém, sua disponibilidade normalmente reduz ao longo do tempo devido aos processos de adsorção de P nestes solos. Os fosfatos naturais ou reativos, apresentam menor eficiência no ano de aplicação em função das quantidades mais baixas de P solúvel.

De acordo com Novais; Smyth (1999), o ideal seria ter um produto com solubilidade intermediária, entre fosfatos naturais de baixa reatividade e fosfatos acidulados de liberação rápida de P para o meio. Uma maneira de aumentar essa solubilidade seria a aplicação conjunta de fosfato natural e acidulado no mesmo grânulo, o que poderia auxiliar a solubilização do fosfato natural através da acidez gerada pela hidrólise do fosfato acidulado. Mas a rápida dissolução do fosfato solúvel poderia não solubilizar o fosfato natural. Com isso, a adição de enxofre elementar ( $S^0$ ), é uma possível forma de aumentar a eficiência dessa associação, em função da acidez gerada através do processo de oxidação do enxofre elementar ( $S^0$ ) a sulfato ( $SO_4^{2-}$ ). Além disso, esta associação aumentaria a disponibilização de S no solo para as plantas (VITTI; OTTO; SAVIETO, 2015; CÉSAR, 2016).

Deste modo a mistura de fontes de P com fontes de S poderia aumentar a eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados na disponibilização de nutrientes ao solo. Além disso, a incorporação de fosfato acidulado e enxofre elementar a fosfatos naturais poderia aumentar sua eficiência agrônômica. Portanto, este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito agrônômico da mistura de fosfatos acidulados, fosfatos naturais e fontes de enxofre aplicados em solos de cerrado de diferentes texturas.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Descrição das fontes de fósforo e enxofre

Para este trabalho foram utilizadas cinco fontes de fósforo, sendo três fontes comerciais: superfosfato triplo (SFT); monoamônio fosfato (MAP); fosfato natural reativo (FNR) Bayóvar (Sechura – Peru) e dois fosfatos naturais (baixa e alta reatividade), ainda em fase de testes.

Para examinar as hipóteses deste ensaio o SFT, MAP e FNR Bayóvar foram misturados com gesso agrícola e também com enxofre elementar (S<sup>0</sup>) pastilhado (nome comercial Sulfurgran<sup>®</sup>) antes de serem aplicados no solo. Além disso, utilizou-se o fosfato natural (FN) de baixa reatividade + SFT + S<sup>0</sup>, que é um fertilizante mineral complexo granulado, fabricado com rocha fosfática Catalão, SFT e S<sup>0</sup> incorporados ao grânulo. O FN de alta reatividade + SFT + S<sup>0</sup>, é um fertilizante mineral complexo granulado, fabricado com rocha fosfática Bayóvar, SFT e S<sup>0</sup> incorporados ao grânulo. Ambos os fosfatos apresentam relação P:S de 2:1 e com 5% de bentonita. As principais descrições químicas das fontes de fósforo e enxofre utilizadas neste estudo encontram-se na Tabela 1.

**Tabela 1.** Caracterização das fontes de P e S, com relação aos teores de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> total, em H<sub>2</sub>O, em CNA+H<sub>2</sub>O e em ÁC<sup>2</sup> 1:100 e Ca, Mg e S.

Fonte de P e S	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		Ca	N	S
	CNA <sup>1</sup> +H <sub>2</sub> O	ÁC <sup>2</sup> 1:100			
	----- % -----				
SFT	41	-	46	13	-
MAP	48	-	52	12	10
FNR Bayóvar	-	14	29	32	-
FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup>	21	-	21	17	-
FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup>	19	7	19	17	-
Gesso	-	-	-	17	-
Enxofre Elementar (S <sup>0</sup> ) Pastilha <sup>†</sup>	-	-	-	-	90

<sup>1</sup>CNA = citrato neutro de amônio; <sup>2</sup>ÁC = Ácido Cítrico a 2%; <sup>†</sup>9,5% de bentonita em p/p do produto final.

Os fertilizantes fosfatados e gesso agrícola utilizados neste experimento foram fornecidas pela empresa Vale Fertilizantes, Mosaic S/A. A rocha de Catalão (Goiás), matéria-prima do FN de baixa reatividade é de origem ígnea, resultantes da solidificação do magma de erupções vulcânicas, em altas temperaturas, resultando em cristais duros, com elevados níveis de contaminantes (óxidos de Fe e Al) e baixos teores de P. A rocha de Bayóvar (Perú) matéria-prima do FN de alta reatividade é de origem

sedimentar, formada em função do acúmulo e consolidação de materiais degradados de rochas pré-existentes ou devido ao acúmulo de restos orgânicos (ossadas e esqueleto de animais) e apresentam alta reatividade.

## 2.2. Delineamento experimental

Os experimentos foram realizados em delineamento experimental de blocos casualizados, sendo 10 tratamentos com quatro repetições cada. Os tratamentos consistiram na aplicação das diferentes fontes de P e S (Tabela 2).

**Tabela 2.** Tipo de fertilizante, quantidade dos nutrientes e das fontes fornecidas ao solo em cada tratamento.

Tratamento	Fonte de P	Dose			
		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg kg <sup>-1</sup> )	Fonte de P (g 10 kg solo <sup>-1</sup> )	S (mg kg <sup>-1</sup> )	Fonte de S (g 10 kg solo <sup>-1</sup> )
Testemunha	-	0	0	0	0
2	SFT	120	2,92	0	0
3	SFT + S <sup>0</sup>	120	2,92	40	0,44
4	SFT + Gesso	120	2,92	40	2,66
5	MAP + S <sup>0</sup>	120	2,50	40	0,44
6	MAP + Gesso	120	2,50	40	2,66
7	FNR Bayovar + S <sup>0</sup>	120	8,57	40	0,44
8	FNR Bayovar + Gesso	120	8,57	40	2,66
9	FN Baixa Reatividade <sup>1</sup> + SFT + S <sup>0</sup>	120	5,71	57	7,71
10	FN Alta Reatividade <sup>2</sup> + SFT + S <sup>0</sup>	120	5,05	75	5,05

<sup>1</sup>Rocha de Catalão (GO/BR); <sup>2</sup>Rocha Bayóvar (Perú).

Os tratamentos SFT, MAP e FNR Bayóvar foram misturados fisicamente com gesso e enxofre elementar pastilha (S<sup>0</sup>), antes da aplicação. Os tratamentos FN Baixa e Alta Reatividade + SFT + S<sup>0</sup> tinham o S<sup>0</sup> incorporado ao grânulo e deste modo às doses de S foram proporcionais a dose de fósforo estabelecida (Tabela 2).

## 2.3. Instalação

Foram instalados três experimentos visando avaliar o uso de fontes de P e S em solos de Cerrado com diferentes texturas em condições de casa-de-vegetação. O local onde foram instalados os experimentos é pertencente ao Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Uberlândia (ICIAG/UFU), Campus Umuarama, Uberlândia, MG.

Para cada experimento foi utilizado um tipo de solo, classificados como: Latossolo Vermelho distrófico (LVd – 1), textura argilosa; Latossolo Vermelho distrófico (LVd – 2), textura média; e, Neossolo Quartzarênico Órtico típico (RQo), textura arenosa. As amostras de solo foram retiradas dos 20 cm superficiais, dos seguintes locais: Faz. Pau Furado (LVd – 1); Faz. Glória parte sudeste (LVd – 2) e Faz. Glória parte sul (RQo), ambas as áreas localizadas em Uberlândia, MG. As principais características químicas e físicas do solo encontram-se na Tabela 3.

**Tabela 3.** Caracterização química e física das amostras de solo (0-20 cm) utilizadas no experimento de casa-de-vegetação, Universidade Federal de Uberlândia – UFU, Uberlândia – MG.

Solo	pH	CaCl <sub>2</sub>	P	S	H+Al	K	Ca	Mg	SB	CTC	V	MO
		--- mg dm <sup>-3</sup> ---			----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----					%	dag kg <sup>-1</sup>	
LVd – 1	4,3	1,9	14,0	6,4	0,05	0,6	0,2	0,8	7,3	12	4,6	
LVd – 2	4,1	3,4	13,0	4,2	0,05	0,2	0,1	0,3	4,6	9,7	2,4	
RQo	4,8	1,1	13,0	0,5	0,03	0,3	0,5	0,5	2,8	27	2,2	
		Areia Grossa		Areia Fina		Silte		Argila				
		-----g kg <sup>-1</sup> -----										
LVd – 1		90		43		33		834				
LVd – 2		231		485		45		239				
RQo		600		222		68		110				

Ca, Mg = (KCl 1 mol L<sup>-1</sup>); P = (HCl 0,05 mol L<sup>-1</sup> + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,025 mol L<sup>-1</sup>); SB = Soma de Bases; V= Saturação por bases; Análise textural pelo Método da Pipeta, EMBRAPA (2009a).

As amostras de solo coletadas foram colocadas para secagem e posterior peneiragem. Depois deste processo, foram pesados e dispostos 10 kg de solo em vasos com capacidade para 12 kg. Em fevereiro de 2016 as amostras receberam aplicação de CaCO<sub>3</sub> e MgCO<sub>3</sub>, calculadas pelo método de saturação de bases e foram incubadas por um período de 15 dias (Figura 1). Durante o período de incubação o solo foi irrigado em sua capacidade de campo. Para o solo LVd-1 foram aplicados: 1,39 g CaCO<sub>3</sub> kg de solo<sup>-1</sup>; 0,39 g MgCO<sub>3</sub> kg de solo<sup>-1</sup>; 325 mL H<sub>2</sub>O kg de solo<sup>-1</sup>; para o solo LVd-2: 1,07 g CaCO<sub>3</sub> kg de solo<sup>-1</sup>; 0,25 g MgCO<sub>3</sub> kg de solo<sup>-1</sup>; 275 mL H<sub>2</sub>O kg de solo<sup>-1</sup>; e para o solo RQo: 0,99 g CaCO<sub>3</sub> kg de solo<sup>-1</sup>; 0,22 g MgCO<sub>3</sub> kg de solo<sup>-1</sup>; 250 mL H<sub>2</sub>O kg de solo<sup>-1</sup>;

Após o tempo de incubação realizou-se a aplicação dos tratamentos (tabela 3) no volume total de solo e posterior plantio de duas mudas pré-brotadas (MPB) de cana-de-açúcar (MPB), variedade RB 86-7515 (Figura 1) em vasos com capacidade para 12 kg. Além disso, aplicou-se juntamente com os tratamentos, 200 mg kg<sup>-1</sup> de N, 166 mg kg<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O e 50 mg kg<sup>-1</sup> de micronutrientes.



**Figura 1.** Detalhe do processo de correção e incubação do solo e do transplântio das mudas MPB nos vasos com capacidade para 12 kg (ICIG/UFU), Uberlândia, MG.

#### 2.4. Avaliações

Aos 45 e 100 dias após o transplante das mudas de cana, foram realizadas avaliações de altura e diâmetro de plantas. A colheita das plantas foi realizada aos 100 dias após o transplante, cortando-se manualmente as duas plantas de cada vaso (Figura 2). As plantas foram posteriormente acondicionadas em sacos de papel para secagem em estufa de circulação de ar, a 65 °C, até peso constante. Após seco, o material foi pesado em balança analítica para obtenção de massa seca e moído em moinho tipo Willey para análise laboratorial (Figura 2). As amostras foram submetidas à análise de P e S seguindo metodologia descrita pela EMBRAPA (2009). Com os dados dos teores de P e S na planta e a massa da matéria seca da parte aérea, foi calculado o acúmulo (extração) de nutrientes nas mudas de MPB.



**Figura 2.** Detalhe de planta, colheita, amostragem de solo e pesagem de massa seca da parte aérea, casa-de-vegetação (ICIG/UFU), Uberlândia, MG.

Sete dias após a data da colheita foram coletadas também amostras de solo em cada vaso, com o auxílio de mini trado, amostrando-se quatro pontos em cada um dos vasos, formando uma amostra composta por parcela (Figura 2). As amostras após serem secas foram submetidas às análises de pH ( $\text{CaCl}_2$  0,01 mol L<sup>-1</sup>), P (extrator Mehlich1 e Resina), S, Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> no solo seguindo metodologia descrita pela EMBRAPA (2009) e Raij et al. (2001).

## **2.5. Análises estatísticas**

Inicialmente, para cada experimento realizaram-se os testes de pressuposições do modelo: normalidade dos resíduos (teste de Shapiro-Wilk, à 0,01 de significância) e homogeneidade das variâncias (teste de Levene, à 0,01 de significância), utilizando o software SPSS 17.0 (SPSS, 2008).

Depois de testado às pressuposições submeteu-se os resultados às análises de variância e sendo o teste F significativo, as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey a 0,05 de significância com a utilização do programa estatístico SISVAR (FERREIRA, 2014), e cada tratamento comparado com a testemunha pelo teste de Dunnett a 0,05 de significância com auxílio do programa estatístico ASSISTAT versão 7.6 beta (SILVA, 2016). Além disso, visando comparar o efeito da mistura de fosfatos acidulados, fosfatos naturais e fontes de enxofre, realizou-se a análise de contraste entre os tratamentos com o teste de Scheffé a 0,05 de significância com auxílio do programa estatístico SISVAR (FERREIRA, 2014).

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Latossolo Vermelho distrófico (Textura Argilosa/LVd – 1)

A aplicação dos tratamentos superfosfato triplo (SFT), superfosfato triplo misturado com enxofre elementar pastilha (SFT + S<sup>0</sup>), mono-amônio fosfato misturado com gesso (MAP + Gesso) e fosfato natural Bayóvar misturado com superfosfato triplo e enxofre elementar no mesmo grânulo (FN Alta Reatividade + SFT + S<sup>0</sup>) resultaram em maior altura de plantas de MPB (variedade RB 86-7515) que a testemunha, pelo teste de Dunnett (Tabela 4). Ainda aos 45 dias após aplicação dos tratamentos observou-se maior diâmetro de plantas com o tratamento SFT (13,6 mm) em relação à testemunha (11,0 mm), pelo teste de Dunnett.

**Tabela 4.** Altura, diâmetro de plantas e massa seca da parte aérea (MSPA), em mudas pré-brotadas (MPB) de cana-de-açúcar cultivadas em amostras de um Latossolo Vermelho distrófico (LVd-1), 45 e 100 dias após a aplicação dos tratamentos.

Tratamentos	45 dias		100 dias		MSPA
	Altura	Diâmetro	Altura	Diâmetro	
	cm	mm	cm	mm	G
Testemunha	32,3 b	11,0 a	70,0 c	15,3 b	14,8 a
SFT	41,1* a	13,6* a	95,9 a*	18,9 a*	19,5 a
SFT + S <sup>0</sup>	39,8* a	11,5 a	95,0 a*	18,5 a*	25,7 a*
SFT + Gesso	39,7 a	13,1 a	95,6 a*	17,5 a	24,7 a*
MAP + S <sup>0</sup>	36,3 b	13,2 a	97,0 a*	17,8 a*	23,6 a
MAP + Gesso	41,4* a	12,6 a	91,8 a	17,6 a	22,8 a
FNR Bayóvar + S <sup>0</sup>	39,6 a	12,1 a	92,0 a	18,3 a*	21,8 a
FNR Bayóvar + Gesso	38,7 a	12,8 a	94,5 a*	18,6 a*	20,5 a
FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup>	38,6 a	12,6 a	79,9 b	18,3 a*	20,8 a
FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup>	41,6* a	13,5 a	96,4 a*	17,7 a*	22,0 a
Médias	38,9	12,6	90,8	17,8	21,6
CV	9,31	10,28	12,4	6,2	22,4
DMS (Dunnett)	7,37	2,64	22,4	2,28	9,88

<sup>1</sup> Médias seguidas por letras distintas nas colunas diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância; \*Médias diferentes da testemunha por Dunnett (P<0,05);

Aos 100 dias após aplicação, observou que maior parte dos tratamentos (exceto FN Baixa Reatividade + SFT + S<sup>0</sup> que possivelmente não reagiu ao solo) apresentaram maior altura de plantas e diâmetro de colmos em relação à testemunha (Tabela 4). Para massa seca da parte aérea (MSPA) de muda de cana-de-açúcar foi observado

comportamento similar entre os tratamentos. Porém, maior MSPA foi encontrado com o tratamento SFT + S<sup>0</sup> e SFT + Gesso, com incrementos em relação a testemunha de 10,9 e 9,9 g, respectivamente, pelo teste de Dunnett. Esses resultados estão de acordo com os encontrados por César (2016) ao avaliar a mistura no mesmo grânulo de fosfatos acidulados, fosfatos naturais e enxofre elementar. O autor observou maior produção de MSPA de milho com MAP e SFT associadas com S<sup>0</sup>, seguidos de MAP e SFT associados com fosfato natural e S<sup>0</sup>.

Além disso, deve-se destacar que o FNR Bayóvar + S<sup>0</sup>, FNR Bayóvar + Gesso (ambos aplicados na forma farelada), FN de baixa e alta reatividade + SFT + S<sup>0</sup> (ambos aplicados na forma granulada) apresentaram resultados semelhantes ao MAP + S<sup>0</sup> e MAP + Gesso, indicando que a associação destes fosfatos naturais com S pode ter favorecido sua solubilização (VITTI; OTTO; SAVIETO, 2015; CÉSAR, 2016). Além de contribuir para solubilização de P, a associação de fontes de P com fontes de S, como o gesso, pode contribuir para redução da toxidez de alumínio, diminuindo a fixação de P e aumentando sua disponibilidade no solo (SOARES, 2016).

Após 100 dias da aplicação das fontes de P e S, verificou-se que não houve diferenças significativas nos valores de pH e Ca do solo (Tabela 5).

**Tabela 5.** pH, teores de P extraídos por Mehlich1 e Resina, S, Ca e Mg em amostras de um Latossolo Vermelho distrófico (LVd-1) cultivadas com mudas pré-brotadas (MPB) de cana-de-açúcar, 100 dias após a aplicação dos tratamentos.

Tratamentos	pH	P-Meh	P-Res	S	Ca	Mg
	CaCl <sub>2</sub>	-----	mg dm <sup>-3</sup>	-----	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	
Testemunha	4,3	2,2 c	2,1 c	7,3 a	1,9 a	0,3 a
SFT	4,3	5,6 c	8,1 bc	12,3 a	1,8 a	0,2 a
SFT + S <sup>0</sup>	4,3	4,6 c	7,9 bc	19,6 a	1,7 a	0,2 a
SFT + Gesso	4,3	6,1 cb	7,7 bc	27,3 a*	1,7 a	0,1 a*
MAP + S <sup>0</sup>	4,2	11,6 abc*	14,9 ab*	14,0 a	1,4 a	0,1 a*
MAP + Gesso	4,2	8,8 cb	13,8 ab*	25,4 a*	2,0 a	0,2 a
FNR Bayóvar + S <sup>0</sup>	4,4	16,8 ab*	20,0 a*	11,1 a	2,0 a	0,2 a
FNR Bayóvar + Gesso	4,4	21,3 a*	20,3 a*	22,5 a	2,3 a	0,2 a
FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup>	4,3	6,9 cb	9,1 ab	20,5 a	1,7 a	0,1 a*
FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup>	4,4	4,9 c	7,5 bc	25,4 a*	2,1 a	0,2 a
Médias	4,3	8,5	11,2	18,5	1,8	0,2
CV	2,9	51,4	9,8	43,5	22,1	35,1
DMS (Dunnett)	0,26	9,32	9,11	21,68	0,85	0,17

<sup>1</sup> Médias seguidas por letras distintas nas colunas diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância; \*Médias diferentes da testemunha por Dunnett (P<0,05);

Mas, os tratamentos SFT + Gesso, MAP + S<sup>0</sup> e FN de baixa reatividade + SFT + S<sup>0</sup> resultaram em baixos teores de Mg do solo quando comparados com a testemunha (teste de Dunnett). Os teores de P no solo de textura argilosa (LVd-1) tiveram grande variação entre os tratamentos, onde a testemunha, SFT e FN de baixa e alta reatividade + SFT + S<sup>0</sup> resultaram em baixos teores (Tabela 5). Mas, o FNR Bayóvar + Gesso, apresentou teores de P no solo superiores a testemunha e demais tratamentos, cujo resultado foi de 21,3 e 20,3 mg dm<sup>-3</sup> de P (extrator Mehlich1 e Resina), respectivamente (Tabela 5).

Os baixos teores de P no solo observado em maior parte dos tratamentos podem ser justificados pela elevada tendência de adsorção do P no solo, já que a taxa de fixação é elevada em solos de textura argilosa, tanto por precipitação quanto por adsorção através de compostos de Al, Fe e Ca (FURTINI NETO et al., 2001; VILLAS BÔAS et al., 2002; CÉSAR, 2016). Aliás, nos tratamentos com SFT, a diminuição do pH ao redor do grânulo do adubo (pH ~1,0 a 1,5) pode ter influenciado na adsorção de P no solo em função da dissolução do fosfato aliado à oxidação do S<sup>0</sup> presente na mistura (FIGUEIREDO, 1985; FRANDOLOSO et al., 2010). Por outro lado, a extração de P provenientes destes tratamentos podem justificar os baixos teores de P no solo, já que estes tratamentos tiveram maior MS.

Para os teores de S no solo, os tratamentos SFT + Gesso, MAP + Gesso e FN de alta reatividade + SFT + S<sup>0</sup> mostraram-se superiores à testemunha (teste de Dunnett), com incrementos de 20; 18,1 e 18,1 mg dm<sup>-3</sup> de S (Tabela 5). Esses resultados indicam que a associação de gesso com os fosfatos foi mais eficiente em disponibilizar S no solo que o S<sup>0</sup> pastilha, possivelmente devido a rápida dissociação de S solúvel (SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>) presente do gesso.

Conforme a tabela 6, a concentração de P na MSPA de MPB mostrou-se superior à testemunha com os tratamentos MAP + Gesso (1,08 g kg<sup>-1</sup> de P), FNR Bayóvar + S<sup>0</sup> (1,11 g kg<sup>-1</sup> de P) e FNR Bayóvar + Gesso (1,08, g kg<sup>-1</sup> de P). Para acúmulo, os tratamentos SFT + S<sup>0</sup> (25,7 mg dm<sup>-3</sup> de P) e MAP + Gesso (26,3 mg dm<sup>-3</sup> de P) apresentaram melhores resultados que a testemunha (Tabela 6). César (2016) observou resultados intermediários para acúmulo de P na MSPA de milho com o uso de FN de alta reatividade + MAP com e sem incorporação de S<sup>0</sup> no grânulo.

**Tabela 6.** Concentração e acúmulo de P e S na MSPA de mudas pré-brotadas (MPB) de cana-de-açúcar cultivadas em amostras de um Latossolo Vermelho distrófico (LVd-1), 100 dias após a aplicação dos tratamentos.

Tratamentos	Concentração		Acúmulo	
	P	S	P	S
	----- g kg <sup>-1</sup> -----		----- mg vaso <sup>-1</sup> -----	
Testemunha	0,64 b	2,4 a	9,8 a	34,1 a
SFT	0,91 ab	2,2 a	18,1 a	47,5 a
SFT + S <sup>0</sup>	0,99 ab	2,3 a	25,7 a*	60,8 a
SFT + Gesso	0,90 ab	3,4 a	22,3 a	85,3 a*
MAP + S <sup>0</sup>	0,84 ab	2,7 a	20,8 a	60,2 a
MAP + Gesso	1,08 ab*	3,2 a	26,3 a*	77,7 a
FNR Bayóvar + S <sup>0</sup>	1,11 a*	2,5 a	24,4 a	56,4 a
FNR Bayóvar + Gesso	1,08 ab*	2,7 a	22,2 a	56,4 a
FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup>	0,88 ab	2,5 a	18,0 a	54,2 a
FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup>	0,97 ab	2,6 a	21,7 a	55,8 a
Médias	0,9	2,6	20,9	58,8
CV	19,0	28,6	36,0	38,2
DMS (Dunnett)	0,37	1,56	15,35	45,85

Médias seguidas por letras distintas nas colunas diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância; \*Médias diferentes da testemunha por Dunnett (P<0,05);

Não houve diferenças significativas para a concentração de S na planta entre os tratamentos, mas, para acúmulo de S o tratamento SFT + Gesso mostrou-se superior à testemunha (teste de Dunnett), cujo incremento foi de 51,2 mg vaso<sup>-1</sup> de S (Tabela 6). Esse resultado é semelhante com o de César (2016) que verificou maior S acumulado em dois cultivos de milho em um Latossolo Vermelho-Amarelo submetido à aplicação de S na forma de sulfato e FN de alta reatividade + MAP + S<sup>0</sup>.

Os contrastes sobre os teores de P no solo mostraram que a mistura do S<sup>0</sup> e Gesso com fósforo natural reativo Bayóvar foram mais eficientes que quando o S<sup>0</sup> e Gesso foram misturados com SFT e MAP (Tabela 7).

Esta análise demonstrou que, independente da fonte de S utilizada, o uso do fósforo natural reativo Bayóvar foi mais eficiente em disponibilizar P no solo. Fosfatos de elevada solubilidade como SFT e MAP podem ter eficiência reduzida em solos com maior teor de argila devido apresentarem maiores perdas de P por processos de adsorção ou fixação no solo (RAJAN; WATKINSON; SINCLAIR, 1996; HOROWITZ; MEURER, 2004; NOVAIS et al., 2007; EMBRAPA, 2007).

Sobre os teores de S no solo, as fontes de P (SFT, MAP e FNR Bayóvar) associadas com gesso foram mais eficientes do que o SFT aplicado sem S (Tabela 7).

**Tabela 7.** Análise de contrastes para avaliar o efeito de fertilizantes fosfatados misturados com fontes de S sobre os teores de P (extrator Mehlich-1 e Resina) e S em amostras de um Latossolo Vermelho distrófico (LVd-1), 100 dias após a aplicação dos tratamentos.

Contrastes	P-Mehlich1	P-Resina	S
	--- mg dm <sup>-3</sup> ---		
SFT			
<b>vs</b>	ns	ns	ns
(SFT + S <sup>0</sup> ) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (FNR Bayóvar + S <sup>0</sup> )			
SFT			12,3
<b>vs</b>	ns	ns	x
(SFT + Gesso) + (MAP + Gesso) + (FNR Bayóvar + Gesso)			(27,3) + (25,4) + (22,5)*
(SFT + S <sup>0</sup> ) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (FNR Bayóvar + S <sup>0</sup> )	ns	ns	(19,6) + (14) + (11,1)
<b>vs</b>			x
(SFT + Gesso) + (MAP + Gesso) + (FNR Bayóvar + Gesso)			(27,3) + (25,4) + (22,5)*
(SFT + S <sup>0</sup> ) + (SFT + Gesso) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (MAP + Gesso)	(4,6) + (6,1) + (11,6) + (8,8)	(7,9) + (7,7) + (14,9) + (13,8)	
<b>vs</b>	x	x	ns
(FNR Bayóvar + S <sup>0</sup> ) + (FNR Bayóvar + Gesso)	(16,8) + (21,3)*	(20,0) + (20,3)*	

\* significativo pelo teste de Scheffé a 0,05 de significância; ns: não significativo.

Essa resposta pode ser justificada em função da lenta taxa de oxidação dos S<sup>0</sup> a SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> em solos mais argilosos. Diversos fatores podem influenciar a oxidação do S<sup>0</sup> como valores de pH (a oxidação aumenta à medida que aumenta o pH do solo), matéria orgânica no solo (microrganismos), além do tamanho de partícula da fonte (VITTI; OTTO; SAVIETO, 2015). Diversos trabalhos na literatura demonstram que o S<sup>0</sup> aplicado em pó apresenta taxa de oxidação mais rápida, pois quanto menor o tamanho da partícula do fertilizante, maior será seu contato com o solo. Entretanto, sua utilização nessa forma física não é recomendada devido as dificuldades de manuseio e aplicação (WAINWRIGHT, 1984; GERMIDA; JANZEN, 1993; HU et al., 2002; CÉSAR, 2016).

Além desses fatores, a composição do S<sup>0</sup> pastilha com bentonita, pode ter influenciado em sua taxa de oxidação, pois alguns autores têm observado taxa de oxidação mais lenta do S<sup>0</sup> quando associado com bentonita (CÉSAR, 2016). O uso de argila (bentonita) em enxofre pastilha parte da premissa que ao ser aplicada no solo em presença de umidade, a argila se expande e a pastilha composta de S<sup>0</sup> se desintegra aumentando a área exposta do S<sup>0</sup> a atividade dos microrganismos.

Degryse et al. (2015) ao avaliarem a oxidação de diferentes fontes de S (Sulfato de Amônio; MicroEssential com 10, 9 e 15% de S-SO<sub>4</sub><sup>-</sup>; Tiger90 e Sulfurgran) em um solo de cerrado brasileiro e de alberta Canadá, verificaram que as fontes fareladas apresentaram oxidação mais rápida que as fontes pastilhadas. Segundo os autores a composição e granulometria da fonte tem grande influência na sua eficiência e taxa de oxidação, pois fontes de maior granulometria podem apresentar dispersão e área superficial de oxidação reduzida.

Confirmando essa teoria, Riley; Zhao; MacGrath (2000) avaliaram a eficiência do S<sup>0</sup> em pó, S<sup>0</sup> com bentonita e sulfato de amônio aplicados em seis solos do Reino Unido cultivados com trigo e canola, em condições de casa-de-vegetação durante dois anos. Os autores verificaram que o S<sup>0</sup> em pó e sulfato de amônio foram mais eficientes para as culturas. Por outro lado, a resposta das culturas a adição de S<sup>0</sup> com bentonita foram mínimas em relação ao tratamento controle, sugerindo que a liberação de SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> por meio do S<sup>0</sup> com bentonita foi muito lenta para suprir a demanda das culturas. Já, Broch et al. (2011), ao avaliar a eficiência de fontes de S (S elementar + bentonita, S elementar e sulfato) sobre a produção de soja, verificaram que o S elementar + bentonita foi mais eficiente.

Para análise de contrastes sobre MSPA, concentração de P e S, e acúmulo de P, não foram observadas diferenças significativas nas comparações avaliadas (Tabela 8). Mas, o acúmulo de S na MSPA foi superior nos fósforos misturados com gesso quando comparado com o SFT sem S, reflexo do que foi observado na análise de solo. Além disso, o SFT e MAP foram mais eficientes sobre o acúmulo de S que o FNR Bayóvar, ambos misturados com gesso e pastilha (Tabela 8).

**Tabela 8.** Análise de contrastes para avaliar o efeito de fertilizantes fosfatados misturados com fontes de S sobre a massa seca da parte aérea (MSPA), concentração e acúmulo de P e S em mudas pré-brotadas (MPB) de cana-de-açúcar, em amostras de um Latossolo Vermelho distrófico (LVd-1), 100 dias após a aplicação dos tratamentos.

Contrastes	MSPA	Concentração		Acúmulo	
		P	S	P	S
	---- g ----	----- g kg <sup>-1</sup> -----		----- mg vaso <sup>-1</sup> -----	
SFT vs (SFT + S <sup>0</sup> ) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (FNR Bayóvar + S <sup>0</sup> )	ns	ns	ns	ns	ns
SFT vs (SFT + Gesso) + (MAP + Gesso) + (FNR Bayóvar + Gesso)	ns	ns	ns	ns	47,5 x (85,3) + (77,7) + (56,4)*
(SFT + S <sup>0</sup> ) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (FNR Bayóvar + S <sup>0</sup> ) vs (SFT + Gesso) + (MAP + Gesso) + (FNR Bayóvar + Gesso)	ns	ns	ns	ns	ns
(SFT + S <sup>0</sup> ) + (SFT + Gesso) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (MAP + Gesso) vs (FNR Bayóvar + Pastilha S) + (FNR Bayóvar + Gesso)	ns	ns	ns	ns	(60,8) + (85,3) + (60,2) + (77,7) x (56,4) + (56,4)*

\* significativo pelo teste de Scheffé a 0,05 de significância; ns: não significativo.

Analisando essa resposta, pode-se inferir que as fontes de S foram mais eficientes quando aplicadas com fontes solúveis de P. Este efeito pode ter ocorrido em função da rapidez na adsorção de P no solo influenciado pela acidez nos grânulos (SFT: pH ~1,0 a 1,5; MAP: pH 3,5). O fosfato seria adsorvido mais rápido que o sulfato por apresentar mais forte atração com os componentes do solo, ocupando preferencialmente os sítios de troca (RICHART et al., 2006; RAIJ, 2011; PINTO, 2012). Isto foi observado por Melo; Ferreira (1983) que encontraram elevação dos teores de S, em função da aplicação de superfosfato simples em um Latossolo Roxo. Esta ocorrência se deu até os 106 dias após aplicação, diminuindo em seguida. Richart et al. (2006) também evidenciou maior disponibilidade de S em um Latossolo Vermelho eutroférico com a aplicação de 300 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> misturado com S<sup>0</sup>.

Na tabela 9 são apresentados os resultados sobre o estudo de contrastes sobre a aplicação de fosfatados provenientes da incorporação no mesmo grânulo de SFT e S<sup>0</sup> ao fosfato natural de alta reatividade (rocha de Bayóvar) e ao fosfato natural de baixa reatividade (rocha de Catalão), respectivamente.

O fosfato natural reativo Bayóvar misturado com gesso e com S<sup>0</sup> foi mais eficiente em aumentar o P no solo que os fosfatos naturais de baixa e de alta reatividade, ambos incorporados com SFT e S<sup>0</sup> no grânulo (Tabela 9). Uma provável justificativa para este efeito é o tempo de dissolução e solubilização dos fosfatos no solo, pois a aplicação do FNR Bayóvar com S na forma farelada possibilitou a solubilização mais rápida que o FN de baixa e alta reatividade, aplicados na forma granulada.

**Tabela 9.** Análise de contrastes para avaliar o efeito de fertilizantes fosfatados produzidos com fosfato solúvel, insolúvel e enxofre elementar sobre os teores de P (extrator Mehlich-1 e Resina) e S em amostras de um Latossolo Vermelho distrófico (LVd-1), 100 dias após a aplicação dos tratamentos.

Contrastes	P-Mehlich1	P-Resina	S
--- mg dm <sup>-3</sup> ---			
(SFT + S <sup>0</sup> ) + (SFT + Gesso) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (MAP + Gesso) vs	ns	ns	ns
(FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> ) + (FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> )			
SFT vs	ns	ns	(12,3) x
(FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> ) + (FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> )			(20,5) + (25,4)*
(FNR Bayóvar + S <sup>0</sup> ) + (FNR Bayóvar + Gesso) vs	(16,8) + (21,3) x	(20,0) + (20,3) x	ns
(FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> ) + (FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> )	(6,9) + (4,9)*	(9,1) + (7,5)*	
FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> vs FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup>	ns	(9,1) x (7,5)*	ns

\* significativo pelo teste de Scheffé a 0,05 de significância; ns: não significativo.

Além da granulometria, o teor de argila do solo (83%) aliado ao baixo pH (4,3 em CaCl<sub>2</sub>) podem ter interferido na eficiência dos fosfatos. Esses fatores também podem ter influenciados na melhor resposta do FN de baixa reatividade + SFT + S<sup>0</sup> sobre o teor de P do solo (extrator Resina) quando comparado com o FN de alta reatividade + SFT + S<sup>0</sup>, ou também, efeito do extrator na solubilização do fosfato. Segundo Novais; Smyth (1999), solos mais argilosos apresentam maior capacidade de adsorção de P, mas podem favorecer a solubilização de fosfatos insolúveis (VALLADARES et al., 2003). Hamid (2014) verificou em três cortes de cana-de-açúcar que a textura do solo provavelmente influenciou a baixa eficiência na aplicação de S em um solo argiloso no Sudão.

A premissa destas fontes (Fosfato Natural + SFT + S<sup>0</sup>) é que a acidez gerada pelo fosfato solúvel pode promover solubilização parcial do fosfato natural, assim a fração do fosfato solúvel forneceria P na fase inicial de desenvolvimento da cultura e a fração proveniente do fosfato natural forneceria ao longo do desenvolvimento da cultura. Mas, a fração do fosfato natural não solubilizada no solo através da acidez gerada pelo SFT pode ficar em contato restrito com o solo e prótons de H<sup>+</sup>, reduzindo a influência do SFT na solubilização do fosfato natural (WILLIAMS, 1971). A oxidação e acidez gerada pelo S<sup>0</sup> no grânulo do fosfato poderia acelerar e aumentar a solubilização fosfato natural (RAJAN; WATKINSON; SINCLAIR, 1996).

A baixa taxa de oxidação do S<sup>0</sup> no grânulo pode ter sido outro fator que reduziu eficiência destes fosfatos nas condições avaliadas. De acordo com Horowitz (2003), em solos mais ácidos o S<sup>0</sup> apresenta menor velocidade de oxidação. Solos com maior teor de argila podem favorecer a oxidação do S<sup>0</sup>, entretanto, os efeitos positivos dependem mais do teor de matéria orgânica do que a textura, que pode ser atribuído ao seu uso como fonte de energia para a população de microrganismos que atuam na oxidação do S<sup>0</sup>, processo este dependente de várias condições ambientais adequadas para maior eficiência na adubação (VITTI; OTTO; SAVIETO, 2015). Isso sugere que a interação de vários fatores é mais importante do que a ação de cada um isoladamente (GERMIDA; JANZEN, 1993).

A oxidação mais lenta destes produtos granulados tem sido atribuída à inadequada dispersão das partículas de S-elementar após a aplicação do produto ao solo (BOSWELL; SWANNEY; OWERS, 1988; JANZEN, 1990). Begum et al. (2004), avaliaram a associação de fosfato acidulado (SFT e MAP) com fosfato natural da Índia mais S<sup>0</sup>, em condições de casa-de-vegetação em um solo alcalino (pH 8,5 em H<sub>2</sub>O) com plantio de trigo. Os autores verificaram que o S favoreceu a solubilização do fosfato natural, apresentando resultados semelhantes a fonte padrão utilizada (MAP) e com rendimento de até 80% na produção de grãos. Semelhante a Soares (2016), que observou maior disponibilidade de P em um Latossolo Vermelho-Amarelo com a aplicação de fosfato natural reativo Bayóvar + MAP.

A análise de contrastes sobre o efeito da aplicação de fosfatos de alta reatividade (Bayóvar) e baixa reatividade (Catalão) com SFT e S<sup>0</sup> no mesmo grânulo na MSPA, concentração e acúmulo de P e S não foram significativos.

### 3.2. Latossolo Vermelho distrófico (Textura Média/LVd – 2)

Não houve diferença significativa para altura e diâmetro de plantas aos 45 dias após a aplicação dos tratamentos, cujas médias foram, 32,6 cm e 13,5 cm. Aos 100 dias foi observado que maior parte dos tratamentos diferiu da testemunha sobre altura, diâmetro e MSPA (Tabela 10). Porém, para os tratamentos MAP + Gesso e FN de alta reatividade + SFT + S<sup>0</sup>, os valores de diâmetro de colmos foram inferiores.

**Tabela 10.** Altura, diâmetro de plantas e massa seca da parte aérea (MSPA) de mudas pré-brotadas (MPB) de cana-de-açúcar (variedade RB 86-7515) cultivadas em amostras de um Latossolo Vermelho distrófico (LVd-2), 100 dias após a aplicação dos tratamentos.

Tratamentos	Altura	Diâmetro	MSPA
	cm	mm	g
Testemunha	54,5 b	14,1 b	5,3 b
SFT	90,3 a*	17,4 a*	13,0 ab
SFT + S <sup>0</sup>	86,3 a*	17,2 a*	18,5 a*
SFT + Gesso	95,2 a*	16,8 a*	18,6 a*
MAP + S <sup>0</sup>	95,6 a*	17,0 a*	23,5 a*
MAP + Gesso	88,2 a*	15,8 b	18,0 a*
FNR Bayóvar + S <sup>0</sup>	92,5 a*	17,3 a*	16,1 ab*
FNR Bayóvar + Gesso	96,0 a*	17,5 a*	17,7 a*
FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup>	86,0 a*	17,0 a*	18,0 a*
FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup>	91,1 a*	14,1 b	15,7 ab*
Médias	87,5	16,4	16,4
CV	9,8	7,4	27,1
DMS (Dunnett)	17,60	2,48	9,08

<sup>1</sup> Médias seguidas por letras distintas nas colunas diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância; \*Médias diferentes da testemunha por Dunnett (P<0,05);

Os incrementos médios de MSPA dos tratamentos com S<sup>0</sup> (SFT, MAP e FNR Bayóvar), foram de 14,0 e 6,0 g, respectivamente em comparação com a testemunha (5,3 g) e SFT (13,0 g), pelo teste Dunnett. Os tratamentos com Gesso (SFT, MAP e FNR Bayóvar) e os tratamentos com fosfatos naturais (FN de baixa reatividade + SFT + S<sup>0</sup> e FN de alta reatividade + SFT + S<sup>0</sup>) também apresentaram incrementos médios de 12,8 e 5,1 g em relação à testemunha, e na ordem de 11,5 e 3,8 g em comparação com o SFT (Tabela 10). César (2016) também encontrou resultados satisfatórios na produção

de MSPA de milho ao avaliar a aplicação de MAP e SFT associadas com enxofre elementar (S<sup>0</sup>) e MAP e SFT associados com fosfato natural e S<sup>0</sup>.

Além disso, deve-se destacar que o FNR Bayóvar misturado com S<sup>0</sup> e gesso aplicado na forma farelada e FN de baixa e alta reatividade + SFT + S<sup>0</sup> aplicado na forma granulada apresentaram resultados semelhantes aos tratamentos com SFT e MAP, indicando que a associação destes fosfatos com S pode favorecer a solubilização do fosfato natural, aumentando sua eficiência (VITTI; OTTO; SAVIETO, 2015; CÉSAR, 2016). A associação de fontes de P com fontes de S além de contribuir para solubilização do fosfato pode contribuir para a redução da toxidez de alumínio (gesso), diminuindo a fixação de P e consequentemente aumentando a disponibilidade de P no solo (EVANS; PRICE, 2009; SOARES, 2016).

Para as variáveis pH, S e Mg do solo, não foram observadas diferenças significativas aos 100 dias, os quais apresentaram teores médios de 4,8 de pH (CaCl<sub>2</sub>), 16,5 mg dm<sup>-3</sup> de S e 0,2 cmol<sub>c</sub>dm<sup>-3</sup> de Mg (Tabela 11).

**Tabela 11.** pH, teores de P extraídos por Mehlich-1 e Resina, S, Ca e Mg em amostras de um Latossolo Vermelho distrófico (LVd-2) cultivadas com mudas pré-brotadas (MPB) de cana-de-açúcar (variedade RB 86-7515), 100 dias após a aplicação dos tratamentos.

Tratamentos	pH CaCl <sub>2</sub>	P-Meh ----- mg dm <sup>-3</sup>	P-Res ----- mg dm <sup>-3</sup>	S ----- mg dm <sup>-3</sup>	Ca -- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>	Mg -- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup>
Testemunha	4,8	1,52 b	3,5 b	12,0	1,8 b	0,3
SFT	4,9	29,4 a*	26,1 a*	13,2	2,0 b	0,2
SFT + S <sup>0</sup>	4,9	8,5 b	10,1 ab	13,5	2,1 b	0,3
SFT + Gesso	4,8	8,2 b	14,4 ab	20,0	2,1 b	0,3
MAP + S <sup>0</sup>	4,8	28,2 a	24,4 a*	16,3	2,1 b	0,2
MAP + Gesso	4,8	12,0 b	19,4 a*	20,1	2,0 b	0,2
FNR Bayóvar + S <sup>0</sup>	5,0	26,6 a	21,7 ab*	18,4	2,3 a*	0,2
FNR Bayóvar + Gesso	4,9	34,0 a*	24,0 a*	17,3	2,4 a*	0,2
FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup>	4,9	10,1 b	11,2 ab	14,9	2,4 a*	0,3
FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup>	5,1	15,2 b	27,1 a*	20,0	2,8 a*	0,3
Médias	4,8	17,3	18,1	16,5	2,2	0,2
CV	3,5	77,6	42,1	32,4	11,5	26,4
DMS (Dunnett)	0,35	27,51	15,64	17,51	0,52	0,15

<sup>1</sup> Médias seguidas por letras distintas nas colunas diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância; \*Médias diferentes da testemunha por Dunnett (P<0,05);

Já os tratamentos FNR Bayóvar (Pastilha S e Gesso), FN de baixa e alta reatividade + SFT + S<sup>0</sup> apresentaram altos teores de Ca do solo em relação à testemunha. Segundo Khasawaneh; Doll (1978), elevados teores de Ca no solo podem

diminuir a dissolução de fosfato natural, o que pode explicar os baixos teores de P no solo proveniente dos tratamentos com fosfato natural. Por outro lado, os maiores teores de Ca nesses tratamentos podem ser decorrentes da dissolução desses fosfatos que contêm alta concentração de Ca em sua composição.

Os teores de P no solo (extrator Mehlich1 e Resina) de textura média (LVd-2) tiveram grande variação entre as fontes, onde os tratamentos testemunha, SFT + S<sup>0</sup> e SFT + Gesso resultaram em baixos teores de P (Tabela 11). Semelhante ao observado no solo de textura argilosa (LVd-1), a aplicação de FNR Bayóvar + Gesso, resultou em teores de P no solo superiores a testemunha.

Os elevados teores de P (extrator Mehlich1) provenientes dos tratamentos com FNR Bayóvar (S<sup>0</sup> e gesso) pode ser indicativo de que o extrator superestimou os teores de P disponíveis no solo. O método Mehlich1 com ação por dissolução ácida consiste na solubilização em ordem decrescente de efetividade das formas de P ligadas a cálcio (Ca), alumínio (Al) e ferro (Fe) e, desta forma, como desvantagem, pela extração preferencial de compostos de Ca, superestima os teores disponíveis em solos com presença de fosfatos de Ca como mineral primário (MEHLICH, 1978), e também nos que receberam adubação com fosfatos naturais (GATIBONI et al., 2003; BORTOLON et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2015). Por outro lado, esta análise pode ser um indicativo do nível de solubilização do fosfato natural no solo.

Proposto por Amer et al. (1955), a Resina Trocadora de Ânions (RTA) em lâminas ou esferas possui sítios permanentes de adsorção de ânions e por isso apresenta comportamento mais satisfatório para disponibilidade de P no solo pois o discrimina melhor não superestimando o P disponível no solo proveniente de fosfatos naturais (RAIJ e DIEST, 1980; BRAGA et al., 1991; KORNDÖRFER et al., 1999; SILVA; RAIJ, 1999; KLIEMANN; LIMA, 2001; SOUSA; LOBATO, 2004; RAIJ, 2004; OLIVEIRA et al., 2015).

Além dos resultados de P no solo já demonstrado, verifica-se com extrator Resina, que o SFT, MAP + S<sup>0</sup>, FNR Bayóvar + S<sup>0</sup> e FN de alta reatividade + SFT + S<sup>0</sup> mostraram-se superiores à testemunha, pelo teste de Dunnett. Resultados intermediários foram observados com os tratamentos com MAP + Gesso e FNR Bayóvar + S<sup>0</sup> (Tabela 11).

Os baixos teores de P (extrator Mehlich1 e Resina) no solo observado em alguns tratamentos (SFT + S<sup>0</sup>, SFT + Gesso, MAP + Gesso e FN de baixa reatividade + SFT + S<sup>0</sup>) podem ter ocorrido pela tendência de remoção do P da solução do solo, já que a taxa

de fixação tanto por precipitação quanto por adsorção deste nutriente através de compostos de Al, Fe e Ca é comum com o decorrer do tempo (FURTINI NETO et al., 2001; VILLAS BÔAS et al., 2002; CÉSAR, 2016).

A aplicação dos tratamentos aumentou a concentração de P na MSPA, mas não a concentração de S (Tabela 12). Para acúmulo de P na MSPA foi observado melhor desempenho do MAP + S<sup>0</sup> em comparação ao SFT e testemunha. Corroborando com esses resultados, César (2016), verificou efeito positivo da aplicação de MAP + S sobre o acúmulo de P em plantas de milho. O autor também não encontrou diferenças entre os tratamentos aplicados sobre a concentração de S na MSPA.

**Tabela 12.** Concentração e acúmulo de P e S na MSPA de mudas pré-brotadas (MPB) de cana-de-açúcar cultivadas em amostras de um Latossolo Vermelho distrófico (LVd-2), 100 dias após a aplicação dos tratamentos.

Tratamentos	Concentração		Acúmulo	
	P	S	P	S
	----- g kg <sup>-1</sup> -----		----- mg vaso <sup>-1</sup> -----	
Testemunha	0,48 c	2,0	2,6 c	10,6 a
SFT	0,78 b*	2,4	10,0 bc	31,8 ab
SFT + S <sup>0</sup>	0,88 a*	2,6	16,3ab*	46,1 ab*
SFT + Gesso	0,97 a*	2,4	18,2 ab*	46,6 ab*
MAP + S <sup>0</sup>	0,99 a*	2,5	23,3 a*	61,7 a*
MAP + Gesso	0,95 a*	2,4	16,9 ab*	44 ab*
FNR Bayóvar + S <sup>0</sup>	0,99 a*	2,3	15,7 ab*	37 ab
FNR Bayóvar + Gesso	1,00 a*	2,6	17,3 ab*	46,2 ab*
FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup>	0,92 a*	2,2	16,6 ab*	39,2 ab
FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup>	0,92 a*	3,3	14,5 ab*	54,5 a*
Médias	0,89	2,5	15,1	41,8
CV	13,1	26,6	27,3	35,7
DMS (Dunnett)	0,23	1,35	10,08	30,4

<sup>1</sup>Médias seguidas por letras distintas nas colunas diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância; \*Médias diferentes da testemunha por Dunnett (P<0,05);

Semelhante ao observado para acúmulo de P, o tratamento MAP + S<sup>0</sup> foi mais eficiente sobre o acúmulo de S quando comparado com a testemunha, pelo teste de Dunnett (Figura 18). Os tratamentos SFT + S<sup>0</sup>, SFT + Gesso, MAP + Gesso, FNR Bayóvar + Gesso e FN de alta reatividade + SFT + S<sup>0</sup> apresentaram o mesmo comportamento. Corroborando com esses resultados, César (2016) verificou maior S acumulado em dois cultivos de milho submetido à aplicação de S na forma de sulfato e FN Alta Reatividade + MAP + S<sup>0</sup> em um Latossolo Vermelho-Amarelo. Segundo o autor o S<sup>0</sup> melhorou a eficiência agrônômica de fertilizantes fosfatados avaliados condições de casa-de-vegetação.

No geral, o tratamento MAP + S<sup>0</sup> apresentou resultados satisfatórios sobre teores de P e S no solo, MSPA, acúmulo de P e S na MSPA. Semelhante ao observado neste experimento, alguns estudos verificaram que a mistura física de S<sup>0</sup> com fertilizantes fosfatados aplicados na forma de pó ou farelada apresentaram resultados satisfatórios em solos da Austrália com pH (CaCl<sub>2</sub>) entre 4,3 a 5,8 (EVANS; MCDONAL; PRICE, 2006; EVANS; PRICE, 2009).

De acordo com Frandoloso et al. (2010), no Brasil, são poucas as pesquisas sobre o uso de S<sup>0</sup> como fonte de nutrientes para as plantas. Horowitz (2003) em trabalho realizado em casa-de-vegetação com quatro cultivos consecutivos de milho observou que a incorporação de S<sup>0</sup> na forma de pó adicionado ao superfosfato triplo foi mais eficiente.

Os contrastes sobre os teores de P (extrator Mehlich1) no solo mostraram que o SFT, MAP e FNR Bayóvar misturado com gesso foram mais eficientes que SFT aplicado sem S (Tabela 13).

**Tabela 13.** Análise de contrastes para avaliar o efeito de fertilizantes fosfatados misturados com fontes de S sobre os teores de P (extrator Mehlich-1 e Resina) e S em amostras de um Latossolo Vermelho distrófico (LVd-2), 100 dias após a aplicação dos tratamentos.

Contrastes	P-Mehlich1	P-Resina	S
--- mg dm <sup>-3</sup> ---			
SFT			
<b>vs</b>	ns	ns	ns
(SFT + S <sup>0</sup> ) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (FNR Bayóvar + S <sup>0</sup> )			
SFT	29,4		
<b>vs</b>	<b>x</b>	ns	ns
(SFT + Gesso) + (MAP + Gesso) + (FNR Bayóvar + Gesso)	(8,2) + (12,0) + (34,0)*		
(SFT + S <sup>0</sup> ) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (FNR Bayóvar + S <sup>0</sup> )	ns	ns	ns
<b>vs</b>			
(SFT + Gesso) + (MAP + Gesso) + (FNR Bayóvar + Gesso)			
(SFT + S <sup>0</sup> ) + (SFT + Gesso) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (MAP + Gesso)	(8,5) + (8,2) + (28,2) + (12,0)	ns	ns
<b>vs</b>	<b>x</b>		
(FNR Bayóvar + S <sup>0</sup> ) + (FNR Bayóvar + Gesso)	(26,6) + (34,0)*		

\* significativo pelo teste de Scheffé a 0,05 de significância; ns: não significativo.

O FNR Bayóvar quando comparado com SFT e MAP (ambos misturados com gesso e S<sup>0</sup>), apresentou maiores teores de P (extrator Mehlich1) no solo (Tabela 13).

Conforme já relatado na tabela 16, esse comportamento pode ser indicativo de que o extrator Mehlich1 superestimou os teores de P disponíveis no solo, o qual apresenta ação preferencial na dissolução de fosfatos de cálcio (KORNDÖRFER et al., 1999). Porém, a alta reatividade deste fosfato também pode justificar sua eficiência em solo mais argiloso aliado a maior taxa de adsorção de P proveniente de fosfatos acidulados.

Não foram observadas diferenças significativas entre os contrastes avaliados sobre os teores de S no solo, concentração e acúmulo de S na MSPA. Sobre a concentração de P na MSPA, o fosfato reativo bayóvar mostrou-se mais eficiente que o SFT e MAP, ambos misturados com gesso e S<sup>0</sup> (Tabela 14). Entretanto, maior acúmulo de P na MSPA foi observado com SFT e MAP.

**Tabela 14.** Análise de contrastes para avaliar o efeito de fertilizantes fosfatados misturados com fontes de S sobre a massa seca da parte aérea (MSPA), concentração e acúmulo de P e S em mudas pré-brotadas (MPB) de cana-de-açúcar, em amostras de um Latossolo Vermelho distrófico (LVd-2), 100 dias após a aplicação dos tratamentos.

Contrastes	MSPA	Concentração		Acúmulo	
		P	S	P	S
	---- g ----	----- g kg <sup>-1</sup> -----		----- mg vaso <sup>-1</sup> -----	
SFT	13,0			10,0	
<b>vs</b>	<b>x</b>			<b>x</b>	
(SFT + S <sup>0</sup> ) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (FNR Bayóvar + S <sup>0</sup> )	(18,5) + (23,5) + (16,1)*	ns	ns	(16,3) + (23,3) + (15,7)*	ns
SFT				10,0	47,5
<b>vs</b>				<b>x</b>	<b>x</b>
(SFT + Gesso) + (MAP + Gesso) + (FNR Bayóvar + Gesso)	ns	ns	ns	(18,2) + (16,9) + (17,3)*	(85,3) + (77,7) + (56,4)*
(SFT + S <sup>0</sup> ) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (FNR Bayóvar + S <sup>0</sup> )					
<b>vs</b>	ns	ns	ns	ns	ns
(SFT + Gesso) + (MAP + Gesso) + (FNR Bayóvar + Gesso)					
(SFT + S <sup>0</sup> ) + (SFT + Gesso) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (MAP + Gesso)		(0,88) + (0,97) + (0,99) + (0,95)		(16,3) + (18,2) + (23,3) + (16,9)	(60,8) + (85,3) + (60,2) + (77,7)
<b>vs</b>	ns	<b>x</b>	ns	<b>x</b>	<b>x</b>
(FNR Bayóvar + Pastilha S) + (FNR Bayóvar + Gesso)		(0,99) + (1,00)*		(15,7) + (17,3)*	(56,4) + (56,4)*

\* significativo pelo teste de Scheffé a 0,05 de significância; ns: não significativo.

Percebe-se que o uso de S<sup>0</sup> pastilha associado com fosfatos (SFT, MAP e FNR Bayóvar) proporcionou MSPA superior em comparação ao SFT (Tabela 14). Além disso, esta análise indicou que a mistura de fontes de P com fontes de S proporcionaram maiores acúmulos de P na MSPA ao comparar com o tratamento sem adição de S.

Soares (2016) observou comportamento semelhante sobre o acúmulo de P e MSPA de plantas de milho com aplicação de MAP e SFT associados com S<sup>0</sup>. Dois

estudos em condições de casa-de-vegetação com solos de áreas pastagem da Austrália também demonstraram que a mistura física de S<sup>0</sup> com fertilizantes fosfatados aplicados na forma de pó ou farelada apresentaram resultados satisfatórios em pastagens (EVANS; MCDONAL; PRICE, 2006; EVANS; PRICE, 2009). Karimizarch et al. (2014) ao avaliar aplicação de S<sup>0</sup> em solo alcalino da Malásia em condições de cana-de-vegetação verificou incrementos de massa seca de milho.

Os resultados do estudo da aplicação de fosfatados provenientes da mistura de fosfato natural (alta e baixa reatividade), SFT e S<sup>0</sup> no mesmo grânulo são apresentados nas tabelas 15 e 16. Foram evidenciados melhores resultados sobre os teores de P (extrator Mehlich1) no solo ao comparar o FNR Bayóvar + gesso e FNR Bayóvar + S<sup>0</sup> com os fosfatos naturais de alta e baixa reatividade + SFT + S<sup>0</sup> (Tabela 15).

**Tabela 15.** Análise de contrastes para avaliar o efeito de fertilizantes fosfatados produzidos com fosfato solúvel, insolúvel e enxofre elementar sobre os teores de P (extrator Mehlich-1 e Resina) e S em amostras de um Latossolo Vermelho distrófico (LVd-2), 100 dias após a aplicação dos tratamentos.

Contrastes	P-Mehlich1	P-Resina	S
	--- mg dm <sup>-3</sup> ---		
(SFT + S <sup>0</sup> ) + (SFT + Gesso) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (MAP + Gesso) vs	ns	ns	ns
(FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> ) + (FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> ) SFT vs	ns	ns	ns
(FNR Bayóvar + S <sup>0</sup> ) + (FNR Bayóvar + Gesso) vs	(26,6) + (34,0) x	ns	ns
(FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> ) + (FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> ) FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> vs FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup>	(10,1) + (15,2)* ns	(11,2) x (27,1)*	ns

\* significativo pelo teste de Scheffé a 0,05 de significância; ns: não significativo.

Esses resultados diferem de Soares (2016) ao observar em solo de textura média que fosfatos produzidos a partir da mistura de fosfato natural, MAP e S<sup>0</sup> na composição proporcionaram melhores resultados nos teores de P no solo. Uma provável justificativa é o tempo de dissolução e solubilização dos fosfatos no solo associado ao modo de aplicação (volume total do solo), pois o FNR Bayóvar + (Gesso e Pastilha) foi aplicado na forma farelada o que possibilitou solubilização mais rápida que o FN de baixa e alta

reatividade + SFT, aplicados na forma granulada. Por outro lado, conforme relatado anteriormente na tabela 11, o extrator Mehlich1 pode ter superestimado os resultados devido apresentação preferencial na dissolução de fosfatos de cálcio (FRANDOSOLO et al., 2010).

Sobre os teores de P no solo extraído com Resina e concentração de S na MSPA, o fosfato natural de alta reatividade + SFT + S<sup>0</sup> mostrou-se mais eficiente que o fosfato natural de baixa reatividade + SFT + S<sup>0</sup> (Tabela 15 e 16). Soares (2016) encontrou resultados satisfatórios com a rocha de bayóvar quando associada com S<sup>0</sup> e MAP ou SFT na mistura. Essa associação é vantajosa, pois a fração do fosfato totalmente acidulado forma uma solução ácida na região do grânulo durante sua dissolução que pode facilitar à solubilização do fosfato natural, entretanto, a reatividade do fosfato de rocha pode determinar a eficiência de solubilização e efeito residual. Rochas de origem sedimentar apresentam alta reatividade e com isso são mais eficientes quando comparadas com as de origem ígnea e metamórfica, consideradas de baixa reatividade em função de seu material de origem (LÉON et al., 1986; CHIEN, 1996; CÉSAR, 2016). Para MSPA e acúmulo de P e S não foram observados efeito da aplicação de fosfato natural (alta e baixa reatividade) + SFT + S<sup>0</sup> nos contrastes avaliados (Tabela 16).

**Tabela 16.** Análise de contrastes para avaliar o efeito de fertilizantes fosfatados produzidos com fosfato solúvel, insolúvel e enxofre elementar sobre a massa seca da parte aérea (MSPA), concentração e acúmulo de P e S em mudas pré-brotadas (MPB) de cana-de-açúcar, em amostras de um Latossolo Vermelho distrófico (LVd-2), 100 dias após a aplicação dos tratamentos.

Contrastes	MSPA -- g --	Concentração		Acúmulo	
		P ----- g kg <sup>-1</sup> -----	S -----	P ----mg vaso <sup>-1</sup> ----	S ----
(SFT + S <sup>0</sup> ) + (SFT + Gesso) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (MAP + Gesso) vs (FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> ) + (FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> )	ns	ns	ns	ns	ns
SFT vs (FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> ) + (FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> )	ns	ns	ns	ns	ns
(FNR Bayóvar + S <sup>0</sup> ) + (FNR Bayóvar + Gesso) vs (FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> ) + (FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> )	ns	(0,99) + (1,00) x (0,92) + (0,92)*	ns	ns	ns
FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> vs FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup>	ns	ns	(2,2) x (3,3)*	ns	ns

\* significativo pelo teste de Scheffé a 0,05 de significância; ns: não significativo.

Em relação à concentração de P, o FNR Bayóvar + Gesso e FNR Bayóvar + S<sup>0</sup> mostraram-se mais eficientes que o FN de baixa reatividade + SFT + S<sup>0</sup> e FN de alta reatividade + SFT + S<sup>0</sup>. Como citado anteriormente à aplicação do fosfato na forma farelada, no volume total de solo, pode ter favorecido uma solubilização mais rápida em função da maior superfície de contato quando comparado com os fosfatos complexos granulados (FN + SFT + S<sup>0</sup>).

### 3.2.1. Neossolo Quartzarênico Órtico típico (Textura Arenosa/RQo)

A maioria dos tratamentos resultou em maior altura de plantas que a testemunha (teste de Dunnett) com exceção do SFT + S<sup>0</sup> e FNR Bayóvar + Gesso (Tabela 17).

**Tabela 17.** Altura, diâmetro de plantas e massa seca da parte aérea (MSPA), em mudas pré-brotadas (MPB) de cana-de-açúcar cultivadas em amostras de um Neossolo Quartzarênico Órtico típico (RQo), 45 e 100 dias após a aplicação dos tratamentos.

Tratamentos	45 dias		100 dias		MSPA
	Altura	Diâmetro	Altura	Diâmetro	
	cm	mm	cm	mm	g
Testemunha	30,1 a	11,3 a	48,9 b	13,7 b	5,3 b
SFT	34,8 a*	12,4 a	78,4 a*	17,4 a*	11,6 a*
SFT + S <sup>0</sup>	33,0 a	12,8 a	75,9 a*	17,2 a*	12,7 a*
SFT + Gesso	34,8 a*	13,4 a*	83,7 a*	16,8 a*	12,5 a*
MAP + S <sup>0</sup>	34,0 a*	12,8 a	84,1 a*	17,2 a*	11,7 a*
MAP + Gesso	35,6 a*	12,7 a	77,6 a*	15,8 a	11,6 a*
FNR Bayóvar + S <sup>0</sup>	36,8 a*	12,7 a	83,7 a*	17,3 a*	11,6 a*
FNR Bayóvar + Gesso	33,5 a	11,6 a	84,4 a*	17,5 a*	11,1 a*
FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup>	35,0 a*	12,7 a	75,6 a*	17,0 a*	11,8 a*
FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup>	35,5 a*	12,7 a	80,1 a*	16,7 a*	12,3 a*
Médias	34,3	12,5	77,2	16,6	10,2
CV	6,23	7,7	9,7	7,2	13,2
DMS (Dunnett)	4,39	1,96	17,3	2,46	3,02

<sup>1</sup> Médias seguidas por letras distintas nas colunas diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância; \*Médias diferentes da testemunha por Dunnett (P<0,05);

Ainda aos 45 dias, observou-se maior diâmetro de plantas proveniente do tratamento SFT + Gesso (13,4 mm), em relação à testemunha (11,3 mm). Esse resultado pode ter ocorrido em função da ação do gesso em diminuir a saturação por Al e aumentar a disponibilidade de P no solo, além de aumentar os teores de Ca e S em função de sua alta solubilidade o que pode favorecer o desenvolvimento das plantas

umentando a exploração das raízes (RAIJ, 2011; ROSSETTO; SANTIAGO, 2011; SOARES, 2016).

Aos 100 dias após aplicação, observou que aplicação de P resultou em maior altura de plantas, diâmetro de colmos e MSPA, independente da fonte (Tabela 17). Diversos estudos têm constatado as vantagens da associação de fontes de P com fontes de S. Experimentos conduzidos em casa-de-vegetação, em solo de textura média, demonstraram maior produção de MSPA de milho com aplicação de MAP + S<sup>0</sup>, SFT + S<sup>0</sup>, MAP + FN + S<sup>0</sup> e SFT + FN + S<sup>0</sup> (CÉSAR, 2016).

Franzini et al. (2009), encontraram resultados satisfatórios sobre a produção de massa seca de milho e soja com aplicação de fosfato reativo de Gafsa e SFT na mesma composição. O resultado não foi o mesmo quando as fontes foram somente misturadas antes da aplicação. Por outro lado, Prochnow et al. (2004) não encontraram diferenças significativas sobre a produção de massa seca de trigo e azevém com aplicação de fosfato natural de Patos de Minas + SFT.

Para pH, S e Mg do solo não foram observadas diferenças significativas aos 100 dias (Tabela 18). O tratamento FN de alta reatividade + SFT + S<sup>0</sup> resultou em um maior teor de Ca do solo quando comparado com a testemunha, pelo teste de Dunnett.

**Tabela 18.** pH, teores de P extraídos por Mehlich1 e Resina, S, Ca e Mg em amostras de um Neossolo Quartzarênico Órtico típico (RQo), cultivadas com mudas pré-brotadas (MPB) de cana-de-açúcar, 100 dias após a aplicação dos tratamentos.

Tratamentos	pH	P-Meh	P-Res	S	Ca	Mg
	CaCl <sub>2</sub>	--- mg dm <sup>-3</sup> ---			-- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> --	
Testemunha	4,9	3,6 c	5,42	8,3	1,9 a	0,2
SFT	4,8	14,8 c	16,50	9,7	2,2 a	0,2
SFT + S <sup>0</sup>	5,0	27,4 bc	36,87	10,2	2,2 a	0,3
SFT + Gesso	5,1	23,3 bc	32,87	14,0	2,3 a	0,2
MAP + S <sup>0</sup>	4,9	25,8 bc	35,07	7,2	2,1 a	0,2
MAP + Gesso	4,8	13,3 c	16,97	8,5	2,3 a	0,2
FNR Bayóvar + S <sup>0</sup>	5,1	88,2 a*	34,57	7,5	2,5 a	0,2
FNR Bayóvar + Gesso	5,1	61,3 ab*	23,77	12,5	2,5 a	0,2
FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup>	4,9	21,8 bc	26,75	5,3	2,3 a	0,2
FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup>	5,0	27,9 bc	35,75	12,5	2,6 a*	0,2
Médias	4,9	30,7	26,4	10,4	2,2	0,2
CV	3,0	54,2	63,0	98,5	13,2	20,7
DMS (Dunnett)	0,30	33,74	33,94	20,9	0,62	0,11

<sup>1</sup> Médias seguidas por letras distintas nas colunas diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância; \*Médias diferentes da testemunha por Dunnett (P<0,05);

Apesar dos diferentes teores de P extraídos por Resina entre os tratamentos, não houve diferença estatística, possivelmente devido ao alto coeficiente de variação. Por outro lado, os teores de P no solo extraídos por Mehlich1 foram mais eficientes com os tratamentos FNR Bayóvar + S<sup>0</sup> e FNR Bayóvar + Gesso (Tabela 18). Semelhante ao observado no solo de textura média, os elevados teores de P provenientes dos tratamentos com FNR Bayóvar (fosfatos de Ca) pode ser resultado do efeito do extrator Mehlich1 que pode superestimar os teores de P disponíveis no solo (MEHLICH, 1978; GATIBONI et al., 2003; BORTOLON et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2015).

Os tratamentos SFT e MAP + Gesso apresentaram baixos teores de P, semelhante ao observado por Machado; Souza, (2012) que não encontraram efeito da aplicação de MAP revestido com polímero em um solo de textura arenosa (Neossolo Quartzarênico) onde houve redução do teor disponível de P no solo. Porém, os autores encontraram resultados satisfatórios em solo de textura média (Latosolo Amarelo distrófico) e argilosa (Latosolo Vermelho distrófico). Para concentração e acúmulo de P na MSPA, todos os tratamentos demonstraram melhor resposta que a testemunha (Tabela 19). Não houve diferença significativa para concentração de S, semelhante ao observado por Cesár (2016) sobre a concentração de S na MSPA de milho com aplicação de diferentes fontes de S (Tabela 19).

**Tabela 19.** Concentração e acúmulo de P e S na MSPA de mudas pré-brotadas (MPB) de cana-de-açúcar cultivadas em amostras de um Latossolo Vermelho distrófico (LVd-2), 100 dias após a aplicação dos tratamentos.

Tratamentos	Concentração		Acúmulo	
	P	S	P	S
	g kg <sup>-1</sup>		mg vaso <sup>-1</sup>	
Testemunha	0,36 b	1,7	1,9 b	9,3 b
SFT	0,72 a*	2,2	8,3 a*	26,5 ab*
SFT + S <sup>0</sup>	0,94 a*	2,3	12,2 a*	30,8 a*
SFT + Gesso	0,87 a*	2,2	10,9 a*	28,6 a*
MAP + S <sup>0</sup>	0,72 a*	1,9	8,4 a*	23,2 ab
MAP + Gesso	0,82 a*	1,9	9,6 a*	22,5 ab
FNR Bayóvar + S <sup>0</sup>	0,79 a*	2,1	9,2 a*	25,5 ab*
FNR Bayóvar + Gesso	0,88 a*	2,3	9,8 a*	25,8 ab*
FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup>	0,76 a*	1,9	8,9 a*	24,0 ab
FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup>	0,93 a*	2,3	11,6 a*	29,6 a*
Médias	0,78	2,1	9,1	24,5
CV	16,6	17,0	22,8	28,9
DMS (Dunnett)	0,26	0,74	4,21	14,49

<sup>1</sup>Médias seguidas por letras distintas nas colunas diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância; \*Médias diferentes da testemunha por Dunnett (P<0,05);

Entretanto, maior acúmulo de S foi demonstrado com os tratamentos SFT + S<sup>0</sup>, SFT + Gesso e FN de alta reatividade + SFT + S<sup>0</sup> (Figura 19). César (2016), também verificou maior acúmulo de S em plantas de milho com aplicação de S na forma de sulfato e FN de alta reatividade + MAP + S<sup>0</sup>.

A análise de contraste constatou que as misturas de SFT, MAP e FNR Bayóvar com S<sup>0</sup> foram mais eficientes que SFT sobre os teores de P (extrator Resina) no solo (Tabela 20). Além disso, percebeu-se que os fosfatos misturados com S<sup>0</sup> pastilha foram mais eficientes ao aumentar os teores de P no solo (Tabela 20) do que quando misturadas com gesso.

**Tabela 20.** Análise de contrastes para avaliar o efeito de fertilizantes fosfatados misturados com fontes de S sobre os teores de P (extrator Mehlich-1 e Resina) e S em amostras de um Neossolo Quartzarênico Órtico típico (RQo), 100 dias após a aplicação dos tratamentos.

Contrastes	P-Mehlich1	P-Resina	S
	--- mg dm <sup>-3</sup> ---		
SFT vs (SFT + S <sup>0</sup> ) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (FNR Bayóvar + S <sup>0</sup> )	ns	16,5 x (36,8) + (35,0) + (34,5)*	ns
SFT vs (SFT + Gesso) + (MAP + Gesso) + (FNR Bayóvar + Gesso)	ns	ns	ns
(SFT + S <sup>0</sup> ) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (FNR Bayóvar + S <sup>0</sup> ) vs (SFT + Gesso) + (MAP + Gesso) + (FNR Bayóvar + Gesso)	(27,4) + (25,8) + (88,2) x	(36,8) + (35,0) + (34,5) x	ns
(SFT + S <sup>0</sup> ) + (SFT + Gesso) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (MAP + Gesso) vs (FNR Bayóvar + S <sup>0</sup> ) + (FNR Bayóvar + Gesso)	(27,4) + (23,3) + (25,8) + (13,3) x	ns	ns
	(88,2) + (61,3)*		

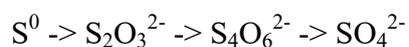
\* significativo pelo teste de Scheffé a 0,05 de significância; ns: não significativo.

Uma possível explicação para este resultado é que o S<sup>0</sup> aumentou a eficiência na disponibilidade de P no solo, provavelmente ocasionado pelo aumento na taxa de oxidação do S<sup>0</sup>. O maior valor inicial de pH do solo (pH 4,8 CaCl<sub>2</sub>) quando comparado com o solo de textura argilosa e média, pode ter favorecido a oxidação do S<sup>0</sup>, pois solos menos ácidos apresentam maior velocidade de oxidação (HOROWITZ, 2003). No

experimento realizado com solo de textura argilosa, onde o pH inicial foi mais ácido (pH 4,3 CaCl<sub>2</sub>) os fosfatos misturados com S<sup>0</sup> apresentaram baixas respostas.

Horowitz; Meurer (2006) ao avaliarem a taxa de oxidação de S-elementar a S-sulfato em um solo de textura argilosa e arenosa, verificaram maior capacidade de oxidação de S-elementar no solo arenoso, que apresentava maior valor de pH e P inicial no solo. Solos com maior teor de argila podem favorecer a oxidação do S<sup>0</sup>, entretanto, os efeitos positivos dependem mais do teor de matéria orgânica do que a textura, que pode ser atribuído ao seu uso como fonte de energia para a população de microrganismos que atuam na oxidação do S<sup>0</sup> (VITTI; OTTO; SAVIETO, 2015).

A oxidação abiótica de S pode ocorrer de forma limitada nos solos, mas as reações microbianas dominam o processo. A oxidação biológica do S<sup>0</sup> nos solos pode ocorrer através da seguinte sequência de reações (GERMIDA; JAZEN, 1993):



Em solos arenosos o SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> pode ser perdido por percolação já que sua movimentação nesses solos é maior, geralmente por apresentarem baixo conteúdo de matéria orgânica e menor reservas de S orgânico (STIPP; CASARIN, 2010). O ânion SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> é a forma mineral de S mais encontrada no solo e a principal absorvida pelas plantas em condições aeróbicas, todavia, o S<sup>0</sup> é a fonte de S mais concentrada. Por isso, o processo de oxidação do S<sup>0</sup> tem grande importância na disponibilização de S para as plantas (GERMIDA; JAZEN, 1993).

Cesár (2016) ao avaliar o efeito da aplicação de P e S em diferentes faixas de solo, observou que na faixa de aplicação os teores de P foram elevados e os teores de S foram baixos. Segundo o autor, o SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> tendeu a se acumular no ponto mais distante do ponto de aplicação das fontes devido a competição do SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> pelos sítios de adsorção com o ânion H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>. Com a difusão do P dos fertilizantes, a maioria dos sítios disponíveis para a adsorção de ânions foi ocupada pelo H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub><sup>-</sup>, que possui maior afinidade para adsorção as partículas do solo que o SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, fazendo com que o sulfato migrasse de ponto mais distante da aplicação dos fertilizantes onde havia sítios disponíveis para sua adsorção (ALVAREZ et al., 2007).

Isso pode justificar a falta de diferenças significativas sobre as análises dos teores de S no solo aliado ao elevado coeficiente de variação (Tabela 26). Além do mais, a interação de vários fatores tem grande influência na eficiência de oxidação de S<sup>0</sup>, como, temperatura, umidade, aeração, textura do solo, matéria orgânica, valores de pH, presença de outros nutrientes, tamanho da partícula do adubo e granulometria

(GERMIDA; JANZEN, 1993; HOROWITZ; MEURER, 2007; STIPP; CASARIN, 2010; VITTI; OTTO; SAVIETO, 2015; FIORINI et al., 2016).

Para MSPA, concentração e acúmulo de P e S MSPA, não houve efeito dos fosfatos misturados com S.

Assim como no LVd-2, a mistura do FNR Bayóvar com gesso e com S<sup>0</sup> apresentou melhores resultados sobre os teores de P (extrator Mehlich1) quando comparados com os fosfatos naturais de alta e baixa reatividade + SFT + S<sup>0</sup> (Tabela 21). Porém, com extrator Resina, os resultados foram opostos. O efeito do extrator Mehlich1 pode ser considerado um forte indicativo para essa diferença devido sua ação preferencial na dissolução de fosfatos de cálcio (FRANDOSOLO et al., 2010).

**Tabela 21.** Análise de contrastes para avaliar o efeito de fertilizantes fosfatados produzidos com fosfato solúvel, insolúvel e enxofre elementar sobre os teores de P (extrator Mehlich-1 e Resina) e S em amostras de um Neossolo Quartzarênico Órtico típico (RQo), 100 dias após a aplicação dos tratamentos.

Contrastes	P-Mehlich1	P-Resina	S
		--- mg dm <sup>-3</sup> ---	
(SFT + S <sup>0</sup> ) + (SFT + Gesso) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (MAP + Gesso)		(36,8) + (32,8) + (35,0) + (16,9)	
<b>vs</b>	ns	<b>x</b>	ns
(FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> ) + (FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> )		(26,7) + (35,7)*	
SFT		16,5	
<b>vs</b>	ns	<b>x</b>	ns
(FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> ) + (FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> )		(26,7) + (35,7)*	
(FNR Bayóvar + S <sup>0</sup> ) + (FNR Bayóvar + Gesso)	(88,2) + (61,3)	(34,5) + (23,7)	
<b>vs</b>	<b>x</b>	<b>x</b>	ns
(FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> ) + (FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> )	(21,8) + (27,9)*	(26,7) + (35,7)*	
FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> <b>vs</b> FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup>	ns	(26,7) <b>x</b> (35,7)*	ns

\* significativo pelo teste de Scheffé a 0,05 de significância; ns: não significativo.

O fosfato natural de alta reatividade + SFT + S<sup>0</sup> mostrou-se mais eficiente que o fosfato natural de baixa reatividade + SFT + S<sup>0</sup> sobre os teores de P (extrator Resina) (Tabela 21). Por outro lado, esses dois fosfatos mostraram-se mais eficientes quando comparados com o SFT e MAP (ambos misturados com Gesso e S<sup>0</sup>) e com SFT aplicado sem S.

Esta análise indica que a associação de fosfato solúvel na composição de um fertilizante complexo pode aumentar sua eficiência em função da fração do fosfato solúvel formar uma solução ácida na região do grânulo durante sua dissolução, o que pode facilitar a solubilização do fosfato natural (CHIEN, 1996; CÉSAR, 2016). Esses resultados corroboram com os de César (2016) ao observar resultados satisfatórios pelo uso de fosfato natural de alta reatividade + MAP ou SFT. Por outro lado, Nachtigall et al. (1989) não verificaram aumento na disponibilidade de P no solo cultivado com milho ao avaliarem a associação no mesmo grânulo de fosfato natural de Jacupiranga com SFT.

De acordo com Oliveira Junior (2007), a aplicação conjunta de fosfatos de rocha, reativos ou não, com uma fonte de elevada solubilidade em água na grande maioria das vezes pode apresentar eficiência equivalente à dos superfosfatos. Trabalhos científicos nesse sentido já realizados em culturas como milho, soja, trigo e azevém, demonstraram eficiência agrônômica dos fosfatos naturais (alta ou baixa reatividade) associados com SFT, sendo equivalentes ou mais eficientes que os fosfatos totalmente acidulados (NACHTIGALL et al., 1989; CHIEN, 1996; PROCHNOW et al., 2004; OLIVEIRA JUNIOR, 2007; FRANZINI et al., 2009; CÉSAR, 2016).

Para MSPA, concentração e acúmulo de P e S não foram observados efeito da aplicação de fertilizantes produzidos com fosfato natural, SFT e  $S^0$  no mesmo grânulo.

Esses resultados se assemelham aos observados por Prochnow et al. (2004) que não encontraram diferenças significativas sobre a produção de massa seca de trigo e azevém com aplicação de fosfato natural de patos de minas + SFT.

Franzini et al. (2009), observou resultados satisfatórios sobre a produção de massa seca de milho e soja com aplicação de fosfato reativo de Gafsa + SFT. O resultado não foi o mesmo quando as fontes foram somente misturadas antes da aplicação.

Chien; Menon; Billingham (1996), também encontraram diferenças significativas entre a aplicação de fosfato reativo e SFT aplicados isoladamente e misturados para as culturas do milho e feijão acupi. Os autores verificaram que as fontes aplicadas conjuntamente foram mais eficientes sobre acúmulo de P nas culturas.

#### 4. CONCLUSÕES

A mistura de fertilizantes fosfatados e enxofre elementar ( $S^0$ ) foi mais eficiente em aumentar a massa seca e os teores de fósforo em solo de textura média.

O fosfato natural de baixa reatividade incorporado com SFT e  $S^0$  no grânulo e os fosfatos misturados com gesso foram mais eficientes em aumentar o enxofre acumulado em cana-de-açúcar e os teores de enxofre em solo de textura argilosa.

O fosfato natural de alta reatividade incorporado com SFT e  $S^0$  no grânulo e os fosfatos misturados com  $S^0$  foram mais eficientes em aumentar os teores de fósforo em solo de textura arenosa.

## REFERÊNCIAS

- ALBULQUERQUE, G. A. C.; MARINHO, M. L.; ARAÚJO FILHO, J. T. Competição de fontes de fósforo em cana-de-açúcar. In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL. 1979. **Anais...** Maceió-AL: STAB, 1980. v. 2, p. 319-322.
- BEGUM, M.; NARAYANASAMY, G.; BISWAS, D. R. Phosphorus supplting capacity of phosphate rocks as influenced by compaction with water-soluble P fertilizers. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 68, p. 73-84, 2004.  
<https://doi.org/10.1023/B:FRES.0000012237.35121.6f>
- BORTOLON, L.; GIANELLO, C.; WELTER, S.; ALMEIDA, R. G. O.; GIASSON, E. Simultaneous extraction of phosphorus, potassium, calcium and magnesium from soils and potassium recommendations for crops in Southern Brazil. **Pedosphere**, v. 21, n. 3, p. 365-372, 2011.  
[https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(11\)60137-9](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(11)60137-9)
- BOSWELL, C. C.; SWANNEY, B.; OWERS, W. R. Sulfur/sodium bentonite prills as sulfur fertilizers. 2. Effect of sulfur-sodium bentonite ratios on the availability of sulfur to pasture plants in the field. **Fertilizer Research**, v. 15, p. 33-46, 1988.  
<https://doi.org/10.1007/BF01049184>
- BROCH, D. L.; PAVINATO, P. S.; POSSENTTI, J. C.; MARTIN, T. N.; QUIQUI, E. M. D. Produtividade da soja no cerrado influenciada pelas fontes de enxofre. **Revista Agrônômica**, v. 42, n. 3, p. 791-796, 2011.  
<https://doi.org/10.1590/S1806-66902011000300027>
- CÉSAR, F. R. C. F. **Eficiência agrônômica de misturas no mesmo grânulo de fosfatos acidulados, fosfatos naturais e enxofre elementar**. 2016. 136f. (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.
- CHIEN, S. H.; MENON, R. G.; BILLINGHAM, K. S. Phosphorus availability from phosphate rock as enhanced by water-soluble phosphorus. **Soil Science Society of Ameca Journal**, v. 60, p. 1173-1177, 1996.  
<https://doi.org/10.2136/sssaj1996.03615995006000040031x>
- DEGRYSE, F.; AJIBOYE, B.; BAIRD, R.; SILVA, R. C.; MCLAUGHLIN, M. J. Oxidation of elemental sulfur in granular fertilizers depends on the Soil-Exposed surface area. **Soil Fertility & Plant Nutrition**, v.80, p.294-305, 2015.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Aspectos relacionados ao manejo da adubação fosfatada em solos do cerrado**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2007. 32p.
- EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2.ed. Brasília, Informação Tecnológica, 2009. 628p.

EVANS, J.; MCDONALD, L.; PRICE, A. Application of reactive phosphate rock and sulfur fertilizers to enhance the availability of soil phosphate in organic farming. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 75, p. 233-246, 2006.  
<https://doi.org/10.1007/s10705-006-9030-1>

EVANS, J.; PRICE, A. Influence of rates of reactive phosphate rock and Sulphur on potentially available phosphorus in organically managed soils in the south-eastern near-Mediterranean cropping region of Australia. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 84, p. 105-118, 2009.  
<https://doi.org/10.1007/s10705-008-9230-y>

FERREIRA, D. F. Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciênc. Agrotec**, v. 38, n. 2, p. 109-112, 2014.  
<https://doi.org/10.1590/S1413-70542014000200001>

FIGUEIREDO, O. A. R. **Reações de superfosfato triplo e de cama de galinha poedeira com um solo Latossolo Bruno**. 85f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1985.

FIORINI, I. V. A.; PINHO, R. G. V.; PIRES, L. P. M.; SANTOS, A. O.; FIORINI, F. V. A.; CANCELLIER, L. L.; RESENDE, E. L. Avaliação de fontes de enxofre e das formas de micronutrientes revestindo o npk na cultura do milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 15, n. 1, p. 20-29, 2016.  
<https://doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v15n1p20-29>

FRANDOLOSO, J. F.; LANA, M. C.; FONTANIVA, S.; CZYCZA, F. R. Eficiência de adubos fosfatados associados ao enxofre elementar na cultura do milho. **Rev. Ceres, Viçosa**, v. 57, n.5, p. 686-694, 2010.

FRANZINI, V. I.; MURAOKA, T.; CORASPE-LEON, H. M.; MENDES, F. L. Eficiência de fosfato natural reativo aplicado em misturas com superfosfato triplo em milho e soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, p. 1092-1099, 2009.  
<https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009000900004>

FURTINI NETO, A.; VALE, F. R.; RESENDE, A. V.; GUILHERME, L. R. G.; GUEDES, G. A. A. **Fertilidade do solo**. Lavras: UFLA/FAEP, 2001. 252p.

GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J.; RHEINHEIMER, D. S.; BRUNETTO, G. Superphosphate and rock phosphates as phosphorus sources for grass-clover pasture on a limed acid soil in southern Brazil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 34, n. 2, p. 503-514, 2003.  
<https://doi.org/10.1081/CSS-120024782>

GERMIDA, J. J.; JANZEN, H. H. Factors affecting the oxidation of elemental sulfur in soils. **Fertilizer Research**, v. 35, p. 101-114, 1993.  
<https://doi.org/10.1007/BF00750224>

HAMID, A. M. A. **Effect of sulfur fertilizer on sugarcane in the heavy clay soils of Sudan**. 2014. 88f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Colégio de Doutorado, Universidade de Ciência e Tecnologia do Sudão, Kanana, Sudão, 2014.

HOROWITZ, N. **Oxidação e eficiência agronômica do enxofre elementar em solos do Brasil**. 2003. 109p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

HOROWITZ, N.; MEURER, E. J. Eficiência agronômica de fosfatos naturais. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (Ed.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba, POTAFOS, 2004. p. 665-682.

HOROWITZ, N.; MEURER, E. J. Oxidação de enxofre elementar em solos tropicais. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, p. 822-828, 2006.  
<https://doi.org/10.1590/S0103-84782006000300015>

HOROWITZ, N.; MEURER, E. J. Relação entre atributos de solos e oxidação de enxofre elementar em quarenta e duas amostras de solos do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 3, p. 455-463, 2007.

HU, Z. Y.; BEATON, J. D.; CAO, Z. H.; HENDERSON, A. Sulfate formation and extraction from Red soil treated with micronized elemental sulfur fertilizer and incubated in closed and open systems. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 33, p. 1779-1797, 2002.  
<https://doi.org/10.1081/CSS-120004822>

JANZEN, H. H.; BETTANY, J. R. Measurement of sulfur oxidation in soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 143, p. 444- 452, 1987.  
<https://doi.org/10.1097/00010694-198706000-00008>

KITTAMS, H. H.; ATTOE, O. J. Availability of phosphorus in rock phosphate-sulfur infusions. **Agronomy Journal**, v. 57, p. 331-334, 1965.  
<https://doi.org/10.2134/agronj1965.00021962005700040006x>

KLIEMANN, H. J. LIMA, D. V. Eficiência agronômica de fosfatos naturais e sua influência no fósforo disponível em dois solos de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Brasília, v. 31, n. 2, p. 111-119, 2001.

KORNDÖRFER, G. H.; CABEZAS, W. A. L.; HOROWITZ, N. Eficiência agronômica de fosfatos naturais na cultura do milho. **Scientia Agricola**, São Paulo, v. 56, n. 2, p. 32-39, 1999.

LÉON, L. A.; FENSTER, W. E.; HAMMOND, L. L. Agronomic potential of eleven phosphate rocks from Brazil, Colombia, Perú and Venezuela. **Soil Sc. Soc. Am. J.**, Boulder, v. 50, p. 798-802, 1986.

MEHLICH, A. New extractant for soil test evaluation of phosphorus, potassium, magnesium, calcium, sodium, manganese and zinc. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 9, p. 477-492, 1978.  
<https://doi.org/10.1080/00103627809366824>

MELO, W. J.; FERREIRA, M. E. Fatores do solo afetando a produtividade da cultura do arroz de sequeiro: Três fatores biológicos. In: SIMPÓSIO SOBRE A CULTURA

DO ARROZ DE SEQUEIRO, Jaboticabal, 1983. **Anais...** Jaboticabal, FCAV, 1983. p.99-136.

NACHTIGALL, G. R.; BRAUNER, J. L.; ZOLEZZI, M.; TAPIA, F. Mistura de superfosfato triplo com fosfato de Jacupiranga no mesmo grânulo na eficiência do fosfato natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.13, p.269-273, 1989.

NOVAIS, R. F. de; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV/DPS, 1999. 399p.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2007. p. 471-550.

OLIVEIRA JUNIOR, A. **Eficiência agronômica de fosfatos de rocha, utilizados isoladamente ou associados ao superfosfato triplo, para a cultura da soja**. 2007. 123f. (Doutorado – Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

OLIVEIRA, C. M. B.; GATIBONI, L. C.; ERNANI, P. R.; BOITT, G.; BRUNETTO, G. Capacidade de predição da disponibilidade de fósforo em solo com aplicação de fosfato solúvel e natural. **Científica**, Jaboticabal, v. 43, n. 4, p. 413-419, 2015.

PINTO, F. A. **Sorção e dessorção de fósforo em solos de Cerrado**. 2012. 46f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Campus Jataí, 2012.

PROCHNOW, L. I.; ALCARDE, J. C.; CHIEN, S. H. Eficiência agronômica dos fosfatos totalmente acidulados. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. e (Eds.). **Fósforo na Agricultura Brasileira**, Piracicaba, SP: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. 2004. p. 605-651.

PROCHNOW, L. I.; CHIEN, S. H.; CARMONA, G.; HENAO, J. Greenhouse evaluation of phosphorus sources produced from a low-reactive Brazilian phosphate rock. **Agronomy Journal**, v.96, p.761-768, 2004.  
<https://doi.org/10.2134/agronj2004.0761>

RAIJ, B. V.; ANDRADE, J.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. IAC. 284p. 2001.

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

RAIJ, B. van. Métodos de Diagnose de Fósforo no Solo em Uso no Brasil. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. e (Eds.). **Fósforo na Agricultura Brasileira**, Piracicaba, SP: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. 2004. p. 563-587.

RAIJ, B.; DIEST, B. Phosphate supplying power in na Oxisol. **Plant & Soil**, Crawley, p. 55-97, 1980.

RAJAN, S. S. S.; WATKINSON, H.; SINCLAIR, A. G. Phosphate rocks for direct application to soils. **Advances in Agronomy**, v. 57, p. 77-159, 1996.

RICHART, A.; LANA, M. C.; SCHULZ, L. R.; BERTONI, J. C.; BRACCINI, A. L. Disponibilidade de fósforo e enxofre para a cultura da soja na presença de fosfato natural reativo, superfosfato triplo e enxofre elementar. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 30, p. 695-705, 2006.

<https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000400010>

RILEY, N. G.; ZHAO, F. J.; MCGRATH, S. P. Availability of different forms of Sulphur fertilisers to wheat and oilseed rape. **Plant and Soil**, v. 222, p. 139-147, 2000.

<https://doi.org/10.1023/A:1004757503831>

ROSSETTO, R.; SANTIAGO, A. D. **Gessagem**. EMBRAPA: Agência de Informação Tecnológica – AGEITEC. 2011. Disponível em:

<[https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01\\_35\\_711200516717.html](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_35_711200516717.html)> Acesso em: 05 ago. 2018.

SILVA, F. A. S.; AZEVEDO, C. A. V. The Assistat Software Version 7.7 and its use in the analysis of experimental data. **Afr. J. Agric. Res**, v. 11, n. 39, p. 3733-3740, 2016.

<https://doi.org/10.5897/AJAR2016.11522>

SILVA, F. C.; RAIJ, B. V. Disponibilidade de fósforo em solos avaliada por diferentes extratores. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.34, p.267-288, 1999.

<https://doi.org/10.1590/S0100-204X1999000200016>

SOARES, G. F. **Gesso e Fósforo na Sucessão Soja/Milho Safrinha 2016**. 2016. 74f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Jataí, 2016.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E.; REIN, A. T. Adubação fosfatada. In: SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Brasília: Embrapa Cerrados, 2004. p. 147-168.

SPSS v.17.0.0. **SPSS**. Chicago, Illinois, 2008. CD-ROM

STIPP, S. R.; CASARIN, V. A importância do enxofre na agricultura brasileira.

**Informações Agrônomicas**, Piracicaba, n. 129, p. 14-20, 2010.

VALLADARES, G. S.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C. Adsorção de fósforo em solos de argila de atividade baixa. **Bragantia**, Campinas, v. 62, n. 1, p. 111-118, 2003.

<https://doi.org/10.1590/S0006-87052003000100014>

VASCONCELOS, A. C. de; LANDELL, M. G. A. de (Ed.) **Cana-de-açúcar**. 2ed. Campinas: IAC, 2010. cap. 32, p. 697-722.

VILLAS BÔAS, R. L.; ZANINI, J. R.; DUENHAS, L. H. Uso e manejo de fertilizantes em fertirrigação. In: ZANINI, J. R.; VILLAS BÔAS, R. L.; FEITOSA FILHO, J. C. **Uso e manejo da fertirrigação e hidroponia**. Jaboticabal: FUNEP, 2002. p.1-25.

VITTI, G. C.; OTTO, R.; SAVIETTO, J. Manejo do Enxofre na agricultura. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 152, p. 1-14, 2015.

WAINWRIGHT, M. Sulfur oxidation in soils. **Advances in Agronomy**, v.37, p.349-396, 1984.

[https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60458-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60458-7)

WILLIAMS, C. H. Reactions of surface-applied superphosphate with soil: II Movement of the phosphorus and sulphur into the soil. **Australian Journal of Soil Research**, v.9, n.1, p.95-106, 1971.

<https://doi.org/10.1071/SR9710095>

**CAPÍTULO 3: AVALIAÇÃO DA MISTURA DE FOSFATOS ACIDULADOS,  
FOSFATOS NATURAIS E FONTES DE ENXOFRE NA PRODUÇÃO DE  
CANA-DE-AÇÚCAR**

## RESUMO

NICCHIO, BRUNO NICCHIO. **Avaliação da mistura de fosfatos acidulados, fosfatos naturais e fontes de enxofre na produção de cana-de-açúcar.** 2018. 59f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia<sup>1</sup>.

A cultura da cana-de-açúcar é cultivada em sua maior parte na região do Cerrado, cujos solos apresentam grande capacidade em tornar o P aplicado não disponível para as plantas. Por isso, o uso de fosfatos de solubilidade intermediária, provenientes da associação de fosfato acidulado, fosfato natural e enxofre elementar poderiam ser mais eficientes do que as fontes convencionais em disponibilizar P para as plantas, além de fornecer S. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito agrônomo da aplicação de fosfatos acidulados, fosfatos naturais e fontes de enxofre na cana-de-açúcar, em cana planta e cana soca. Os estudos de campo foram conduzidos em dois locais, durante dois cultivos. Os tratamentos avaliados foram: testemunha, SFT, SFT + S<sup>0</sup>, SFT + Gesso, MAP + S<sup>0</sup>, MAP + Gesso, FNR Reativo + S<sup>0</sup>, FNR Bayóvar + Gesso, FN alta reatividade + SFT + S<sup>0</sup> e FN baixa reatividade + SFT + S<sup>0</sup>, aplicados no momento do plantio na dose de 120 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 40 kg ha<sup>-1</sup> de S, respectivamente. O SFT, MAP e FNR Bayóvar foram misturados com S<sup>0</sup> e gesso antes da sua aplicação ao solo. O FN de alta e baixa reatividade foram aplicados com o SFT e S<sup>0</sup> incorporados ao grânulo. Durante os dois cultivos em ambos os experimentos foram avaliados: número de perfilhos por m, teor foliar de P, S, Ca e Mg, tonelada de colmos por hectare (TCH), tonelada de açúcar por hectare (TAH), ATR, Brix e Pol e pH, P, S, Ca e Mg no solo (profundidade 0-20 e 20-40 cm). A mistura de fertilizantes fosfatados (SFT, MAP e FNR Bayóvar) e enxofre elementar foi eficiente em aumentar a produção de colmos e açúcar e os teores de fósforo no solo. O fosfato natural de alta e baixa reatividade ambos incorporados com SFT e S<sup>0</sup> no grânulo foram mais eficientes em aumentar os teores de fósforo no solo que o fosfato natural reativo Bayóvar misturados com enxofre elementar e gesso. O efeito positivo dos tratamentos com gesso em relação ao enxofre elementar pode estar relacionado à intensidade do estresse hídrico e as condições de cultivo verificado em um dos experimentos.

**Palavras-chave:** fosfatos, fosfato reativo, MAP, enxofre elementar, gesso e *Saccharum* spp.

---

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

## ABSTRACT

NICCHIO, BRUNO NICCHIO. **Sources of phosphorus and sulfur for sugarcane production.** 2018. 59p. Thesis (Doctorate's degree in Agronomy) - Federal University of Uberlândia<sup>1</sup>.

Sugarcane is mostly cultivated in the Cerrado region, where soils have a great capacity to make applied P unavailable to plants. Therefore, the use of intermediate solubility phosphates from the combination of acidulated phosphate, natural phosphate and elemental sulfur could be more efficient than the conventional sources in making P available to plants, in addition to providing S. In this context, this study evaluated the agricultural effect of the application of acidulated phosphates, natural phosphates and sulfur sources in sugarcane, both in plant and ratoon cane. Field studies were conducted at two sites during two growing seasons. The treatments evaluated were: control, TSP, TSP + S<sup>0</sup>, TSP + Gypsum, MAP + S<sup>0</sup>, MAP + Gypsum, Reactive Bayovar Phosphate + S<sup>0</sup>, Reactive Bayovar Phosphate + Gypsum, high reactivity Natural Phosphate + TSP + S<sup>0</sup>, and low reactivity Natural Phosphate + TSP + S<sup>0</sup>, applied at the time of planting at the rate of 120 kg ha<sup>-1</sup> of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and 40 kg ha<sup>-1</sup> of S, respectively. The TSP, MAP and Reactive Bayovar were mixed with S<sup>0</sup> and gypsum before their application on the soil. The high and low reactivity natural phosphates were both applied with the TSP and S<sup>0</sup> incorporated into the granule. During the two growing seasons, in both experiments, the number of tillers per meter, leaf contents of P, S, Ca and Mg, cane tonnage per hectare, sugar yield, TRS, Brix and Pol and soil pH, P, S, Ca and Mg (depths 0-20 and 20-40 cm) were evaluated. The mixture of phosphate fertilizers (TSP, MAP and Reactive Bayovar Phosphate) with elemental sulfur was efficient in increasing the production of cane tonnage, sugar yield and the levels of phosphorus in the soil. The high and low reactivity natural phosphates, incorporated with SFT and S<sup>0</sup> in the granule, were more efficient increasing phosphorus content in the soil than the natural reactive phosphate Bayovar mixed with elemental sulfur and gypsum. The positive effect of gypsum treatments in comparison to elemental sulfur may be related to the intensity of the water stress and the cultivation conditions observed in one of the experiments.

**Keywords:** Phosphate, rock phosphate, MAP, elemental sulfur, gypsum and *Saccharum* spp.

---

<sup>1</sup>Supervising committee: Gaspar Henrique Korndörfer – UFU (Supervisor) and Hamilton Seron Pereira – UFU (Co-supervisor).

## 1. INTRODUÇÃO

O uso de fertilizantes tem grande influência no cultivo de grandes culturas como a cana-de-açúcar, e no Brasil, a ausência de reservas de matéria-prima de boa qualidade aliado ao elevado custo de processamento, produção e importação de fertilizantes torna a competitividade das commodities agrícolas brasileiras no mercado internacional um grande desafio.

Aplicado em larga escala na agricultura brasileira, o fósforo (P) é um nutriente essencial para os sistemas de produção já que na maioria dos solos tropicais apresenta baixa disponibilidade. Este nutriente exerce função chave no metabolismo das plantas e na cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) faz parte de importantes processos fisiológicos como enraizamento, perfilhamento, desdobramento de açúcares, formação de sacarose (matéria-prima para a produção de açúcar e álcool) e absorção de outros nutrientes.

As fontes de P mais utilizadas na agricultura são os fosfatos totalmente acidulados, fontes que contém elevados teores de P solúvel em água como superfosfato triplo (SFT) e fosfato monoamônio (MAP). Em contato com o solo esses fosfatos são rapidamente dissolvidos, podendo ser absorvido pelas plantas ou serem transformados em formas não lábeis. Além dos fosfatos acidulados, tem-se os fosfatos naturais ou reativos, fontes alternativas que apresentam menores quantidades de P solúvel, mas com efeito residual que pode variar de acordo com o material de origem e manejo de aplicação.

Uma maneira de aumentar o aproveitamento do P proveniente dos fosfatos naturais seria sua aplicação com fontes solúveis no mesmo grânulo, visando a solubilização do fosfato natural através da acidez gerada pela hidrólise do fosfato solúvel no solo. No entanto, em função da rápida dissolução do fosfato solúvel, a solubilização do fosfato natural pode não ocorrer como esperado (MOKWUNYE; CHIEN, 1980; CHIEN et al., 1996; FRANZINI et al., 2009), assim a adição de enxofre elementar ( $S^0$ ) é uma possível forma de aumentar a eficiência dessa associação. O  $S^0$  é oxidado por microrganismos no solo a sulfato ( $SO_4^{2-}$ ) e essa reação poderia gerar acidez capaz de solubilizar o fosfato. Além disso, esta associação aumentaria a disponibilização de S para as plantas (VITTI; OTTO; SAVIETO, 2015; CÉSAR, 2016).

Assim como o P, o S desempenha funções essenciais no desenvolvimento e na qualidade das plantas, desde a participação de aminoácidos, proteínas, fotossíntese,

controle hormonal e mecanismos de defesa contra patógenos. As saídas deste elemento nos solos agricultáveis estão relacionadas a diversos fatores como: redução do uso de fertilizantes contendo S em sua composição ou uso de fórmulas com baixa concentração; intensificação dos sistemas de produção com variedades de alto rendimento e que removem grandes quantidades de S; lixiviação, erosão, emissão de gases sulfurados no ambiente; e, elevação dos custos de produção e transporte de fontes convencionais, como o gesso agrícola. Este cenário tem proporcionado nos últimos anos um número crescente de produtos com S<sup>0</sup> incorporados a fertilizantes fosfatados (VITTO; OTTO; SAVIETO, 2015; CÉSAR, 2016).

Considerando que a utilização de fontes de P com fontes de S podem resultar em fertilizantes que permite melhor aproveitamento do P pela cultura (além de fornecer S) do que as fontes convencionais, este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito agrônômico da aplicação no sulco de plantio de fosfatos acidulados, fosfatos naturais e fontes de enxofre na cana-de-açúcar, em cana planta e cana soca.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Delineamento experimental

O delineamento experimental de ambos os testes de campo foi em blocos casualizados (DBC), com quatro repetições. Os tratamentos consistiram da aplicação de diferentes fontes de P e S aplicados apenas no sulco de plantio (Tabela 1).

**Tabela 1.** Tipo de fertilizante, quantidade dos nutrientes e das fontes fornecidas ao solo em cada tratamento.

Tratamento	Fonte de P	Dose			
		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg ha <sup>-1</sup> )	Fonte de P (kg por parcela)	S (kg ha <sup>-1</sup> )	Fonte de S (kg por parcela)
Testemunha	-	0	0	0	0
2	SFT	120	2,93	0	0
3	SFT + S <sup>0</sup>	120	2,93	40	0,5
4	SFT + Gesso	120	2,93	40	3,0
5	MAP + S <sup>0</sup>	120	2,81	40	0,5
6	MAP + Gesso	120	2,81	40	3,0
7	FNR Bayovar + S <sup>0</sup>	120	4,65	40	0,5
8	FNR Bayovar + Gesso	120	4,65	40	3,0
9	FN Baixa Reatividade <sup>1</sup> + SFT + S <sup>0</sup>	120	6,42	57	6,4
10	FN Alta Reatividade <sup>2</sup> + SFT + S <sup>0</sup>	120	7,10	75	7,1

<sup>1</sup>Rocha de Catalão (GO/BR); <sup>2</sup>Rocha Bayóvar (Perú).

Os tratamentos SFT, MAP e FNR Bayóvar foram misturados fisicamente com gesso e enxofre elementar pastilha (S<sup>0</sup>), antes da aplicação. Os tratamentos FN Baixa e Alta Reatividade + SFT e S<sup>0</sup> tinham o S<sup>0</sup> incorporado ao grânulo e deste modo as doses de S foram proporcionais a dose de fósforo estabelecida.

As parcelas experimentais foram compostas por cinco linhas de 10 m de comprimento (75 m<sup>2</sup>) espaçadas em 1,5 m (Figura 1A) entre si e 2 m nas cabeceiras (Figura 1B) e nas laterais (Figura 1C).



Figura 9A

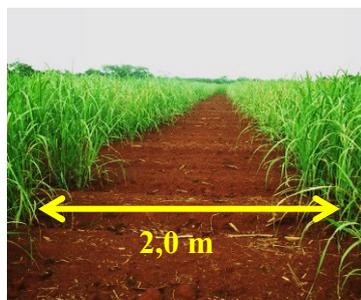


Figura 9B

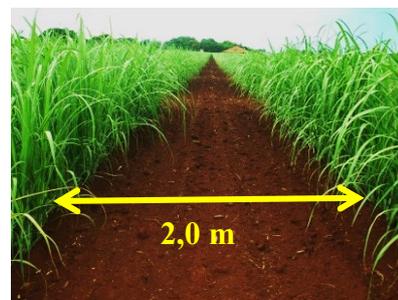


Figura 9C

**Figura 1.** Detalhe das parcelas experimentais (cana planta), em ambos os locais (Ouroeste e São Paulo).

## 2.2.Instalação

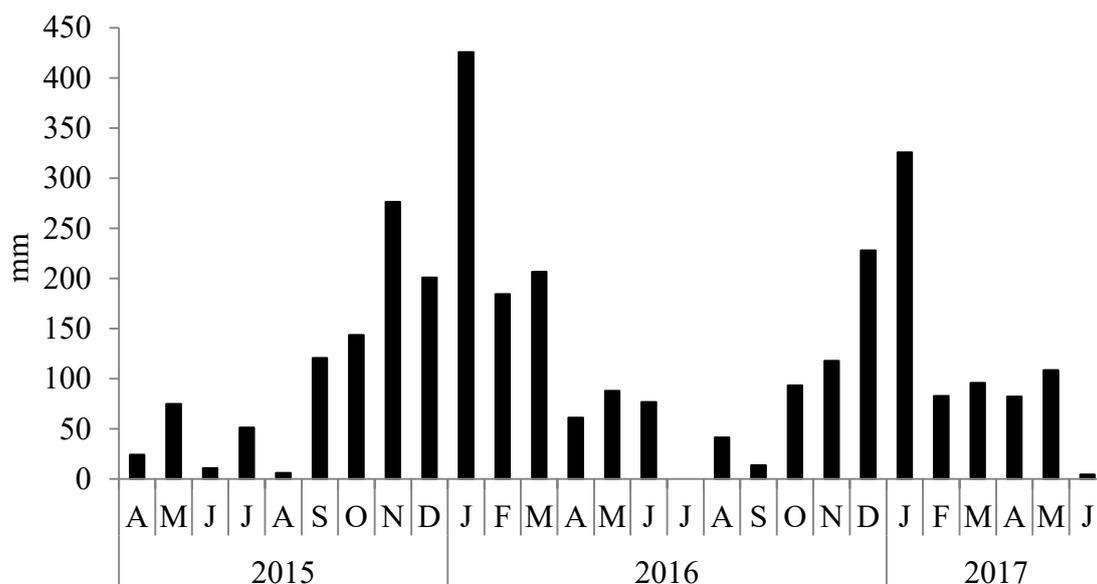
Dois experimentos visando o estudo do uso de fontes de P e S em cana-de-açúcar foram conduzidos entre os anos de 2015 a 2016 (primeiro ano, cana planta) e de 2016 a 2017 (segundo ano, cana soca) em condições de campo nos estados de São Paulo e Minas Gerais.

O primeiro experimento foi instalado em parceria com a Usina Bunge, Unidade Ouroeste, em área experimental de produção comercial (Sítio Joaquim) de cana-de-açúcar, localizada no município de Ouroeste-SP (Figura 2). O local é para uso experimental e a área selecionada recebeu aplicação de calagem e gessagem um anos antes do plantio.



**Figura 2.** Local de instalação do experimento em área comercial pertencente a Usina Bunge, Sítio Joaquim, Ouroeste, SP.

Durante os dois anos de condução do experimento, esta área apresentou precipitação pluviométrica acumulada de 1795 e 1586 milímetros, médias mensais de 119 e 132 milímetros de chuva no período de cultivo da cana planta e soca, respectivamente (Figura 3).



**Figura 3.** Precipitação pluviométrica mensal acumulada da região de Ouroeste, no período entre abril de 2015 e junho de 2017 (Fonte: INMET, 2018).

O solo da área é classificado como Latossolo Vermelho de textura média (EMBRAPA, 2009b), cujas características químicas e físicas das camadas de 0 a 20 e de 20 a 40 cm de profundidade são apresentadas na tabela 2.

**Tabela 2.** Propriedades químicas e físicas do solo da área experimental no momento da instalação do experimento, Sítio Joaquim, Usina Bunge, Ouroeste-SP.

Profun	pH CaCl <sub>2</sub>	P-Res	S	K	Ca	Mg	H+Al	CTC	V	MO
		---mg dm <sup>-3</sup> ---				-----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----			--%--	dag kg <sup>-1</sup>
0-20	5,1	26,6	8,0	0,05	1,8	0,7	1,60	4,15	61,4	1,8
20-40	4,9	16,4	17,0	0,04	1,6	0,6	1,70	3,94	56,9	1,3
Areia Total			Silte			Argila				
-----g kg <sup>-1</sup> -----										
762			13			225				

Ca, Mg = (KCl 1 mol L<sup>-1</sup>); H+Al = acidez potencial (Acetato de cálcio); V= Saturação por bases.

O plantio foi realizado em junho de 2015 em área não irrigada de forma manual com a distribuição de 5-10 gemas sadias por m<sup>-1</sup>, variedade CTC 15, na profundidade de 35 - 40 cm. As mudas receberam um tratamento térmico (30 min a 52° C), em banho maria visando eliminar chances de raquitismo. Esta variedade destaca-se por ser resistente ao estresse hídrico, porém pode florescer, apresenta boa produtividade, maturação média-tardia e se adapta aos ambientes mais restritivos (SESSO, 2014).

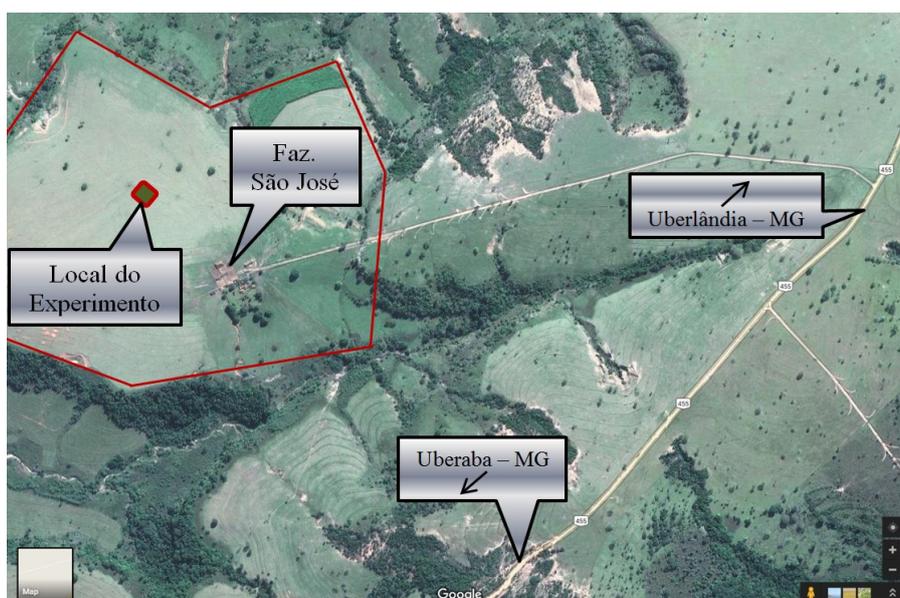
A adubação de plantio utilizada foi de 285 kg ha<sup>-1</sup> do formulado 09-00-00 + 1% Zn e no quebra lombo 340 kg ha<sup>-1</sup> do formulado 10-00-40. No cobridor foi utilizado

Regente ( $0,1 \text{ kg ha}^{-1}$ ), Comet ( $0,5 \text{ L ha}^{-1}$ ) e Biozyme  $0,5 \text{ L ha}^{-1}$ . A aplicação dos tratamentos foi realizada na data do plantio visando a comparação das fontes, manualmente, em linha no fundo e na lateral do sulco de plantio, imediatamente antes do plantio da cana planta, conforme apresentado na figura abaixo (Figura 4).



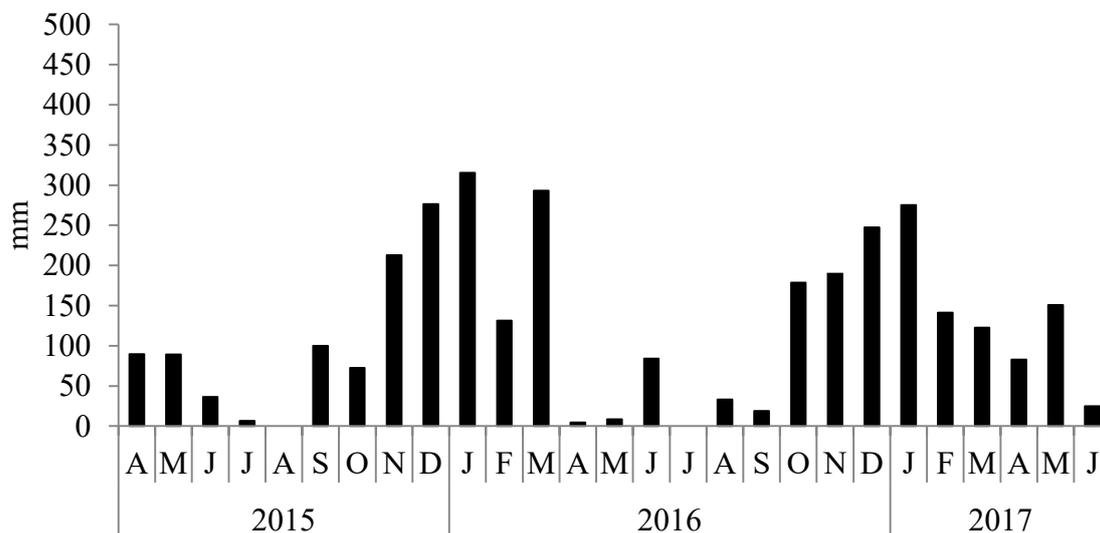
**Figura 4.** Detalhe da aplicação das fontes de P e S no sulco de plantio, após sulcação (sulcos de 35-40 cm de profundidade), Ouroeste-SP.

O segundo experimento foi instalado em parceria com a Companhia Mineira de Açúcar e Álcool (CMAA), em área de produção comercial de cana-de-açúcar, localizada no município de Uberaba-MG (Figura 5). O local selecionado para instalação do experimento apresentava-se com pastagem (área de expansão), sem nenhum cultivo antecedendo a cana-de-açúcar.



**Figura 5.** Local de instalação do experimento em área comercial pertencente a CMAA, Fazenda São José, Uberaba, MG.

Durante os dois anos de condução do experimento, esta área apresentou precipitação pluviométrica acumulada de 1651 e 1525 milímetros, médias mensais de 110 e 127 milímetros de chuva no período de cultivo da cana planta e soca, respectivamente (Figura 6).



**Figura 6.** Precipitação pluviométrica mensal acumulada da região de Uberaba, no período entre abril de 2015 e junho de 2017 (Fonte: INMET, 2018).

O solo da área é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo de textura média (EMBRAPA, 2009b), cujas características químicas e físicas das camadas de 0 a 20 e de 20 a 40 cm de profundidade são apresentadas na tabela 3.

**Tabela 3.** Propriedades químicas e físicas do solo da área experimental no momento da instalação do experimento, Fazenda São José, CMAA, Uberaba, MG.

Profun	pH CaCl <sub>2</sub>	P-Res	S	K	Ca	Mg	H+Al	CTC	V	MO
		--mg dm <sup>-3</sup> --				-----cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----			--%--	dag kg <sup>-1</sup>
0-20	5,2	11,7	3,0	0,12	1,7	0,6	2,20	4,62	52,4	1,5
20-40	4,5	7,1	3,0	0,09	1,2	0,3	1,90	3,49	45,6	1,3
Areia Total			Silte			Argila				
-----g kg <sup>-1</sup> -----										
788			12			200				

Ca, Mg = (KCl 1 mol L<sup>-1</sup>); H+Al = acidez potencial (Acetato de cálcio); V= Saturação por bases.

O plantio foi realizado em maio de 2015 em área não irrigada, mecanicamente, com a distribuição de 22 gemas sadias por m<sup>-1</sup> via distribuidora de cana (antoniose), variedade RB 92-579, na profundidade de 35 a 40 cm. Esta variedade apresenta ótima brotação na planta e na soca, alto perfilhamento, floresce pouco e com velocidade lenta

de crescimento e maturação média (outubro a janeiro). Resistente à ferrugem marrom e ao carvão, resistência intermediária à escaldadura das folhas e à podridão vermelha e tolerante à cigarrinha da folha (RIDESA, 2010).

A adubação de plantio utilizada foi de 25 kg ha<sup>-1</sup> de N e no quebra lombo foi aplicado 400 kg ha<sup>-1</sup> do formulado 10-00-40. No cobridor foi utilizado Regente (0,25 kg ha<sup>-1</sup>) e Comet (0,5 L ha<sup>-1</sup>). A aplicação dos tratamentos foi realizada na data do plantio, manualmente, em linha no fundo e na lateral do sulco de plantio, imediatamente antes do plantio da cana planta (Figura 7).



**Figura 7.** Detalhe da aplicação das fontes de P e S no sulco de plantio, após sulcação (sulcos de 35-40 cm de profundidade), Uberaba-MG.

### 2.3. Avaliações

Aos 100 DAI (dias após a instalação) e aos 500 DAI foram realizadas contagem de perfilhos e a análise de falha (espaço maior que 49 cm sem cana nascida) em todas as linhas de cada bloco experimental (Figura 8).



**Figura 8.** Análise de perfilho e falha, em ambos os locais (Ouroeste e São Paulo).

Aos 300 DAI para as avaliações de cana planta e aos 540 DAI para cana soca foram realizadas coletas de amostras de folha para a análise de P, Ca, Mg e S em cada experimento. Cada amostra foi composta pelo terço médio de 10 folhas (primeira folha

da planta com o dewlap visível) e posteriormente foram retiradas a nervura central de cada folha, acondicionando-as em sacos de papel e submetidas a secagem em estufa de circulação de ar, a 65 °C, até peso constante. Após seco, o material foi moído em moinho tipo Willey, sendo posteriormente submetido à análise laboratorial seguindo metodologia descrita pela EMBRAPA (2009a).

No momento da colheita da cana planta (12 meses/primeiro corte) e cana soca (12 meses/segundo corte), foi realizado o corte da cana crua manualmente de nove metro lineares (Figura 9A), sem falha, das três linhas centrais da parcela, despontada (retirada das folhas do colmo) e em seguida pesada com o auxílio de um tripé acoplada a uma balança (Figura 9B) para determinação do peso de cada uma das parcelas (Figura 9C). O peso de colmos obtido foi extrapolado para  $t\ ha^{-1}$ , resultando nos valores de TCH (tonelada de colmos por hectare). Em ambos os experimentos a cana foi colhida 12 meses após o plantio e 11 meses após o primeiro corte.



Figura 9A



Figura 9B



Figura 9C

**Figura 9.** Detalhe do corte e pesagem das parcelas experimentais, em ambos os locais (Ouroeste e São Paulo).

Além disso, foram retirados 10 colmos cortados em cada uma das parcelas, amostrando o material colhido para envio ao laboratório e determinação dos parâmetros tecnológicos. O material coletado foi submetido à análise no laboratório das usinas para obtenção dos resultados de Açúcar Teórico Recuperado (ATR) ( $kg\ TC^{-1}$ ), Pol e Fibra da cana (%) segundo metodologia descrita por COPERSUCAR (1980) e CONSECANA (2006). 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.

Após data de cada colheita (400 e 775 dias após aplicação) foram retiradas amostras de solo nas camadas de 0 a 20 e 20 a 40 cm de profundidade. As coletas foram realizadas com auxílio de um trado acoplado em um motor a gasolina, amostrando-se um ponto em cada uma das cinco linhas da parcela para cada amostra composta (Figura 10).



**Figura 10.** Detalhe da amostragem de solo na linha da parcela com auxílio de um trado acoplado em um motor a gasolina na profundidade de 0 a 20 e 20 a 40 cm.

As amostras, depois de homogeneizadas foram secas ao ar e posteriormente submetidas à análise de P (extraído com Mehlich1 e Resina), Ca, Mg, S e pH ( $\text{CaCl}_2$   $0,01 \text{ mol L}^{-1}$ ), seguindo metodologia descrita pela EMBRAPA (2009a) e Raij et al. (2001).

#### **2.4. Análises estatísticas**

Inicialmente, para cada experimento realizaram-se os testes de pressuposições do modelo: normalidade dos resíduos (teste de Shapiro-Wilk, à 0,01 de significância) e homogeneidade das variâncias (teste de Levene, à 0,01 de significância), utilizando o software SPSS 17.0 (SPSS, 2008).

Depois de testada as pressuposições submeteu-se os resultados às análises de variância e sendo o teste F significativo, as médias dos tratamentos foram comparadas pelo teste de Tukey a 0,05 de significância com a utilização do programa estatístico SISVAR (FERREIRA, 2014), e cada tratamento comparado com a testemunha pelo teste de Dunnett a 0,05 de significância com auxílio do programa estatístico ASSISTAT versão 7.6 beta (SILVA, 2016). Além disso, visando comparar o efeito da mistura de fosfatos acidulados, fosfatos naturais e fontes de enxofre, realizou-se a análise de contraste entre os tratamentos com o teste de Scheffé a 0,05 de significância com auxílio do programa estatístico SISVAR (FERREIRA, 2014).

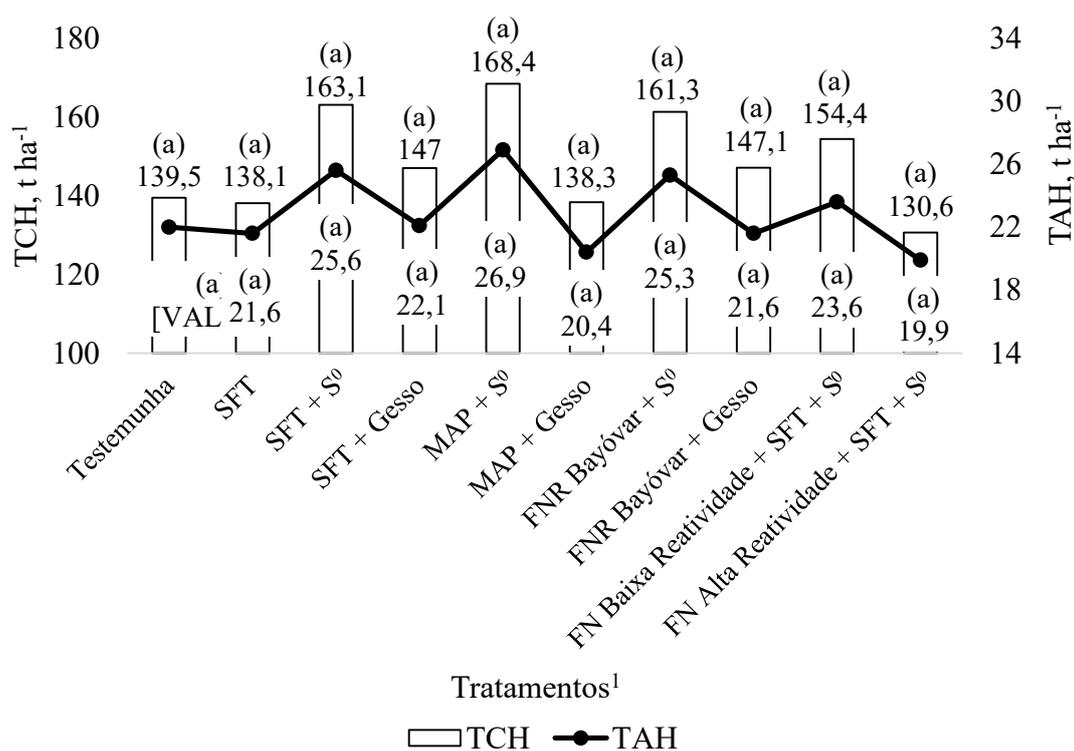
### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Usina Bunge – Experimento 1

##### 3.1.1. Cana planta

300 dias após aplicação de fontes de P e S no sulco de plantio da cana-de-açúcar não houve diferenças significativas sobre perfilhamento, altura de plantas e diâmetro de colmos. Observa-se que na média havia 11,3 perfilhos por metro (m), 2,5 m de altura e 26,7 cm de diâmetro. Diferente do observado neste trabalho, Kumar; Goyal; Kambooj (2011) ao avaliar aplicação de S<sup>0</sup> e gesso em cana-de-açúcar em dois locais na Índia verificaram incrementos sobre perfilhamento, altura de plantas e diâmetro de colmos quando comparado com a testemunha.

Do mesmo modo, não houve diferenças estatísticas entre os tratamentos nas variáveis, produção de colmos (TCH) e açúcar (TAH), o qual apresentaram médias de 149,0 t ha<sup>-1</sup> de TCH e 23,4 t ha<sup>-1</sup> de TAH (Figura 11).



TCH: CV(%): 20,6; DMS (Dunnett): 43,28; TAH: CV(%): 18,1; DMS (Dunnett): 8,54; <sup>1</sup>Médias seguidas por letras distintas em cada variável diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância; \*Médias diferentes da testemunha em cada variável por Dunnett (P<0,05);

**Figura 11.** Produção de colmos (TCH) e de açúcar (TAH) (Primeiro Corte, 2016) da cana planta, em função da aplicação de diferentes fertilizantes fosfatados contendo S no plantio da cana-de-açúcar (variedade CTC 15), Usina Bunge, Ouroeste – SP.

As concentrações de P, S, Ca e Mg foliar também não diferiram entre os tratamentos avaliados, os quais apresentaram médias de 1,8; 2,2; 5,8 e 2,8 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Observou-se que as concentrações de P e Ca na folha estiveram abaixo dos valores de referência citados por Martinez et al. (1999), entre 2,1 a 2,5 g kg<sup>-1</sup> de P e 9,4 a 11,5 g kg<sup>-1</sup> de Ca. Porém, segundo Raij et al. (1997), as concentrações estariam na faixa adequada de 1,5 a 3 g kg<sup>-1</sup> de P e 2 a 8 g kg<sup>-1</sup> de Ca. Diferente do observado para P e Ca, percebeu-se que para as concentrações de S e Mg, os valores estiveram entre a faixa adequada de 1,3 a 2,8 g kg<sup>-1</sup> de S e 2,2 a 4,5 g kg<sup>-1</sup> de Mg segundo Martinez et al. (1999) e de 1,5 a 3,0 g kg<sup>-1</sup> de S e 1 a 3 g kg<sup>-1</sup> de Mg segundo Raij et al. (1997).

As variáveis tecnológicas (Fibra, Pol da cana e Açúcar Teórico Recuperável) avaliadas na cana planta não foram alteradas pela aplicação dos tratamentos, os quais apresentaram média na ordem de 12,1% de fibra, 15,1 % de Pol da cana e 130,2 kg açúcar TC<sup>-1</sup>. Corroborando com esses resultados Hamid (2014), ao avaliar aplicação de S na forma de sulfato, não verificou diferenças sobre a qualidade da cana (Fibra, Pol da cana e ATR) em três anos de cultivo em um solo argiloso no Sudão.

O teor de fibra variou entre 12,3 e 12,7% considerado dentro do nível adequado conforme Fernandes (2003), que devem variar de 10 a 13%. É importante considerar os teores de fibra, pois segundo Lavanholi (2010), o balanço energético da indústria depende do teor de fibra devido sua queima nas caldeiras gerar vapor, que resultará em energia elétrica para abastecimento da própria usina e venda do excedente.

A média de Pol% foi de 15,1%, o que de acordo com Almeida et al. (2005) é acima do valor mínimo de 13,0% exigido pela indústria, já que sob uma perspectiva econômica e dentro da prática agrônômica, a cana é considerada madura, ou em condição de ser industrializada quando apresentar teor mínimo de sacarose (Pol% da cana) acima de 12,275% do peso do colmo, que representa a porcentagem aparente de sacarose contida numa solução de açúcares (FERNANDES, 2000; DEUBER, 1988).

Esses resultados se assemelham aos de Pereira et al. (1995) que não encontraram resposta da adubação fosfatada nas características tecnológicas de cana-de-açúcar. Segundo os autores, fatores como clima, variedades e manejo do solo exercem influência sobre as características tecnológicas da cana-de-açúcar, dificultando a avaliação do efeito dos fertilizantes sobre esses parâmetros.

Não houve mudanças e incrementos significativos nos valores de pH, S, Ca e Mg do solo, nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm, o qual apresentaram médias de 4,7 e 4,5 pH CaCl<sub>2</sub>; 11,4 e 14,3 mg dm<sup>-3</sup> de S; 1,8 e 1,7 cmol<sub>c</sub>dm<sup>-3</sup> de Ca e 0,4 e 0,3 cmol<sub>c</sub>dm<sup>-3</sup>

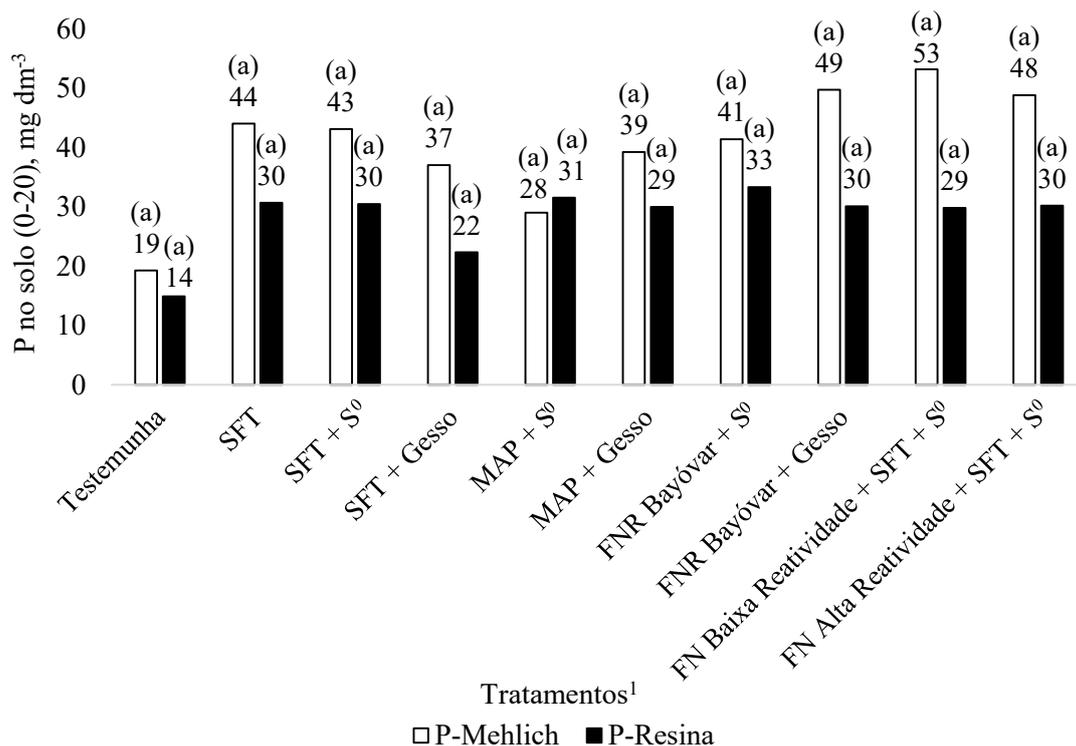
<sup>3</sup> de Mg (Tabela 4). Porém, percebeu-se que o tratamento FNR Bayóvar + Pastilha S apresentou teor de Mg na profundidade 20 a 40 cm superior a testemunha.

**Tabela 4.** pH, S, Ca e Mg do solo (0-20 cm e 20-40 cm), 400 dias após a aplicação de diferentes fertilizantes fosfatados contendo S no plantio da cana-de-açúcar (variedade CTC 15), Usina Bunge, Ouroeste – SP.

Tratamentos	pH	S	Ca	Mg
	CaCl <sub>2</sub>	mg dm <sup>-3</sup>	--- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ---	---
Profundidade 0 – 20 cm				
Testemunha	4,72	5,5	1,78	0,42
SFT	4,67	9,2	1,80	0,42
SFT + S <sup>0</sup>	4,81	10,5	1,68	0,39
SFT + Gesso	4,83	15,5	1,91	0,42
MAP + S <sup>0</sup>	4,78	6,5	1,74	0,45
MAP + Gesso	4,57	13,5	1,77	0,35
FNR Bayóvar + S <sup>0</sup>	4,73	21,0	1,82	0,46
FNR Bayóvar + Gesso	4,86	11,0	1,88	0,36
FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup>	4,65	14,0	1,89	0,39
FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup>	4,83	7,7	1,92	0,48
Médias	4,7	11,4	1,8	0,4
CV	3,96	73,0	9,04	17,95
DMS (Dunnett)	0,38	17,0	0,33	0,15
Profundidade 20 – 40 cm				
Testemunha	4,52	5,7	1,65	0,31
SFT	4,55	8,2	1,51	0,36
SFT + S <sup>0</sup>	4,66	11,5	1,63	0,37
SFT + Gesso	4,70	17,2	1,72	0,34
MAP + S <sup>0</sup>	4,60	8,0	1,49	0,34
MAP + Gesso	4,45	14,5	1,62	0,29
FNR Bayóvar + S <sup>0</sup>	4,71	18,5	1,86	0,46 *
FNR Bayóvar + Gesso	4,46	21,7	2,10	0,22
FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup>	4,53	28,2	1,69	0,32
FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup>	4,62	9,5	1,78	0,38
Médias	4,5	14,3	1,7	0,3
CV	4,96	89,4	22,97	18,41
DMS (Dunnett)	0,46	26,07	0,79	0,12

<sup>1</sup> Médias seguidas por letras distintas nas colunas diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância; \*Médias diferentes da testemunha por Dunnett (P<0,05);

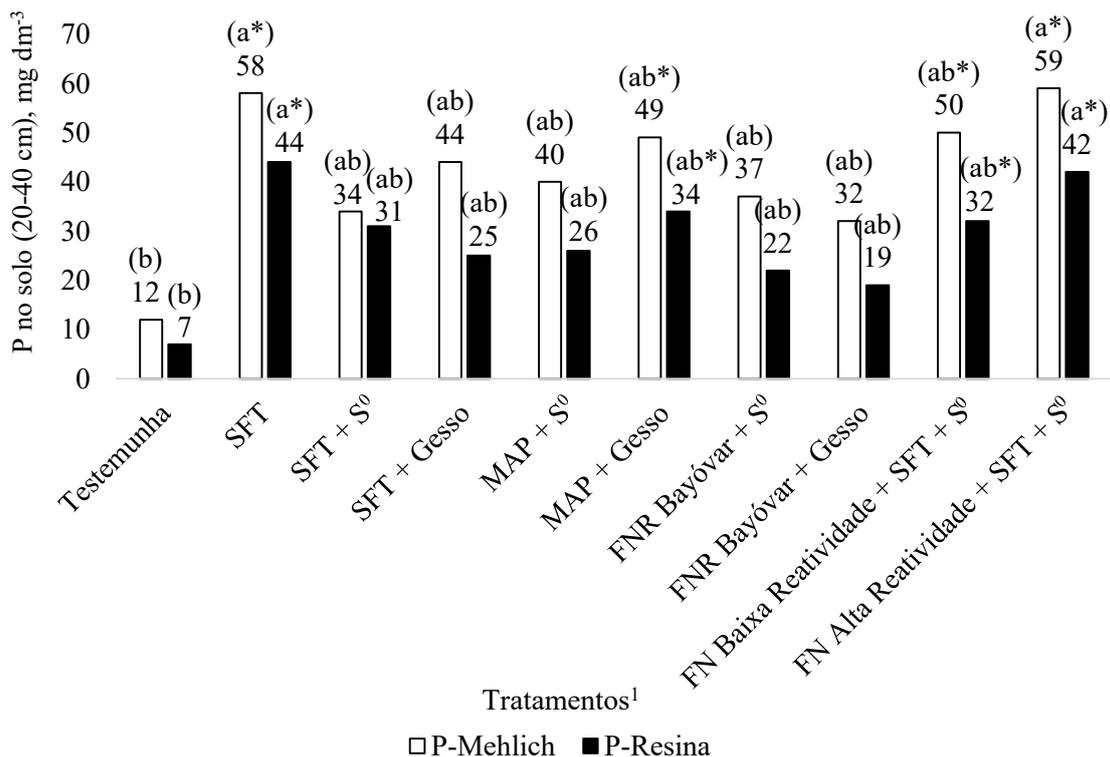
Os teores de P no solo (extrator Mehlich1 e Resina) encontrados aos 0 a 20 cm de profundidade não diferiram entre os tratamentos, com média na ordem de 40,2 mg dm<sup>-3</sup> de P extraídos por Mehlich1 e 28,1 mg dm<sup>-3</sup> de P extraídos por Resina (Figura 12).



P-Mehlich: CV(%): 46,1; DMS (Dunnett): 37,98; P-Resina: CV(%): 58,6; DMS (Dunnett): 33,8; <sup>1</sup>Médias seguidas por letras distintas em cada variável diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância; \*Médias diferentes da testemunha em cada variável por Dunnett (P<0,05);

**Figura 12.** Teores de P do solo (0-20 cm) extraídos por Mehlich1 e Resina, 400 dias após a aplicação de diferentes fertilizantes fosfatados contendo S no plantio da cana-de-açúcar (variedade CTC 15), Usina Bunge, Ouroeste – SP.

Na profundidade de 20 a 40 cm, os teores de P foram superiores a testemunha com os tratamentos SFT, MAP + Gesso, FN de baixa reatividade + SFT + S<sup>0</sup> e FN de alta reatividade + SFT + S<sup>0</sup> (Figura 13). Segundo Alvarez et al. (1999), os teores de P no solo em ambas as profundidades se apresentam em sua maioria no nível considerado “MUITO BOM” (> 18 mg dm<sup>-3</sup>), “BOM” (12,1 - 18 mg dm<sup>-3</sup>) e “MÉDIO” (8,1 - 12 mg dm<sup>-3</sup>).



P-Mehlich: CV(%): 43,0; DMS (Dunnett): 36,43; P-Resina: CV(%): 41,7; DMS (Dunnett): 24,06;  
<sup>1</sup>Médias seguidas por letras distintas em cada variável diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância; \*Médias diferentes da testemunha em cada variável por Dunnett (P<0,05);

**Figura 13.** Teores de P do solo (20-40 cm) extraídos por Mehlich1 e Resina, 400 dias após a aplicação de diferentes fertilizantes fosfatados contendo S no plantio da cana-de-açúcar (variedade CTC 15), Usina Bunge, Ouroeste – SP.

Esses resultados corroboram com os de César (2016) ao observar resultados satisfatórios sobre os teores de P em um solo de textura média com a aplicação de rocha de bayóvar associada com S<sup>0</sup> e MAP ou SFT antes do plantio de soja. Wiedenfeld (2011) verificou incremento nos teores de P (profundidade 0 a 15 cm) no solo em três cortes de cana, ao avaliar aplicação de S<sup>0</sup> em solo alcalino no Texas.

Ao avaliar a associação no mesmo grânulo de fosfato natural de Jacupiranga com SFT, Nachtigall et al. (1989) não verificaram aumento na disponibilidade de P no solo cultivado com milho.

Os fosfatos naturais proporcionaram incremento nos teores de P no solo semelhantes às fontes aciduladas. Esse comportamento pode ser justificado devido à solubilização da fração do fosfato totalmente acidulado presente nos fosfatos naturais. Além disso, essa fração solúvel forma uma solução ácida na região do grânulo do fosfato natural durante sua dissolução podendo facilitar sua solubilização (CHIEN, 1996; CÉSAR, 2016). A aplicação conjunta de fosfatos de rocha com uma fonte de

elevada solubilidade em água pode apresentar eficiência equivalente à dos superfosfatos (OLIVEIRA JUNIOR, 2007).

O estudo do efeito de fontes de P misturadas com fontes S sobre TCH e TAH encontra-se na tabela 5. A mistura de SFT, MAP e FNR Bayóvar com S<sup>0</sup> antes do plantio apresentou resultados positivos quando comparados com o SFT e quando comparados com a mistura de SFT, MAP e FNR Bayóvar com Gesso (Tabela 5). O incremento médio dos fosfatos misturados com S<sup>0</sup> em relação ao SFT foi de 26,1 t ha<sup>-1</sup> de TCH. Já quando comparado com os fosfatos misturados com gesso, o incremento médio dos fosfatos misturados com S<sup>0</sup> foi de 60,4 t ha<sup>-1</sup> de TCH e 14,0 t ha<sup>-1</sup> de TAH.

**Tabela 5.** Análise de contrastes de TCH e TAH da cana planta, para avaliar o efeito da aplicação de fertilizantes fosfatados misturados com fontes de S aplicados no plantio da cana-de-açúcar (variedade CTC 15), Usina Bunge, Ouroeste – SP.

Contrastes	TCH	TAH
	----- t ha <sup>-1</sup> -----	
SFT	138,1	
<b>vs</b>	<b>x</b>	ns
(SFT + S <sup>0</sup> ) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (FNR Bayóvar + S <sup>0</sup> )	(163,1) + (168,4) + (161,3)*	
SFT		
<b>vs</b>	ns	ns
(SFT + Gesso) + (MAP + Gesso) + (FNR Bayóvar + Gesso)		
(SFT + S <sup>0</sup> ) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (FNR Bayóvar + S <sup>0</sup> )	(163,1) + (168,4) + (161,3)	(25,6) + (26,9) + (25,6)
<b>vs</b>	<b>x</b>	<b>x</b>
(SFT + Gesso) + (MAP + Gesso) + (FNR Bayóvar + Gesso)	(147,0) + (138,3) + (147,1)*	(22,1) + (20,4) + (21,6)*
(SFT + S <sup>0</sup> ) + (SFT + Gesso) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (MAP + Gesso)		
<b>vs</b>	ns	ns
(FNR Bayóvar + S <sup>0</sup> ) + (FNR Bayóvar + Gesso)		

\* significativo pelo teste de Scheffé a 0,05 de significância; ns: não significativo.

Esses resultados corroboram com os observados por Kumar; Goyal; Kambooj (2011), que ao avaliar aplicação de S<sup>0</sup> e gesso em cana-de-açúcar em dois locais na Índia, não verificaram aumento significativo de produtividade.

Hamid (2014) ao avaliar aplicação de S na forma de sulfato não verificou diferenças estatísticas, mas verificou efeitos positivos da aplicação de S sobre a

produção de colmos e açúcar de duas variedades de cana, em três anos de cultivo em solo argiloso no Sudão.

Zavaschi (2014) não observou efeito da adubação fosfatada (superfosfato orgânico-complexado e superfosfato simples) na produtividade de colmos e acúmulo de massa seca de cana planta.

Nascimento (2016), ao avaliar aplicação de diferentes fosfatos (SFT, MAP, MAP+ S<sub>0</sub>, MAP + Ácido Húmico, Polifosfato e Fosforita) em cana, não verificou diferenças na produção de colmos da primeira e segunda safra, mesmo após reaplicação das fontes.

Caione (2011), ao avaliar a disponibilidade de P no solo pela aplicação de diferentes fontes de P (farinha de ossos, fosfato de Arad e superfosfato triplo) no sulco de plantio verificou que não houve diferença significativa na produtividade de cana planta, com uma produção média de 142 t ha<sup>-1</sup>.

Diferente de Wiedenfeld (2011), que verificou incremento de produção de colmos (cana planta e soca) e açúcar (cana soca) de cana, ao avaliar aplicação de S<sup>0</sup> em solo alcalino no Texas.

Dias et al. (2017), ao avaliar aplicação de S<sup>0</sup> (50; 100; 200; 400 kg ha<sup>-1</sup>), Gesso (1 e 2 t ha<sup>-1</sup>) e S<sup>0</sup> (100 kg ha<sup>-1</sup>) + Gesso (1 t ha<sup>-1</sup>) em três cortes de cana-de-açúcar (cana planta e cana soca) observaram que houve resposta na produção de colmos com o uso de S. 1 t ha<sup>-1</sup> de gesso agrícola correspondeu aos melhores resultados, porém, a dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> de S<sup>0</sup> também correspondeu positivamente.

Pereira et al. (1995), avaliando o efeito de níveis e resíduos de P em cana, verificaram que a adubação fosfatada proporcionou maior rendimento da cana e maiores concentrações foliares de P com as crescentes doses de P.

Simões Neto et al. (2009), estudando duas variedades na África do Sul, verificaram que a adubação fosfatada em um solo deficiente deste nutriente proporcionou aumento de produtividade e qualidade tecnológica da cana.

De acordo com Frandoloso et al. (2010), no Brasil, são poucas as pesquisas sobre o uso de enxofre elementar como fonte de nutrientes para as plantas. Horowitz (2003) observou que a incorporação de S-elementar na forma de pó adicionado ao superfosfato triplo apresentou eficiência agrônômica crescente em quatro cultivos consecutivos de milho.

Para os teores de P no solo (extrator Resina), o SFT mostrou-se superior aos tratamentos misturados com S<sup>0</sup> e com Gesso, profundidade 20 a 40 cm (Tabela 6). Os

baixos teores de P nestes tratamentos, podem ser justificados pelo maior TCH encontrado, resultado do melhor aproveitamento de P proveniente dos fosfatos misturados com S pela cana (Tabela 5). Por outro lado, esses tratamentos apresentaram maiores valores de S no solo quando comparado com o SFT, apesar de não ser observada diferença estatística (Tabela 6).

**Tabela 6.** Análise de contrastes sobre os teores de P e S do solo (0-20 e 20-40 cm), 400 dias após a aplicação de fertilizantes fosfatados misturados com fontes de S sobre os teores de P (extrator Mehlich-1 e Resina) e S no plantio da cana-de-açúcar (variedade CTC 15), Usina Bunge, Ouroeste – SP.

Contrastes	P-Mehlich1		P-Resina		S	
	----- mg dm <sup>-3</sup> -----					
	0 – 20 cm			20 – 40 cm		
SFT						44,3
<b>vs</b>						<b>x</b>
(SFT + S <sup>0</sup> ) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (FNR Bayóvar + S <sup>0</sup> )	ns	ns	ns	ns	(31,0) + (25,9)	ns
					+ (22,2)*	
SFT						44,3
<b>vs</b>						<b>x</b>
(SFT + Gesso) + (MAP + Gesso) + (FNR Bayóvar + Gesso)	ns	ns	ns	ns	(25,0) + (34,4)	ns
					+ (18,9)*	
(SFT + S <sup>0</sup> ) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (FNR Bayóvar + S <sup>0</sup> )	ns	ns	ns	ns	ns	ns
<b>vs</b>						
(SFT + Gesso) + (MAP + Gesso) + (FNR Bayóvar + Gesso)	ns	ns	ns	ns	ns	ns
(SFT + S <sup>0</sup> ) + (SFT + Gesso) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (MAP + Gesso)	ns	ns	ns	ns	ns	ns
<b>vs</b>						
(FNR Bayóvar + S <sup>0</sup> ) + (FNR Bayóvar + Gesso)	ns	ns	ns	ns	ns	ns

\* significativo pelo teste de Scheffé a 0,05 de significância; ns: não significativo.

Segundo Araújo; Salcedo (1997), a adição de S ao solo pode alterar as frações inorgânicas de P através do sulfato, diminuindo o número de sítios disponíveis e a energia de adsorção (BOLAN et al., 1988), ou seja, o sulfato favoreceria a movimentação do fosfato no solo por diminuir-lhe a retenção, consequentemente refletindo em maior acúmulo de P e produção de TCH (FRANDOLOSO et al., 2010). Embora a adsorção do fosfato seja pouco afetada pela presença do ânion SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> em condições de igualdade de concentração e pH acima de 6, em condições de pH mais baixo, por exemplo 4, a presença de sulfato na solução pode reduzir em até 30 vezes a adsorção de fosfato em superfícies de minerais com alta capacidade de adsorção como a goetita. Em pontos de alta concentração de S<sub>0</sub>, ambiente de baixo pH pode ser gerado, resultado da produção de ácido sulfúrico em seu processo de oxidação (GEELHOED;

HIEMSTRA; RIEMSDIJK, 1997; NASCIMENTO, 2016). Contudo, alguns estudos verificaram que a aplicação de fontes S com P não criaram um ambiente de solo mais ácido (KITAMS; ATTOE, 1965; EVANS; MCDONAL; PRICE, 2006; EVANS; PRICE, 2009).

Por outro lado, Cesár (2016), ao avaliar o efeito da aplicação de P e S em diferentes faixas de solo, observou que o  $\text{SO}_4^{2-}$  tendeu-se a acumular no ponto mais distante do de aplicação das fontes em função da competição do  $\text{SO}_4^{2-}$  pelos sítios de adsorção com o ânion  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ . Com a difusão do P dos fertilizantes, a maioria dos sítios disponíveis para a adsorção de ânions foi ocupada pelo  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , que possui maior afinidade para adsorção as partículas do solo do que o  $\text{SO}_4^{2-}$ , fazendo com que o sulfato migrasse de ponto mais distante da aplicação dos fertilizantes onde havia sítios disponíveis para sua adsorção (ALVAREZ et al., 2007).

Os resultados do estudo sobre o efeito da aplicação de fosfato natural (alta e baixa reatividade) + SFT +  $\text{S}^0$  estão apresentados nas tabelas 7 e 8.

**Tabela 7.** Análise de contrastes de TCH e TAH da cana planta, para avaliar o efeito de fertilizantes fosfatados produzidos com fosfato solúvel, insolúvel e enxofre elementar aplicados no plantio da cana-de-açúcar (Variedade CTC 15), Usina Bunge, Ouroeste – SP.

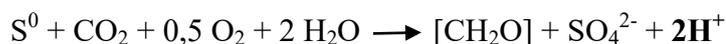
Contrastes	TCH	TAH
	----- t ha <sup>-1</sup> -----	
(SFT + $\text{S}^0$ ) + (SFT + Gesso) + (MAP + $\text{S}^0$ ) + (MAP + Gesso) <b>vs</b>	ns	ns
(FN Baixa Reatividade + SFT + $\text{S}^0$ ) + (FN Alta Reatividade + SFT + $\text{S}^0$ ) <b>vs</b>	ns	ns
(FNR Bayóvar + $\text{S}^0$ ) + (FNR Bayóvar + Gesso) <b>vs</b>	ns	ns
(FN Baixa Reatividade + SFT + $\text{S}^0$ ) + (FN Alta Reatividade + SFT + $\text{S}^0$ ) <b>vs</b>	(154,4) x (130,6)*	ns

\* significativo pelo teste de Scheffé a 0,05 de significância; ns: não significativo.

Percebeu-se que para TCH e S no solo (camada 20-40 cm) o fosfato natural de baixa reatividade + SFT +  $\text{S}^0$  foi mais eficiente que o fosfato natural de alta reatividade

+ SFT + S<sup>0</sup> (Tabela 7 e 8). Corroborando com esses resultados, Kumar et al. (2016) verificou maiores teores de S no solo e incrementos de TCH e TAH de cana cultivada em um solo argiloso da Índia ao avaliar aplicação de S via superfosfato simples e gesso.

Provavelmente o efeito de oxidação do S<sup>0</sup> no grânulo do fosfato de baixa reatividade aumentou sua solubilização. Para que a reação de solubilização dos fosfatos naturais ocorra, faz-se necessário a presença de prótons (H<sup>+</sup>) no meio. A reação de oxidação do S<sup>0</sup> a SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> no solo promove a liberação de prótons (H<sup>+</sup>) e consequente acidificação, ocorrendo da seguinte forma (SAIK, 1995; ALVAREZ-V et al, 2007; CÉSAR, 2012):



Ao observar-se o pH inicial do solo, 5,1 a 0-20 cm e 4,9 a 20-40 cm de profundidade, ambos os tratamentos demonstraram efeito de acidificação ao longo do primeiro cultivo. Entretanto, onde houve maior índice de acidificação a resposta foi mais acentuada. Esse efeito foi observado aos 400 dias após aplicação do FN de baixa reatividade + SFT + S<sup>0</sup>, onde o pH do solo foi mais baixo na camada 0-20 cm (pH 4,65) e 20-40 cm (pH 4,53) quando comparado com o FN de alta reatividade + SFT + S<sup>0</sup> (camada 0-20 cm: pH 4,83; camada 20-40 cm: pH 4,62).

Talvez o tamanho de partículas do fosfato natural de alta reatividade aliado à população reduzida de microrganismos no local tenha influenciado nas respostas deste tratamento. Além disso, fosfatos de rocha com baixa reatividade são mais eficientes que fosfatos de rocha reativo em pH mais baixo. Diversos fatores podem influenciar na eficiência dos fosfatos naturais, tais como: material de origem, tamanho das partículas, propriedades do solo, modo de aplicação, preparo do solo e cultura (HOROWITZ; MEURER, 2004).

Para os teores de P no solo, os fosfatos naturais de baixa e alta reatividade + SFT + S<sup>0</sup> mostraram-se superiores que o fosfato reativo Bayóvar + S<sup>0</sup> na profundidade de 20-40 cm (Tabela 8).

**Tabela 8.** Análise de contrastes sobre os teores de P e S do solo (0-20 e 20-40 cm), 400 dias após a aplicação de fertilizantes fosfatados produzidos com fosfato solúvel, insolúvel e enxofre elementar no plantio da cana-de-açúcar (variedade CTC 15), Usina Bunge, Ouroeste – SP.

Contrastes	----- mg dm <sup>-3</sup> -----					
	0 – 20 cm			20 – 40 cm		
(SFT + S <sup>0</sup> ) + (SFT + Gesso) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (MAP + Gesso) vs (FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> ) + (FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> )	ns	ns	ns	ns	ns	ns
SFT vs (FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> ) + (FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> )	ns	ns	ns	ns	ns	ns
(FNR Bayóvar + S <sup>0</sup> ) + (FNR Bayóvar + Gesso) vs (FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> ) + (FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> )	ns	ns	ns	(36,8) + (32,3) x (49,8) + (59,2)*	(22,2) + (18,9) x (31,7) + (41,8)*	ns
FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> vs FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup>	ns	ns	ns	ns	ns	(28,2) x (9,5)*

\* significativo pelo teste de Scheffé a 0,05 de significância; ns: não significativo.

César (2012) verificou que o S<sup>0</sup> promoveu aumento da solubilização do fosfato reativo de Gafsa e do fosfato natural de Patos de Minas quando aplicados juntos, aumentando a disponibilidade de P à partir dessas fontes. No entanto, Nachtigall et al. (1989) não verificaram aumento na disponibilidade de P no solo cultivado com milho ao aplicar o FN de Jacupiranga + SFT.

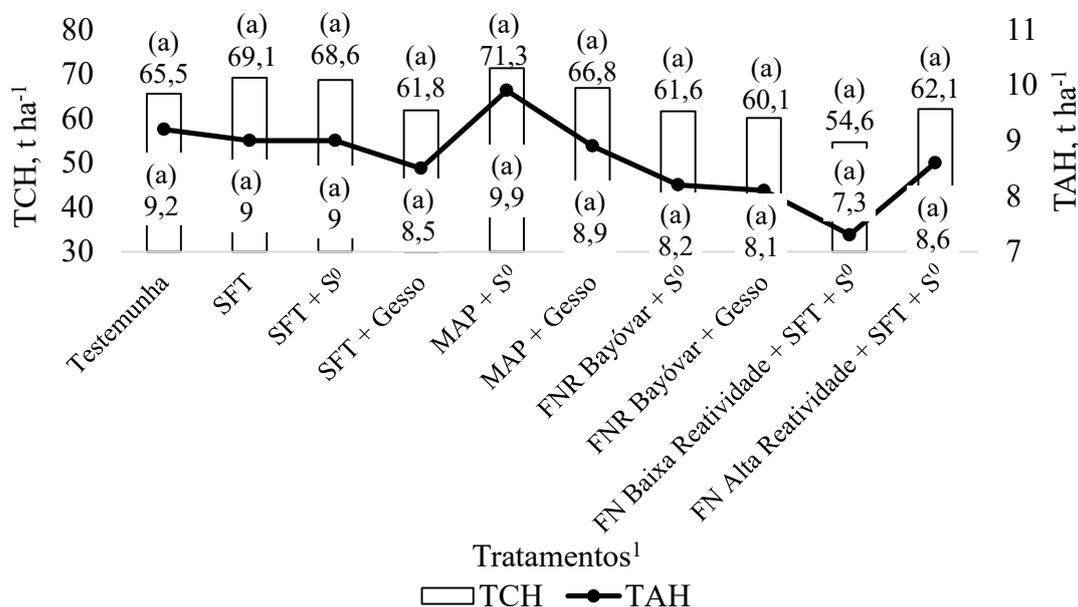
Os resultados observados com FN de baixa e alta reatividade + SFT + S<sup>0</sup> podem ser justificados devido a melhor eficiência de solubilização desses fosfatos quando comparado com o fosfato natural reativo Bayóvar. O fosfato solúvel presente nestas fontes forma uma solução ácida na região do grânulo durante o processo de dissolução o que facilitaria a solubilização do fosfato natural. E como citado anteriormente, a oxidação do S<sup>0</sup> presente no grânulo aumentaria ainda mais este processo (CHIEN, 1996; CÉSAR, 2016).

O tipo de rocha fosfática associada ao fosfato solúvel na composição do grânulo também tem importância, pois sua reatividade pode determinar a eficiência de solubilização e efeito residual do fosfato (LÉON et al., 1986). A aplicação conjunta de

fosfatos de rocha reativos ou não, com uma fonte de elevada solubilidade em água na grande maioria das vezes pode apresentar eficiência equivalente à dos superfosfatos (OLIVEIRA JUNIOR, 2007). Trabalhos científicos nesse sentido, já realizados, demonstraram eficiência agrônômica dos fosfatos naturais (alta ou baixa reatividade) associados com SFT, sendo equivalentes ou mais eficientes que os fosfatos totalmente acidulados (NACHTIGALL et al., 1989; CHIEN, 1996; PROCHNOW et al., 2004; OLIVEIRA JUNIOR, 2007; FRANZINI et al., 2009; CÉSAR, 2012 e 2016).

### 3.1.2. Cana soca

Na soqueira, os resultados de perfilhamento, altura de plantas, diâmetro de colmos, TCH e TAH não foram influenciados pelos tratamentos (Figura 23). O que se observou é que, na média, haviam 7,5 perfilhos por metro (m), 2,5 m de altura, 27,0 cm de diâmetro, 64,2 t ha<sup>-1</sup> de TCH e 8,7 t ha<sup>-1</sup> de TAH (Figura 14). Esses resultados diferem de Kumar; Goyal; Kambooj (2011) ao avaliar aplicação de S<sup>0</sup> e gesso em cana que verificaram incrementos nas variáveis de perfilhamento, altura de plantas e diâmetro de colmos.



TCH: CV(%): 20,6; DMS (Dunnett): 43,28; TAH: CV(%): 18,1; DMS (Dunnett): 8,54; <sup>1</sup>Médias seguidas por letras distintas em cada variável diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância; \*Médias diferentes da testemunha em cada variável por Dunnett (P<0,05);

**Figura 14.** Produção de colmos (TCH) e de açúcar (TAH) (Segundo corte, 2017) da cana soca, em função da aplicação de diferentes fertilizantes fosfatados contendo S no plantio da cana-de-açúcar (variedade CTC 15), Usina Bunge, Ouroeste – SP.

As concentrações de P, S, Ca e Mg foliar não diferiram entre os tratamentos avaliados, os quais apresentaram médias de 2,3; 1,5; 2,4 e 0,91 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Observou-se que as concentrações de Ca e Mg na folha estiveram abaixo dos valores de referência citados por Martinez et al. (1999), entre 9,4 a 11,5 g kg<sup>-1</sup> de Ca e 2,2 a 4,5 g kg<sup>-1</sup> de Mg. Porém, segundo Raij et al. (1997), as concentrações estariam na faixa adequada de 2 a 8 g kg<sup>-1</sup> de Ca e de 1 a 3 g kg<sup>-1</sup> de Mg. Para P e S as concentrações estão entre a faixa adequada de 2,1 e 2,5 g kg<sup>-1</sup> de P e 1,3 a 2,8 g kg<sup>-1</sup> de S, segundo Martinez et al. (1999) e também segundo Raij et al. (1997), 1,5 a 3 g kg<sup>-1</sup> de P e 1,5 a 3,0 g kg<sup>-1</sup> de S.

Para Fibra, Pol da cana e ATR, também não houve diferenças significativas, os quais apresentaram média na ordem de 12,8 % de fibra, 13,5 % de Pol da cana e 134,1 kg açúcar TC<sup>-1</sup>. Corroborando com esses resultados Hamid (2014) ao avaliar aplicação de S na forma de sulfato não verificou diferenças sobre a qualidade da cana (Fibra, Pol da cana e ATR) em três anos de cultivo em solo argiloso no Sudão.

O teor de fibra variou entre 12,3 e 12,7% considerado dentro do nível adequado conforme Fernandes (2003), que devem variar de 10 a 13%. O mesmo foi observado para média de Pol, o qual foi de 15,1%, o que de acordo com Almeida et al. (2005) é acima do valor mínimo de 13,0%. Esses resultados se assemelham aos de Pereira et al. (1995), que não encontraram resposta da adubação fosfatada nas características tecnológicas de cana-de-açúcar.

Percebeu-se que houve mudanças significativas nos valores de pH, S, Ca e Mg do solo, nas camadas de 0-20 e 20-40 cm (Tabela 9). Aos 775 dias após aplicação dos tratamentos, o FNR Bayóvar + Gesso mostrou-se mais eficiente do que a testemunha sobre os valores de pH, Ca e Mg em ambas as camadas. O SFT e FN de alta reatividade + SFT + S<sup>0</sup> também apresentaram elevados valores de pH e Ca no solo (Tabela 9).

**Tabela 9.** pH, S, Ca e Mg do solo (0-20 cm e 20-40 cm), 775 dias após a aplicação de diferentes fertilizantes fosfatados contendo S no plantio da cana-de-açúcar (variedade CTC 15), Usina Bunge, Ouroeste – SP.

Tratamentos	pH	S	Ca	Mg
	CaCl <sub>2</sub>	mg dm <sup>-3</sup>	--- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> ---	
Profundidade 0 – 20 cm				
Testemunha	4,50 ab	7,4 a	0,97 b	0,45 a
SFT	4,78 a*	7,0 a	1,39 ab*	0,54 a
SFT + S <sup>0</sup>	4,65 ab	12,8 a	1,31 ab	0,48 a
SFT + Gesso	4,62 ab	8,6 a	1,22 ab	0,51 a
MAP + S <sup>0</sup>	4,52 ab	20,9 a	1,10 ab	0,49 a
MAP + Gesso	4,58 ab	13,6 a	1,37 ab*	0,47 a
FNR Bayóvar + S <sup>0</sup>	4,63 ab	7,7 a	1,16 ab	0,46 a
FNR Bayóvar + Gesso	4,82 a*	8,7 a	1,42 ab*	0,48 a
FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup>	4,46 b	22,1 a*	1,07 ab	0,41 a
FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup>	4,74 ab*	7,1 a	1,49 a*	0,47 a
Médias	4,6	11,6	1,25	0,47
CV	2,8	69,9	17,0	15,1
DMS (Dunnett)	0,89	5,55	0,14	0,4
Profundidade 20 – 40 cm				
Testemunha	4,36 abc	9,8 a	0,60 b	0,24 a
SFT	4,76 ab*	8,1 a	1,12 ab*	0,32 a
SFT + S <sup>0</sup>	4,38 abc	21,6 a	1,19 ab*	0,30 a
SFT + Gesso	4,63 abc	16,0 a	1,07 ab*	0,25 a
MAP + S <sup>0</sup>	4,32 bc	32,6 a	0,83 ab	0,28 a
MAP + Gesso	4,58 abc	17,4 a	1,20 a*	0,22 a
FNR Bayóvar + S <sup>0</sup>	4,68 abc	11,7 a	1,05 ab*	0,31 a
FNR Bayóvar + Gesso	4,77 a*	21,8 a	1,35 a*	0,34 a*
FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup>	4,24 c	37,8 a*	0,92 ab	0,26 a
FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup>	4,73 ab*	14,5 a	1,34 a*	0,32 a
Médias	4,54	19,1	1,07	0,28
CV	4,0	80,9	22,8	17,1
DMS (Dunnett)	0,13	10,73	0,16	0,3

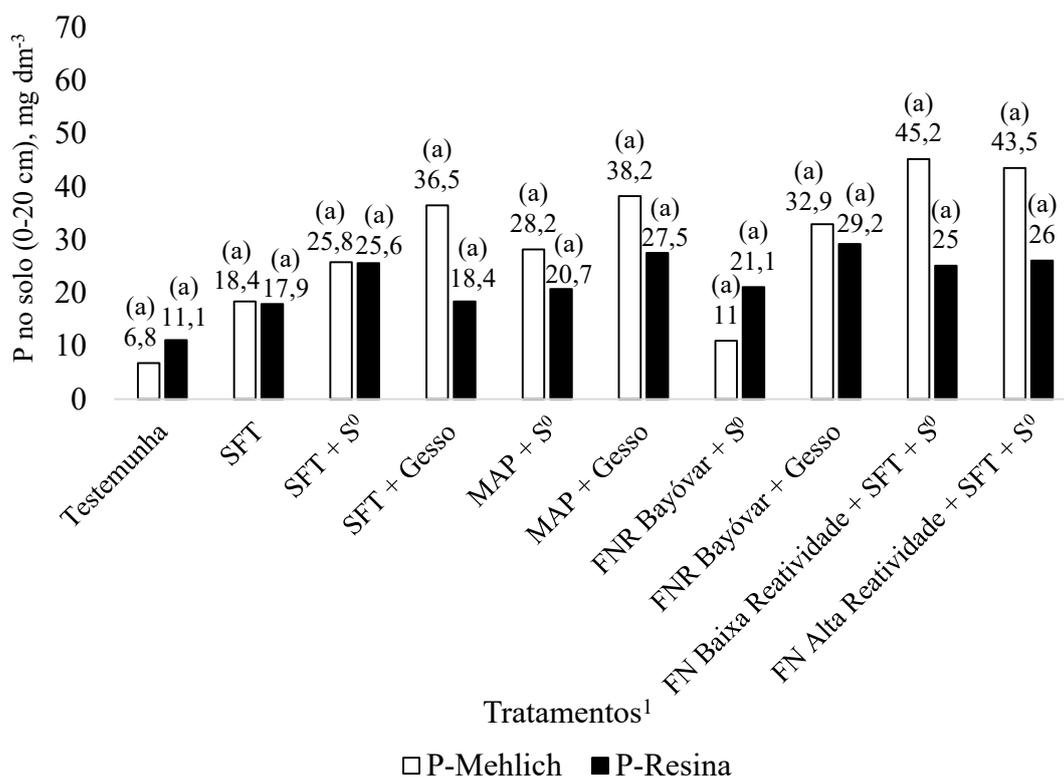
<sup>1</sup> Médias seguidas por letras distintas nas colunas diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância; \*Médias diferentes da testemunha por Dunnett (P<0,05);

Os tratamentos associados com S<sup>0</sup> apresentaram valores de pH mais baixos, possivelmente pelo maior índice de acidez causado pelo S<sup>0</sup> na área de aplicação e amostragem de solo. Wiedenfeld (2011) verificou redução de pH em quatro cortes consecutivos de cana, ao avaliar aplicação de S<sup>0</sup> em solo alcalino do Texas em condições de campo. O mesmo foi verificado por Karimizarch et al. (2014) ao avaliar aplicação de S<sup>0</sup> em solo alcalino da Malásia em condições de casa-de-vegetação.

Além dos resultados já observados, verificaram-se maiores teores residuais de S nas camadas de 0-20 e 20-40 cm com o tratamento FN de baixa reatividade + SFT + S<sup>0</sup>,

o qual apresentou diferença de 14,7 e 28,0 mg dm<sup>-3</sup> de S em relação a testemunha (7,4 e 9,8 mg dm<sup>-3</sup> de S) (Tabela 9).

Assim como nas análises de S no solo, para P (extrator Resina e Mehlich1) não houve diferenças significativas, possivelmente justificadas em função da elevada variabilidade experimental das análises de solo, resultando em coeficientes de variação entre 40 a 90% (Figura 15).



P-Mehlich: CV(%): 92,2; DMS (Dunnett): 17,95; P-Resina: CV(%): 43,7; DMS (Dunnett): 6,6; <sup>1</sup>Médias seguidas por letras distintas em cada variável diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância; \*Médias diferentes da testemunha em cada variável por Dunnett (P<0,05);

**Figura 15.** Teores de P do solo (0-20 cm) extraídos por Mehlich1 e Resina, 775 dias após a aplicação de diferentes fertilizantes fosfatados contendo S no plantio da cana-de-açúcar (variedade CTC 15), Usina Bunge, Ouroeste – SP.

Corroborando a esta questão, César (2016), verificou elevado coeficiente de variação nas análises de P disponível do solo, utilizando os extratores Mehlich1, Resina e Bray1 ao avaliar a aplicação localizada de fosfatos contendo S. Como já descrito anteriormente o extrator Mehlich1 com ação por dissolução ácida, pode solubilizar fosfatos de Ca (fosfato natural) ainda não solúveis no solo. O extrator Resina pode apresentar melhor discriminação do P disponível do solo, todavia, o tipo de resina utilizada (catiônicas e aniônicas) deve ser considerado. A resina trocadora de ânions

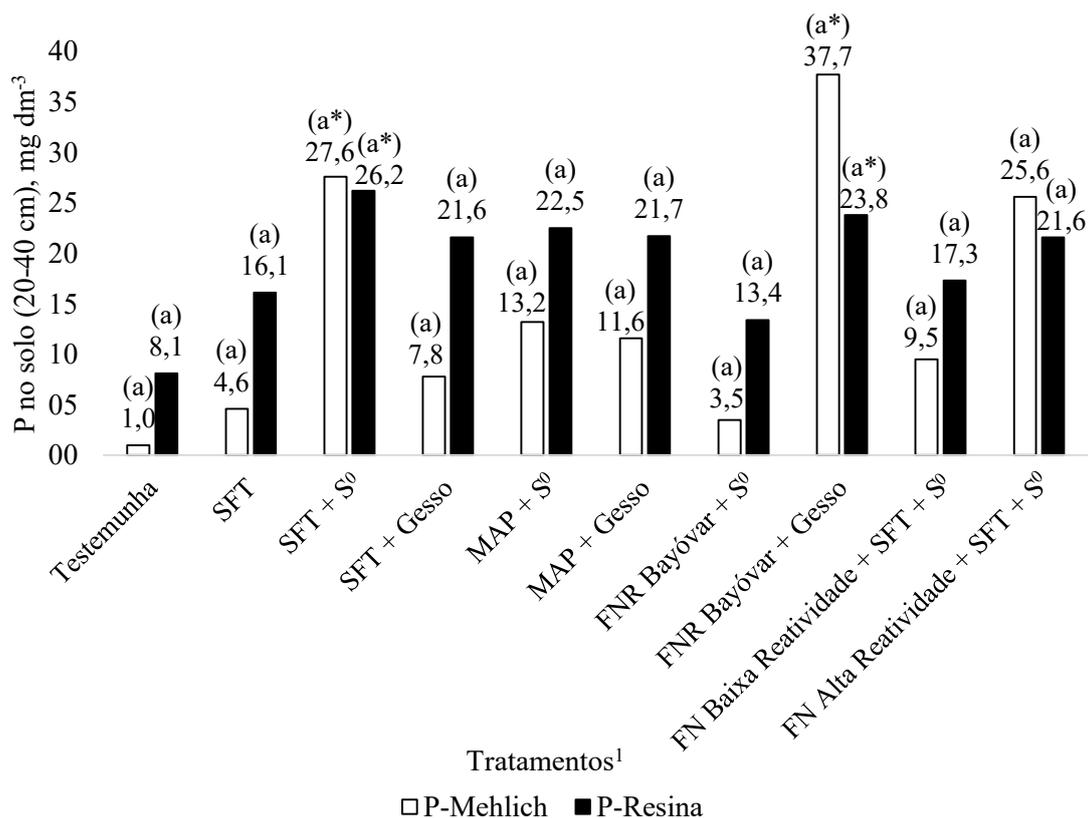
apresenta comportamento mais satisfatório para disponibilidade de P no solo, pois possui sítios permanentes de adsorção de ânions não superestimando o P disponível no solo proveniente de fosfatos naturais (CÉSAR, 2016).

Entretanto, nos laboratórios de São Paulo são utilizadas conjuntamente as resinas catiônicas e aniônicas nos métodos de rotina. O P disponível no solo é extraído pela resina aniônica enquanto o Ca é extraído pela resina catiônica. Essa remoção de P e Ca, faz com que ocorra a solubilização parcial de resíduos de fosfatos naturais reativos, cujo o P ainda não estava disponível. Em outras palavras, a resina catiônica atua como um dreno do  $\text{Ca}^{2+}$  fazendo com que a reação de solubilização dos fosfatos naturais se desloque para a direita, aumentando a solubilização e consequentemente superestimando a disponibilidade de P, conforme equação abaixo (SOUSA et al., 2010; SAVINI; KOALA; KIHARA, 2015):



Além disso, segundo Sousa et al. (2010) a etapa de desagregação do solo realizada por meio de uma bolinha de vidro no método resina pode também agir triturando as partículas de fosfato não reagida, aumentando a possibilidade de sua dissolução e solubilização (CÉSAR, 2016). Sousa; Rein (2012) avaliaram os extratores Mehlich1, Resina e Bray1 visando estimar o P disponível em um Latossolo que recebeu a aplicação de SFT e fosfato natural reativo na produção de soja. Os autores verificaram que o Bray1 foi mais adequado, dentre os três extratores. O extrator Bray1 apresenta caráter menos ácido do que o Mehlich1, fazendo com que a extração de P ligado ao Ca em solos que receberam aplicação de fosfato natural não ocorra (NOVAIS; SMITH, 1999).

Assim como foi observado para os valores de pH e Ca no solo, o FNR Bayóvar + Gesso mostrou-se mais eficiente sobre teores de P do solo, na camada de 20-40 cm (Figura 16). Além disso, o SFT +  $\text{S}^0$  também apresentou elevados teores de P no solo (extrator Mehlich1).



P-Mehlich: CV(%): 110,6; DMS (Dunnett): 10,94; P-Resina: CV(%): 46,7; DMS (Dunnett): 6,09; <sup>1</sup>Médias seguidas por letras distintas em cada variável diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância; \*Médias diferentes da testemunha em cada variável por Dunnett (P<0,05);

**Figura 16.** Teores de P do solo (0-20 cm) extraídos por Mehlich1 e Resina, 400 dias após a aplicação de diferentes fertilizantes fosfatados contendo S no plantio da cana-de-açúcar (variedade CTC 15), Usina Bunge, Ouroeste – SP.

Segundo Alvarez et al. (1999), os teores de P no solo em ambas as profundidades se apresentam em sua maioria no nível considerado “BOM” (12,1 - 18 mg dm<sup>-3</sup>) e “MÉDIO” (8,1 - 12 mg dm<sup>-3</sup>).

O estudo do efeito de fontes de P misturadas com fontes S sobre TCH e TAH da cana soca não demonstraram diferenças estatísticas entre as comparações avaliadas. Esses resultados corroboram com os de Nascimento (2016) que, ao avaliar aplicação de diferentes fosfatos (SFT, MAP, MAP+ S<sub>0</sub>, MAP + Ácido Húmico, Polifosfato e Fosforita) em cana, não verificou diferenças na produção de colmos da primeira e segunda safra, mesmo após reaplicação das fontes.

Zavaschi (2014) também não observou efeito da adubação fosfatada (superfosfato orgânico-complexado e superfosfato simples) na produtividade de colmos e acúmulo de massa seca de cana planta.

Kumar; Goyal; Kambooj (2011) ao avaliar aplicação de S<sup>0</sup> e gesso em cana-de-açúcar em dois locais na Índia verificaram incrementos nas variáveis de perfilhamento, altura de plantas e diâmetro de colmos.

Hamid (2014) ao avaliar aplicação de S na forma de sulfato não verificou diferenças estatísticas sobre a produção de colmos e açúcar de duas variedades de cana-de-açúcar em três anos de cultivo em um solo argiloso no Sudão.

Wiedenfeld (2011) verificou incremento de produção de colmos (cana planta e soca) e açúcar (cana soca) de cana, ao avaliar aplicação de S<sup>0</sup> em solo alcalino no Texas.

Simões Neto et al. (2009), estudando duas variedades na África do Sul, verificaram que a adubação fosfatada em um solo deficiente deste nutriente proporcionou aumento de produtividade e qualidade tecnológica da cana.

A análise de contraste sobre os teores de P (extrator Mehlich1) e S nas camadas de 0 a 20 e 20 a 40 cm de profundidade não foram significativas (Tabela 10). Mas, aos 20 a 40 cm, os fosfatos (SFT, MAP e FNR Bayóvar) misturados com S<sup>0</sup> apresentaram maiores teores de P extraídos por Resina quando comparado com os fosfatos misturados com Gesso.

**Tabela 10.** Análise de contrastes sobre os teores de P e S do solo (0-20 e 20-40 cm), 775 dias após a aplicação de fertilizantes fosfatados misturados com fontes de S sobre os teores de P (extrator Mehlich-1 e Resina) e S no plantio da cana-de-açúcar (variedade CTC 15), Usina Bunge, Ouroeste – SP.

Contrastes	----- mg dm <sup>-3</sup> -----					
	0 – 20 cm			20 – 40 cm		
SFT vs (SFT + S <sup>0</sup> ) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (FNR Bayóvar + S <sup>0</sup> )	ns	ns	ns	ns	ns	ns
SFT vs (SFT + Gesso) + (MAP + Gesso) + (FNR Bayóvar + Gesso)	ns	ns	ns	ns	ns	ns
(SFT + S <sup>0</sup> ) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (FNR Bayóvar + S <sup>0</sup> ) vs (SFT + Gesso) + (MAP + Gesso) + (FNR Bayóvar + Gesso)	ns	ns	ns	ns	(22,7) + (27,7) + (29,2) x	ns
(SFT + S <sup>0</sup> ) + (SFT + Gesso) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (MAP + Gesso) vs (FNR Bayóvar + S <sup>0</sup> ) + (FNR Bayóvar + Gesso)	ns	ns	ns	ns	(19,1) + (16,9) + (10,8)*	ns

\* significativo pelo teste de Scheffé a 0,05 de significância; ns: não significativo.

Corroborando com esses resultados, estudos verificaram que a mistura física de  $S^0$  com fertilizantes fosfatados aplicados na forma de pó ou farelada apresentaram resultados satisfatórios em solos da Austrália com pH ( $CaCl_2$ ) entre 4,3 a 5,8 (EVANS; MCDONAL; PRICE, 2006; EVANS; PRICE, 2009). Nascimento (2016) encontrou resultados significativos para os teores de P no solo (camada 0-20 cm) ao avaliar aplicação de diferentes fosfatos em cana, porém, sem diferença na produção de colmos em duas safras de cana.

Wiedenfeld (2011) verificou incremento nos teores de P (profundidade 0 a 15 cm) no solo em três cortes de cana, ao avaliar aplicação de  $S^0$  em solo alcalino no Texas. Caione (2011), ao avaliar a disponibilidade de P no solo (sulco de plantio) pela aplicação de diferentes fontes de P (farinha de ossos, fosfato de Arad e superfosfato triplo) observou após o corte de cana soca, que a disponibilidade de P no solo foi superior com o tratamento com farinha de ossos.

Diversos fatores podem ter relação com a eficiência destes fosfatos em solos mais arenosos. A oxidação do  $S^0$  pode ser favorecida em função da forma do S mais oxidada ser predominante em solos mais drenados e oxigenados. Apesar disso, essa oxidação depende de outros fatores como textura, matéria orgânica, temperatura e umidade do solo, valores de pH, presença de outros nutrientes, tamanho da partícula do adubo e granulometria (JANZEN; BETTANY, 1987; CHIEN et al., 1988; GERMIDA; JANSEN, 1993; COWELL; SCHOENAU, 1995; HOROWITZ; MEURER, 2007; STIPP; CASARIN, 2010; VITTI; OTTO; SAVIETO, 2015; FIORINI et al., 2016).

Os resultados sobre estudo da aplicação de fosfato natural (alta e baixa reatividade) + SFT +  $S^0$  no TCH e TAH da cana soca, não demonstraram diferenças estatísticas entre os contrastes avaliados (Tabelas 10 e 11).

Os contrastes para análise de solo (camada 0-20 e 20-40 cm) indicou que os fosfatos naturais de baixa e alta reatividade apresentaram elevados valores de P extraídos por Mehlich1 e valores equivalentes de S e P extraídos por Resina, mesmo sem diferença estatística (Tabela 11).

**Tabela 11.** Análise de contrastes sobre os teores de P e S do solo (0-20 e 20-40 cm), 775 dias após a aplicação de fertilizantes fosfatados produzidos com fosfato solúvel, insolúvel e enxofre elementar no plantio da cana-de-açúcar (variedade CTC 15), Usina Bunge, Ouroeste – SP.

Contrastes	P-Mehlich1 P-Resina S P-Mehlich1 P-Resina S					
	----- mg dm <sup>-3</sup> -----					
	0 – 20 cm			20 – 40 cm		
(SFT + S <sup>0</sup> ) + (SFT + Gesso) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (MAP + Gesso)						
<b>vs</b>	ns	ns	ns	ns	ns	ns
(FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> ) + (FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> )						
<b>SFT</b>						
<b>vs</b>	ns	ns	ns	ns	ns	ns
(FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> ) + (FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> )						
(FNR Bayóvar + S <sup>0</sup> ) + (FNR Bayóvar + Gesso)						
<b>vs</b>	ns	ns	ns	ns	ns	ns
(FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> ) + (FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> )						
FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> <b>vs</b> FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup>	ns	ns	ns	(20,3) x (53,2)*	ns	ns

\* significativo pelo teste de Scheffé a 0,05 de significância; ns: não significativo.

Esses resultados podem ser indicativos de que parte do P proveniente dos fosfatos naturais (baixa e alta reatividade) ainda não foram totalmente solubilizados, mesmo após 775 dias de sua aplicação (após 1 e 2º cultivo). Isso pode ser observado mais claramente nos resultados com o extrator Mehlich1, que por ser um ácido, pode solubilizar P proveniente do fosfato ainda não disponível. Possivelmente, apesar da presença de SFT e S<sup>0</sup> no grânulo destes fosfatos, a acidez gerada no grânulo não foi suficiente para solubilizar o P proveniente dos fosfatos de rocha. De acordo com César (2016), a dissolução do SFT associado com fosfatos naturais no mesmo grânulo pode ser muito rápida. Associado a isso, em solos arenosos o SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> proveniente do S<sup>0</sup> pode ser perdido por percolação já que sua movimentação nesses solos é maior (STIPP; CASARIN, 2010).

Mesmo que estes fosfatos apresentem alta reatividade, sua aplicação de forma localizada no solo pode apresentar baixa eficiência, porque a solubilização do fosfato geralmente é favorecida quando o contato com o solo, sendo mais acentuado este efeito em solos mais argilosos (NOVAIS; SMYTH, 1999; NASCIMENTO, 2016).

O fosfato natural de alta reatividade + SFT + S<sup>0</sup> apresentou maiores teores de P no solo (extrator Mehlich1) em comparação com o fosfato natural de baixa reatividade + SFT + S<sup>0</sup>, na profundidade 20-40 cm (Tabela 11).

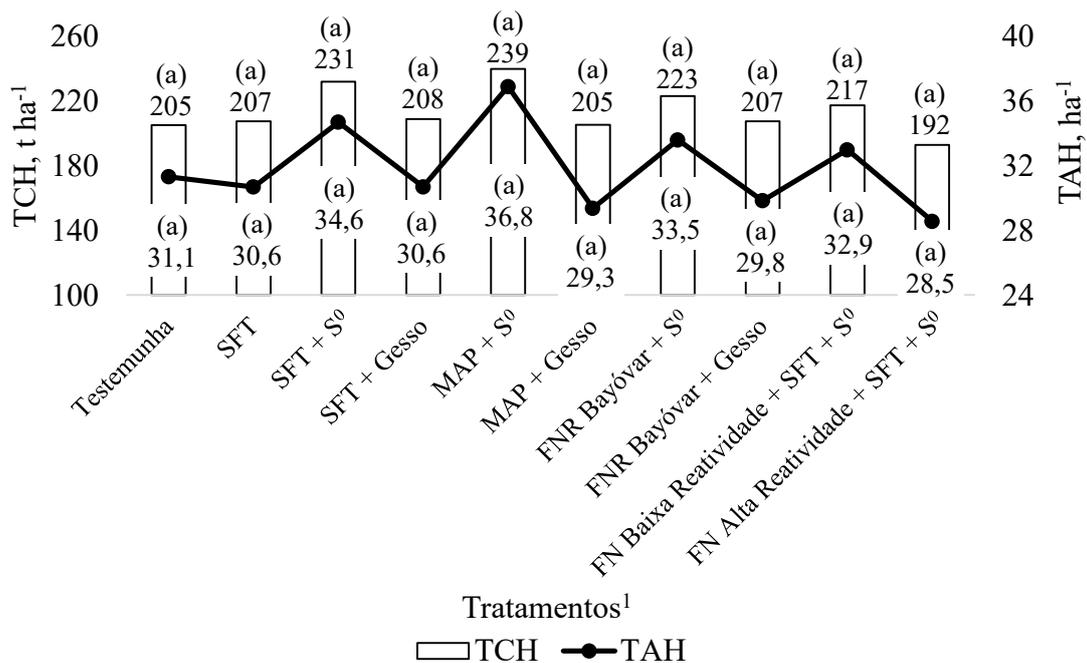
Os resultados de S no solo não apresentaram diferenças entre os contrastes avaliados (Tabela 11). Diversos fatores podem estar relacionados com eficiência dos tratamentos na disponibilidade de S no solo, como os processos bióticos e abióticos que controlam as transformações de S no solo. As transformações bióticas estão relacionadas aos processos de mineralização, imobilização, oxi-redução e assimilação de S pela planta, enquanto as transformações abióticas acontecem em função dos processos de adsorção, dessorção, precipitação e dissolução do S inorgânico. Fatores como temperatura do solo, pH, umidade, quantidade e tipos de argilominerais, óxidos de ferro e alumínio, matéria orgânica tem importância relativa nesses processos (NORMAN et al., 2002; STIPP; CASARIN, 2010).

Além do mais, como citado anteriormente, a principal forma de S absorvida pelas plantas ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) pode, em solos arenosos, ser perdida por percolação, já que sua movimentação nesses solos é maior e por normalmente apresentarem baixo conteúdo de matéria orgânica (STIPP; CASARIN, 2010). Cesár (2016), ao avaliar o efeito da aplicação de P e S, verificou que o  $\text{SO}_4^{2-}$  tendeu a se acumular no ponto mais distante do ponto de aplicação das fontes devido a competição do  $\text{SO}_4^{2-}$  pelos sítios de adsorção com o ânion  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ . Com a difusão do P dos fertilizantes, a maioria dos sítios disponíveis para a adsorção de ânions foram ocupados pelo comportamento  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ , que possui maior afinidade para adsorção nas partículas do solo do que o  $\text{SO}_4^{2-}$ , fazendo com que o sulfato migrasse de ponto mais distante da aplicação dos fertilizantes onde havia sítios disponíveis para sua adsorção (ALVAREZ et al., 2007).

No geral, os resultados do primeiro experimento de campo, após dois cultivos, demonstraram que a aplicação de fosfatos misturados com  $\text{S}^0$  pastilha apresentaram resultados positivos na maioria das variáveis analisadas. Além do mais, os fosfatos compostos por fosfato de rocha, fosfato solúvel e enxofre elementar no mesmo grânulo, apresentaram resultados bem próximos aos fosfatos solúveis (SFT e MAP) associados com S e até superiores ao SFT aplicado sem fonte de S.

### 3.1.3. Produção Acumulada

Os valores acumulados de TCH e TAH apresentaram variação entre 192,8 a 239,7 t ha<sup>-1</sup> de TCH e de 28,5 a 36,8 t ha<sup>-1</sup> de TAH, respectivamente (Figura 16).



TCH: CV(%): 11,7; DMS (Dunnett): 19,15; TAH: CV(%): 15,1; DMS (Dunnett): 3,62; <sup>1</sup>Médias seguidas por letras distintas em cada variável diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância; \*Médias diferentes da testemunha em cada variável por Dunnett (P<0,05);

**Figura 16.** Produção acumulada de colmos (TCH) e de açúcar (TAH) (Soma de dois cortes), em função da aplicação de diferentes fertilizantes fosfatados contendo S no plantio da cana-de-açúcar (variedade CTC 15), Usina Bunge, Ouroeste – SP.

A produção média acumulada observada foi de 213,75 t ha<sup>-1</sup> de TCH e 31,87 t ha<sup>-1</sup> de TAH.

Os fosfatos misturados com S<sup>0</sup> mostraram-se estatisticamente superiores quando comparados com os fosfatos misturados com Gesso sobre a produção acumulada de colmos (TCH) e açúcar (TAH), com incrementos na ordem de 83,3 t ha<sup>-1</sup> de TCH e 15,2 t ha<sup>-1</sup> de TAH (Tabela 12).

**Tabela 12.** Análise de contrastes na produção acumulada de colmos (TCH) e açúcar (TAH) (Soma de 2 cortes) para avaliar o efeito de fertilizantes fosfatados misturados com fontes de S aplicados no plantio da cana-de-açúcar (variedade CTC 15), Usina Bunge, Ouroeste – SP.

Contrastes	TCH	TAH
	----- t ha <sup>-1</sup> -----	
SFT <b>vs</b> (SFT + S <sup>0</sup> ) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (FNR Bayóvar + S <sup>0</sup> )	ns	ns
SFT <b>vs</b> (SFT + Gesso) + (MAP + Gesso) + (FNR Bayóvar + Gesso)	ns	ns
(SFT + S <sup>0</sup> ) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (FNR Bayóvar + S <sup>0</sup> )	(231,8) + (239,7) + (223)	(34,6) + (36,8) + (33,5)
<b>vs</b> (SFT + Gesso) + (MAP + Gesso) + (FNR Bayóvar + Gesso)	<b>x</b> (208,8) + (205,1) + (207,3)*	<b>x</b> (30,6) + (29,3) + (29,8)*
(SFT + S <sup>0</sup> ) + (SFT + Gesso) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (MAP + Gesso) <b>vs</b> (FNR Bayóvar + Pastilha S) + (FNR Bayóvar + Gesso)	ns	ns

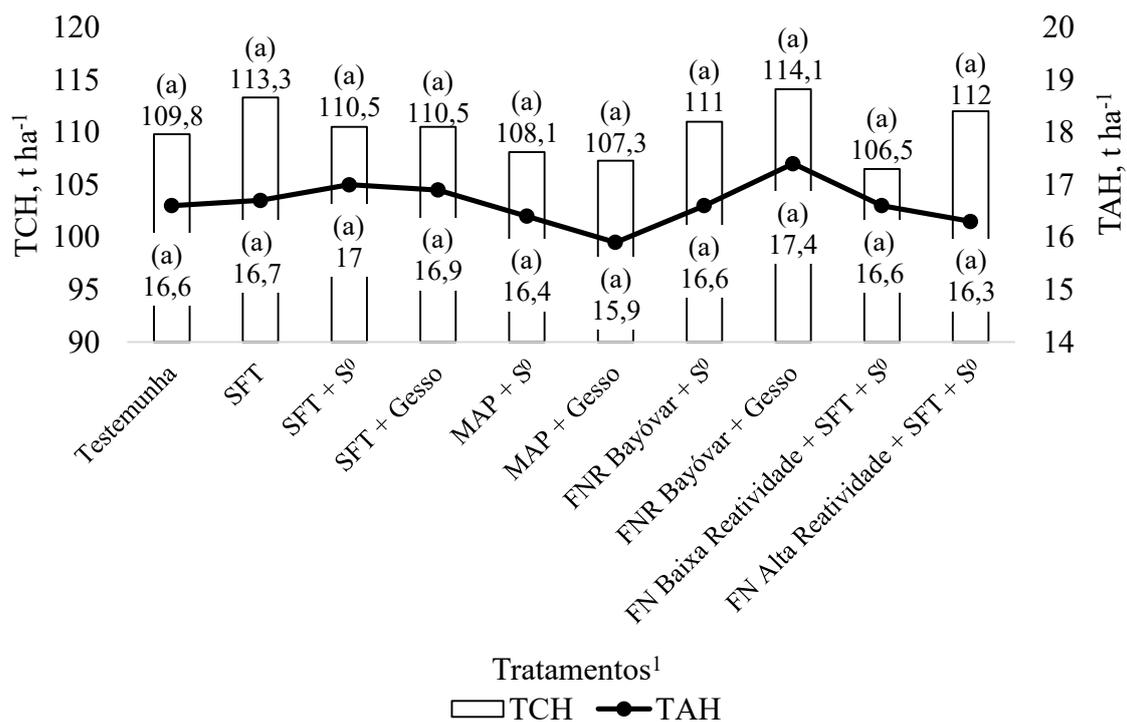
\* significativo pelo teste de Scheffé a 0,05 de significância; ns: não significativo.

Os resultados de produção acumulada de colmos e açúcar sobre o estudo da aplicação de fosfato natural, SFT e S<sup>0</sup> no mesmo grânulo não demonstraram diferenças estatísticas entre as comparações avaliadas.

### 3.2. Companhia Mineira de Açúcar e Alcool – Experimento 2

#### 3.2.1. Cana planta

No segundo experimento, não houve diferenças significativas sobre perfilhamento, altura de plantas e diâmetro de colmos de cana planta, os quais apresentaram na média, 22,1 perfilhos por metro (m), 2,3 m de altura e 29,2 cm de diâmetro. Do mesmo modo, não houve diferenças estatísticas entre os tratamentos sobre produção de colmos (TCH) e açúcar (TAH), o qual apresentaram médias de 110,3 t ha<sup>-1</sup> de TCH e 16,6 t ha<sup>-1</sup> de TAH (Figura 17).



TCH: CV(%): 6,6; DMS (Dunnett): 15,01; TAH: CV(%): 7,9; DMS (Dunnett): 2,69; <sup>1</sup>Médias seguidas por letras distintas em cada variável diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância; \*Médias diferentes da testemunha em cada variável por Dunnett (P<0,05);

**Figura 17.** Produção de colmos (TCH) e de açúcar (TAH) (Primeiro Corte, 2016) da cana planta, em função da aplicação de diferentes fertilizantes fosfatados contendo S no plantio da cana-de-açúcar (variedade RB 92-579), Companhia Mineira de Açúcar e Álcool, Uberaba – MG.

A baixa produtividade de colmos e de açúcar obtidas neste experimento (110,3 t ha<sup>-1</sup> de TCH) pode ser justificada em função das características apresentadas no local de cultivo, já que o potencial produtivo era baixo por ser área de expansão (pastagem), sem histórico de cultivo, aliado ao período de inverno e baixos índices pluviométricos observados no período inicial e final de desenvolvimento da variedade de cana RB 92-579 (exigente a fertilidade do solo), o que pode ter aumentado a variabilidade experimental (Figura 6).

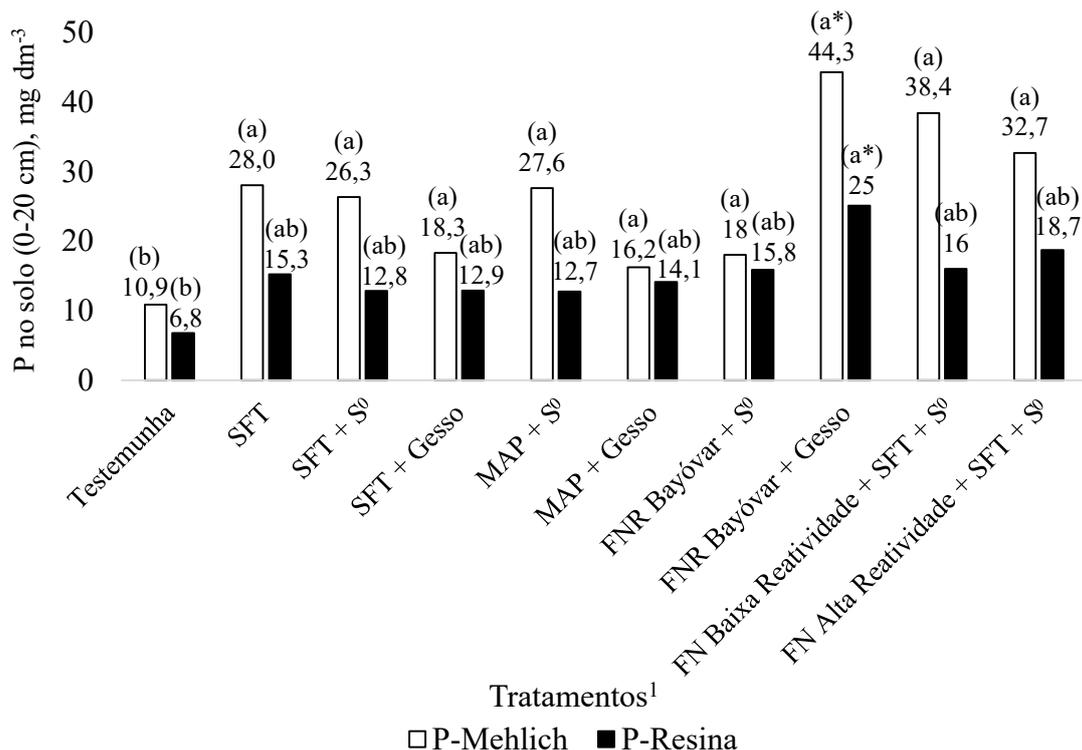
O ambiente de produção de cana-de-açúcar pode ser afetado por diversos fatores, sendo definido em função de condições dos solos sob manejo adequado da camada arável em relação ao preparo, calagem, adubação, do controle de ervas daninhas e pragas. Além disso, este ambiente é associado com as condições de subsuperfície dos solos e de clima regional como precipitação pluviométrica, temperatura, radiação solar e evaporação (PEREIRA et al., 1995; PRADO, 2005; DINARDO-MIRANDA et al., 2008; SOUSA, 2014).

As concentrações de P, S, Ca e Mg foliar não diferiram entre as plantas submetidas aos tratamentos avaliados, os quais apresentaram médias de 1,4; 1,7; 6,2 e 1,3 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Foi observado que as concentrações de P, S, Ca e Mg na folha estiveram abaixo dos valores de referência citados por Martinez et al. (1999), entre 2,1 a 2,5 g kg<sup>-1</sup> de P; 1,3 a 2,8 g kg<sup>-1</sup> de S; 9,4 a 11,5 g kg<sup>-1</sup> de Ca e 2,2 a 4,5 g kg<sup>-1</sup> de Mg. Porém, segundo Raij et al. (1997), as concentrações estariam na faixa adequada: 1,5 a 3 g kg<sup>-1</sup> de P; 1,5 a 3,0 g kg<sup>-1</sup> de S; 2 a 8 g kg<sup>-1</sup> de Ca e 1 a 3 g kg<sup>-1</sup> de Mg.

As variáveis tecnológicas de fibra e açúcar teórico recuperável na cana planta avaliado não foram alteradas pela aplicação dos tratamentos, os quais apresentaram médias na ordem de 13,4% de fibra e 150 kg açúcar TC<sup>-1</sup>. Na média, o Pol da cana foi de 15,1%, o que de acordo com Almeida et al. (2005) é acima do valor mínimo de 13,0% exigido pela indústria (FERNANDES, 2000; DEUBER, 1988). O teor de fibra variou entre 13,1 e 13,7% considerado dentro do nível adequado conforme Fernandes (2003), que devem variar de 10 a 13%, valores considerados importantes para indústria (LAVANHOLI, 2010).

De acordo com a análise de solo, verificou-se que não houve diferenças significativas para pH, S, Ca e Mg do solo. Na profundidade de 0 a 20 cm as variáveis apresentaram valores médios de 5,1 de pH; 9,1 mg dm<sup>-3</sup> de S; 1,6 cmol<sub>c</sub>dm<sup>-3</sup> de Ca e 0,4 cmol<sub>c</sub>dm<sup>-3</sup> de Mg. Na profundidade de 20 a 40 cm as médias das variáveis foram de 4,7 pH, 7,6 mg dm<sup>-3</sup> de S, 1,6 cmol<sub>c</sub>dm<sup>-3</sup> de Ca e 0,2 cmol<sub>c</sub>dm<sup>-3</sup> de Mg.

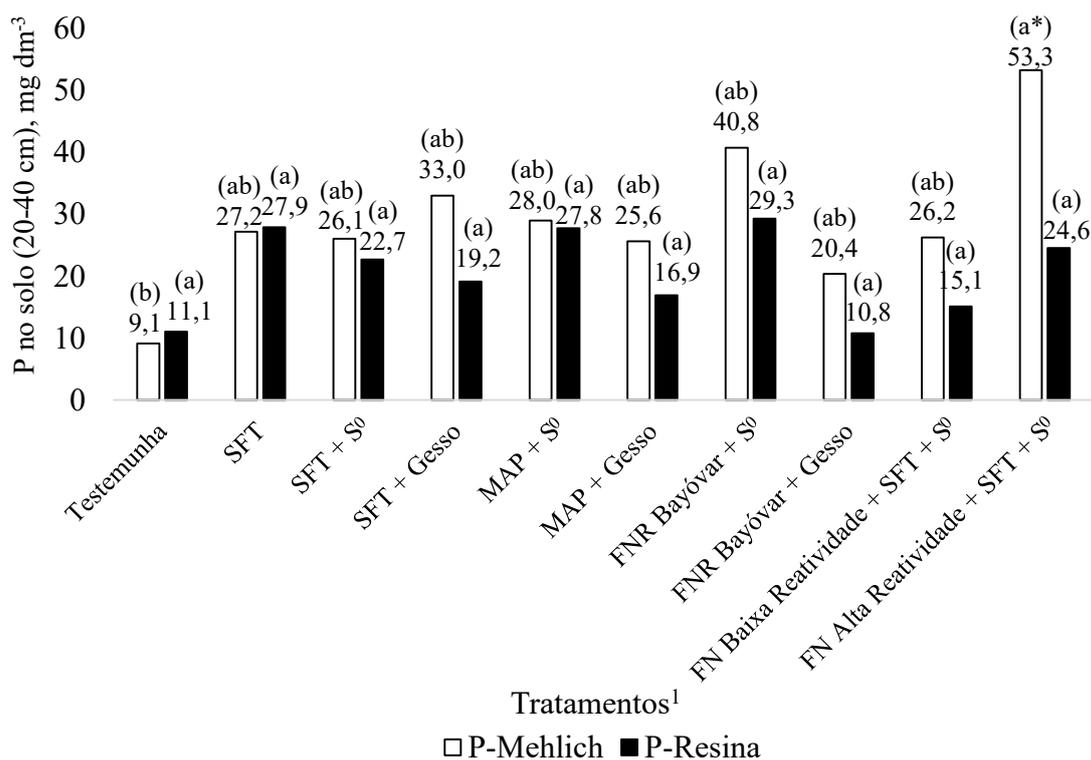
Os teores de P no solo (extrator Mehlich1 e Resina) encontrados de 0 a 20 cm de profundidade apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos fosfatados quando comparado com a testemunha, destacando-se para o tratamento FNR Bayóvar + Gesso aplicado na forma farelada (Figura 18).



P-Mehlich: CV(%): 62,1; DMS (Dunnett): 33,18; P-Resina: CV(%): 47,8; DMS (Dunnett): 14,67;  
<sup>1</sup>Médias seguidas por letras distintas em cada variável diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância; \*Médias diferentes da testemunha em cada variável por Dunnett (P<0,05);

**Figura 18.** Teores de P do solo (0-20 cm) extraídos por Mehlich1 e Resina, 400 dias após a aplicação de diferentes fertilizantes fosfatados contendo S no plantio da cana-de-açúcar (Variedade RB 92-579), Companhia Mineira de Açúcar e Álcool, Uberaba – MG.

Na profundidade de 20-40 cm o teor de P (extrator Mehlich1), o tratamento FN de alta reatividade + SFT foi superior à testemunha, mas com extrator Resina os tratamentos não diferiram entre si (Figura 19). Segundo Alvarez et al. (1999), os teores de P no solo em ambas as profundidades se apresentam em sua maioria no nível considerado “MUITO BOM” (> 18 mg dm<sup>-3</sup>), “BOM” (12,1 - 18 mg dm<sup>-3</sup>) e “MÉDIO” (8,1 - 12 mg dm<sup>-3</sup>).



P-Mehlich: CV(%): 61,0; DMS (Dunnett): 36,07; P-Resina: CV(%): 53,6; DMS (Dunnett): 22,39;  
<sup>1</sup>Médias seguidas por letras distintas em cada variável diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância; \*Médias diferentes da testemunha em cada variável por Dunnett (P<0,05);

**Figura 19.** Teores de P do solo (20-40 cm) extraídos por Mehlich1 e Resina, 400 dias após a aplicação de diferentes fertilizantes fosfatados contendo S no plantio da cana-de-açúcar (variedade RB 92-579), Companhia Mineira de Açúcar e Álcool, Uberaba – MG.

Os elevados teores de P no solo extraídos por Mehlich1 por parte dos tratamentos que receberam aplicação de fosfatos naturais podem ser justificados pelo efeito do extrator ácido na solubilização do P não disponível proveniente das fontes (CHIEN, 1996; CÉSAR, 2016). Aliado a isto, os elevados coeficientes de variação podem indicar a falta de diferenças entre os tratamentos, consequência variabilidade experimental nas análises de P no solo (CÉSAR, 2016).

As análises de contrastes para TCH e TAH da cana planta não demonstraram diferenças estatísticas.

Sobre os teores de P no solo (extrator Resina), os fosfatos misturados com S<sup>0</sup> (SFT, MAP e FNR Bayóvar) mostraram-se mais eficientes em fornecer P que a mistura com gesso, na profundidade 20 a 40 cm (Tabela 13).

**Tabela 13.** Análise de contrastes sobre os teores de P e S do solo (0-20 e 20-40 cm), 400 dias após a aplicação de fertilizantes fosfatados misturados com fontes de S sobre os teores de P (extrator Mehlich-1 e Resina) e S no plantio da cana-de-açúcar (variedade RB 92-579), Companhia Mineira de Açúcar e Álcool, Uberaba – MG.

Contrastes	P-Mehlich1	P-Resina	S	P-Mehlich1	P-Resina	S
	----- mg dm <sup>-3</sup> -----					
	0 – 20 cm			20 – 40 cm		
SFT vs (SFT + S <sup>0</sup> ) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (FNR Bayóvar + S <sup>0</sup> )	ns	ns	ns	ns	ns	ns
SFT vs (SFT + Gesso) + (MAP + Gesso) + (FNR Bayóvar + Gesso)	ns	ns	ns	ns	ns	ns
(SFT + S <sup>0</sup> ) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (FNR Bayóvar + S <sup>0</sup> ) vs (SFT + Gesso) + (MAP + Gesso) + (FNR Bayóvar + Gesso)	ns	ns	ns	ns	(26,2) + (27,8) + (29,3) <b>x</b>	ns
(SFT + S <sup>0</sup> ) + (SFT + Gesso) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (MAP + Gesso) vs (FNR Bayóvar + S <sup>0</sup> ) + (FNR Bayóvar + Gesso)	ns	(12,8) + (12,8) + (12,7) + (14,1) <b>x</b>	ns	ns	(19,2) + (16,9) + (10,8)*	ns
(SFT + S <sup>0</sup> ) + (SFT + Gesso) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (MAP + Gesso) vs (FNR Bayóvar + S <sup>0</sup> ) + (FNR Bayóvar + Gesso)	ns	(18) + (15,8)*	ns	ns	ns	ns

\* significativo pelo teste de Scheffé a 0,05 de significância; ns: não significativo.

As respostas dos fertilizantes fosfatados misturados com S<sup>0</sup> neste tipo de solo podem ter ocorrido em função da taxa de oxidação do S<sup>0</sup> a SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>. Mas Wiedenfeld (2011) ao avaliar aplicação de S<sup>0</sup> para produção de cana-de-açúcar no Texas, verificou que o S<sup>0</sup> apresentou lenta taxa de oxidação e movimentação no solo. Respostas significativas só foram verificadas após o segundo e terceiro corte.

Além disso, em função dos baixos índices pluviométricos na área pode ter favorecido os baixos resultados com gesso, já que esta fonte altamente solúvel pode apresentar em condições de baixa umidade menor movimentação no solo.

Os resultados dos contrastes para avaliar a aplicação de fosfato natural + SFT + S<sup>0</sup> não apresentaram diferenças significativas sobre TCH e TAH de cana planta.

Em relação aos teores de P-Resina no solo (profundidade de 20 a 40 cm), os fosfatos solúveis (SFT e MAP) misturados com S foram superiores que os fosfatos naturais de alta e baixa reatividade + SFT + S<sup>0</sup> (Tabela 44). A elevada solubilidade do SFT e MAP pode justificar a maior resposta desses tratamentos (NOVAIS et al., 2007). Fontes como o SFT e MAP são altamente solúveis e por isso são mais eficientes em

curto prazo que os fosfatos naturais, normalmente com maior eficiência a longo prazo. Por outro lado, esse índice de eficiência dos fosfatos solúveis tende a reduzir com o tempo, em função do processo de fixação de P no solo (RAJAN; WATKINSON; SINCLAIR, 1996; HOROWITZ; MEURER, 2004).

A aplicação de fosfatos naturais + SFT + S<sup>0</sup> levou a um incremento maior nos teores de P no solo (extrator Mehlich1) do que o FNR Bayóvar + Gesso e FNR Bayóvar + S<sup>0</sup>. Além disso, o teor de P foi maior no solo com o tratamento fosfato natural de alta reatividade + SFT + S<sup>0</sup> quando comparado com o fosfato natural de baixa reatividade + SFT + S<sup>0</sup>, profundidade 20-40 cm (Tabela 14).

**Tabela 14.** Contrastes para médias dos teores de P extraídos por Mehlich1 e Resina e S em um Latossolo Vermelho (0-20 cm e 20-40 cm) em função da aplicação de diferentes fertilizantes fosfatados contendo S no plantio da cana planta (variedade RB 92-579), Companhia Mineira de Açúcar e Álcool, Uberaba – MG.

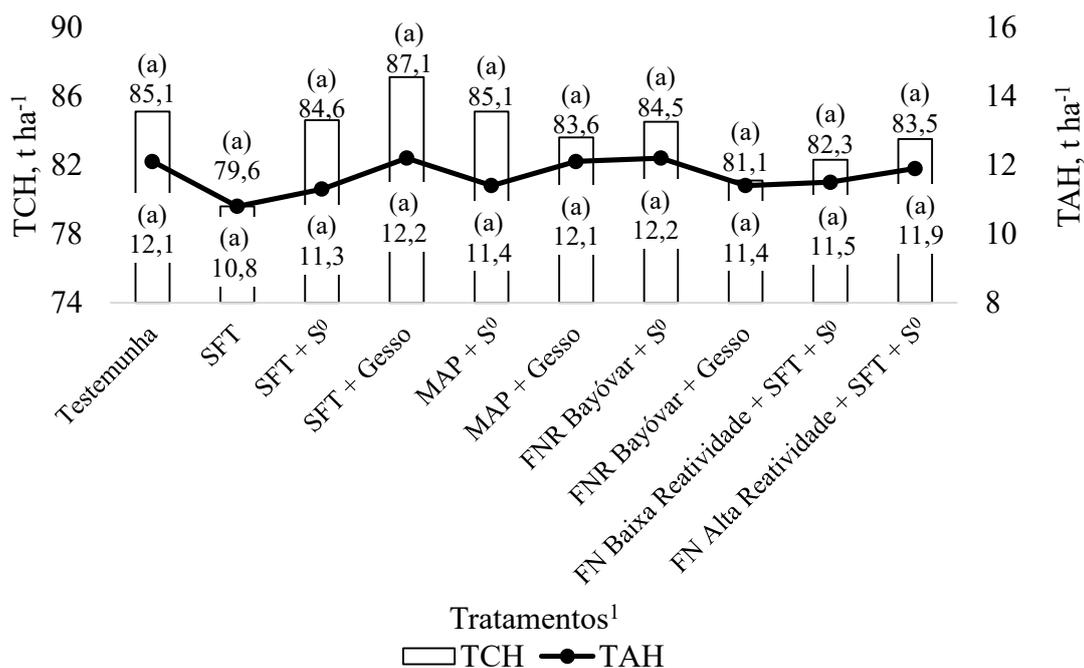
Contrastes	P-Mehlich1		P-Resina		S	
	----- mg dm <sup>-3</sup> -----					
	0 – 20 cm			20 – 40 cm		
(SFT + S <sup>0</sup> ) + (SFT + Gesso) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (MAP + Gesso) vs (FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> ) + (FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> )	ns	ns	ns	(26,1) + (33) + (28) + (25,6) x	(26,2) + (21,6) + (22,5) + (21,7) x	ns
SFT vs (FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> ) + (FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> )	ns	ns	ns	ns	ns	ns
(FNR Bayóvar + S <sup>0</sup> ) + (FNR Bayóvar + Gesso) vs (FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> ) + (FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> )	ns	ns	ns	(40,8) + (20,4) x (26) + (53,3)*	ns	ns
FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> vs FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup>	ns	ns	ns	(26) + (53,3)*	ns	ns

\* significativo pelo teste de Scheffé a 0,05 de significância; ns: não significativo.

As diferenças encontradas nesses contrastes provavelmente podem ser justificadas pelo efeito de solubilização do extrator Mehlich1 (NOVAIS; SMITH, 1999).

### 3.2.2. Cana soca

Na soqueira, os resultados de perfilamento, produção de colmos e açúcar não foram influenciados pelos tratamentos (Figura 20). O que se observa é que, na média, havia 13,5 perfilhos por metro (m), 83,7 t ha<sup>-1</sup> de TCH e 11,7 t ha<sup>-1</sup> de TAH.



TCH: CV(%): 7,2; DMS (Dunnett): 12,3; TAH: CV(%): 7,1; DMS (Dunnett): 1,69; <sup>1</sup>Médias seguidas por letras distintas em cada variável diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância; \*Médias diferentes da testemunha em cada variável por Dunnett (P<0,05);

**Figura 20.** Produção de colmos (TCH) e de açúcar (TAH) (Segundo Corte, 2017) da cana soca, em função da aplicação de diferentes fertilizantes fosfatados contendo S no plantio da cana-de-açúcar (variedade RB 92-579), Companhia Mineira de Açúcar e Álcool, Uberaba – MG.

As concentrações de P, S, Ca e Mg foliar não diferiram entre os tratamentos avaliados, os quais apresentaram médias de 2,4; 1,3; 2,2 e 1,9 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente. Observou-se que as concentrações de Ca e Mg na folha estão abaixo dos valores de referência citados por Martinez et al. (1999), entre 9,4 a 11,5 g kg<sup>-1</sup> de Ca e 2,2 a 4,5 g kg<sup>-1</sup> de Mg. Porém, segundo Rajj et al. (1997), as concentrações estariam na faixa adequada entre 2 a 8 g kg<sup>-1</sup> de Ca e 1 a 3 g kg<sup>-1</sup> de Mg. Para P e S as concentrações estão entre a faixa adequada de 2,1 e 2,5 g kg<sup>-1</sup> de P e 1,3 a 2,8 g kg<sup>-1</sup> de S segundo Martinez et al. (1999) e também segundo Rajj et al. (1997), 1,5 a 3 g kg<sup>-1</sup> de P e 1,5 a 3,0 g kg<sup>-1</sup> de S.

A aplicação dos tratamentos não alterou significativamente os resultados das análises de Fibra e Pol da cana, cujas médias foram respectivamente, 12,7 e 14,0 % (Tabela 15).

**Tabela 15.** Fibra, Pol da cana e teor de ATR da cana soca, em função da aplicação de diferentes fertilizantes fosfatados contendo S no plantio da cana-de-açúcar (variedade RB 92-579), Companhia Mineira de Açúcar e Álcool, Uberaba – MG.

Tratamentos	Fibra	Pol	ATR
	----- % -----		kg açúcar TC <sup>-1</sup>
Testemunha	12,7 a	14,3 a	141,9 ab
SFT	12,7 a	13,6 a	136,3 ab
SFT + S <sup>0</sup>	12,2 a	13,4 a	133,6 b
SFT + Gesso	12,7 a	14,0 a	140,2 ab
MAP + S <sup>0</sup>	12,3 a	13,4 a	135,0 ab
MAP + Gesso	13,0 a	14,5 a	144,3 a
FNR Bayóvar + S <sup>0</sup>	12,4 a	14,4 a	143,7 ab
FNR Bayóvar + Gesso	12,9 a	14,0 a	140,0 ab
FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup>	13,1 a	13,9 a	139,2 ab
FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup>	12,9 a	14,3 a	142,9 ab
Médias	12,7	14,0	139,7
CV	3,4	3,3	3,0
DMS (Dunnett)	0,88	0,94	8,58

<sup>1</sup> Médias seguidas por letras distintas nas colunas diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância; \*Médias diferentes da testemunha por Dunnett (P<0,05);

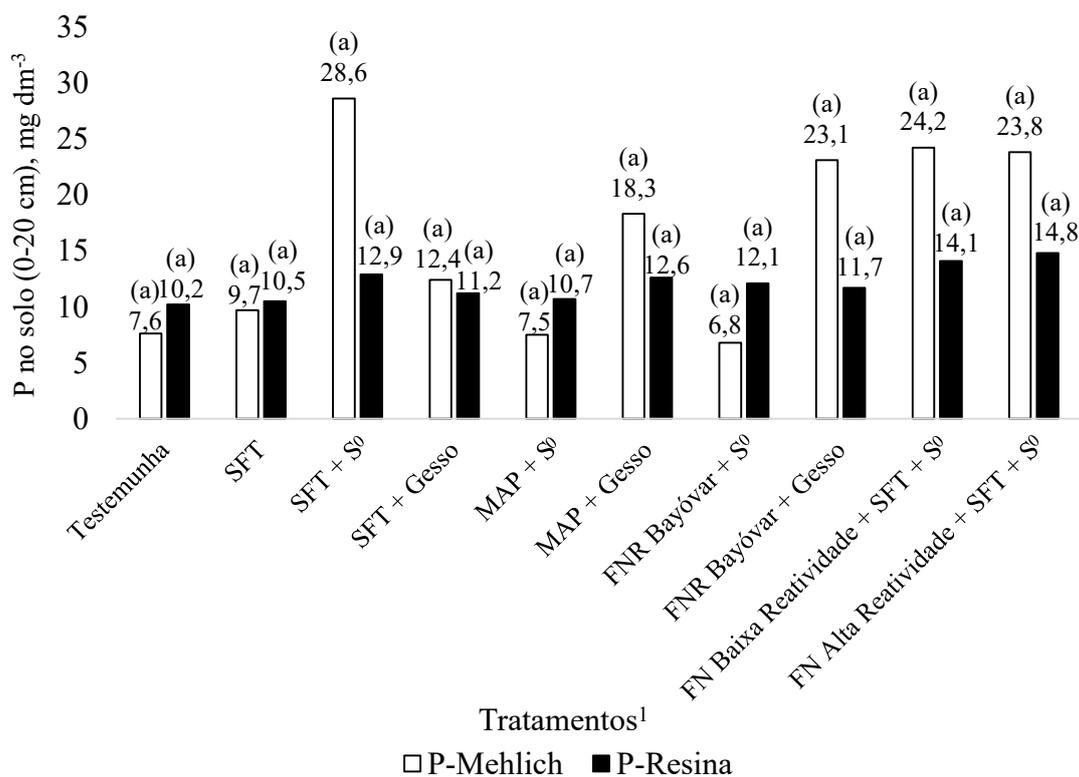
No conteúdo de açúcar teórico recuperável, somente o MAP + Gesso mostrou-se superior somente ao SFT + S<sup>0</sup> (Tabela 15). Corroborando com este resultado, Ferraz et al. (2015) ao avaliarem aplicação de gesso em cana-de-açúcar verificaram incremento de ATR em cana planta e cana soca. Segundo Fernandes et al. (2007) a aplicação de gesso agrícola pode contribuir de forma expressiva para o crescimento e desenvolvimento pleno da cana-de-açúcar em função do gesso aumentar a exploração do ambiente radicular e, conseqüentemente, melhor uso da água e nutrientes (ARAÚJO, 2015; FERRAZ et al., 2015).

Na média, o Pol da cana foi de 14%, o que de acordo com Almeida et al. (2005) é acima do valor mínimo de 13,0% exigido pela indústria (FERNANDES, 2000; DEUBER, 1988). O teor de fibra variou entre 12,4 e 13,1% considerado dentro do nível adequado conforme Fernandes (2003).

Os resultados de análise de solo para pH, S, Ca e Mg nas profundidades de 0 a 20 e 20 a 40 cm não apresentaram diferenças significativas aos 775 dias após aplicação dos tratamentos. Na profundidade de 0 a 20 cm as variáveis apresentaram valores médios de 5,1 de pH; 12,3 mg dm<sup>-3</sup> de S; 1,2 cmol<sub>c</sub>dm<sup>-3</sup> de Ca e 0,3 cmol<sub>c</sub>dm<sup>-3</sup> de Mg.

Na profundidade de 20 a 40 cm as médias das variáveis foram de 5,0 pH, 14,7 mg dm<sup>-3</sup> de S, 1,2 cmol<sub>c</sub>dm<sup>-3</sup> de Ca e 0,2 cmol<sub>c</sub>dm<sup>-3</sup> de Mg.

Os teores de P na profundidade 0 a 20 cm não apresentaram diferenças estatísticas entre os tratamentos, entretanto, o que se observou com extrator Mehlich1 foi uma diferença numérica do tratamento SFT + S<sup>0</sup>, FNR Bayóvar + Gesso, FN de baixa reatividade + SFT + S<sup>0</sup> e FN de alta reatividade + SFT + S<sup>0</sup> quando comparado com os demais tratamentos (Figura 21).

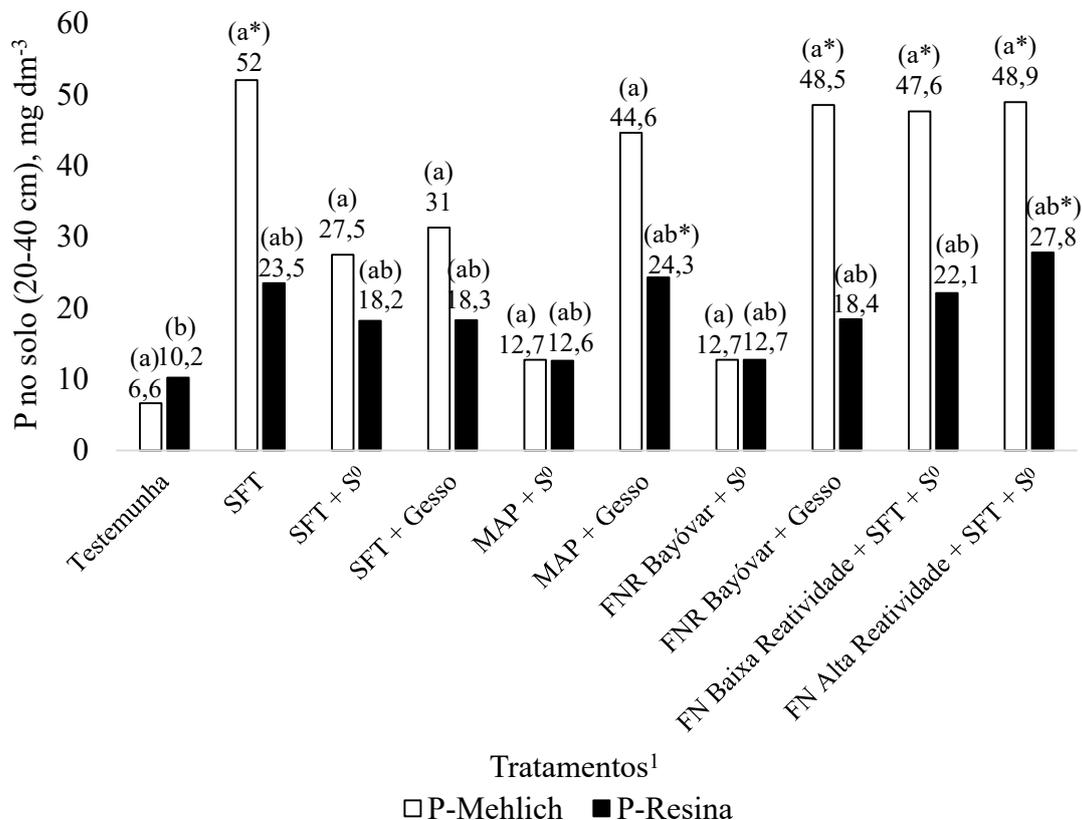


P-Mehlich: CV(%): 102,9; DMS (Dunnett): 11,99; P-Resina: CV(%): 30,5; DMS (Dunnett): 2,53;  
<sup>1</sup>Médias seguidas por letras distintas em cada variável diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância; \*Médias diferentes da testemunha em cada variável por Dunnett (P<0,05);

**Figura 21.** Teores de P do solo (0-20 cm) extraídos por Mehlich1 e Resina, 775 dias após a aplicação de diferentes fertilizantes fosfatados contendo S no plantio da cana-de-açúcar (variedade RB 92-579), Companhia Mineira de Açúcar e Álcool, Uberaba – MG.

Na profundidade de 20 a 40 cm, os teores de P (extrator Resina) com o MAP + Gesso foram superiores à testemunha (Figura 22). Já, com extrator Mehlich1 os tratamentos SFT, FNR Bayóvar + Gesso, FN de baixa reatividade + SFT + S<sup>0</sup> e FN de

alta reatividade + SFT + S<sup>0</sup> apresentaram maior incremento do que a testemunha (teste de Dunnett).



P-Mehlich: CV(%): 60,6; DMS (Dunnett): 15,17; P-Resina: CV(%): 38,0; DMS (Dunnett): 5,52; <sup>1</sup>Médias seguidas por letras distintas em cada variável diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância; \*Médias diferentes da testemunha em cada variável por Dunnett (P<0,05);

**Figura 22.** Teores de P do solo (20-40 cm) extraídos por Mehlich1 e Resina, 775 dias após a aplicação de diferentes fertilizantes fosfatados contendo S no plantio da cana-de-açúcar (Variedade RB 92-579), Companhia Mineira de Açúcar e Álcool, Uberaba – MG.

A elevada variabilidade experimental nas análises pode explicar os valores de coeficiente de variação encontrados, indicando a falta de diferenças nas análises de P no solo. Esses resultados corroboram com os de César (2016), que encontrou elevado coeficiente de variação ao utilizar os extratores Mehlich1, Resina e Bray1 nos teores disponíveis de P no solo submetidos à aplicação de diferentes fontes de P e S. Além do mais, o efeito do extrator Mehlich1 possivelmente afetou os valores de P no solo que receberam aplicação de fosfatos naturais (CHIEN, 1996; CÉSAR, 2016).

Os contrastes visando avaliar o efeito da mistura de fontes de P e S não demonstraram diferenças estatísticas sobre TCH da cana soca (Tabela 16). Entretanto,

diferença significativa de TAH foi observada para tratamentos SFT, MAP e FNR Bayóvar misturados com Gesso em comparação com SFT.

**Tabela 16.** Análise de contrastes de TCH e TAH da cana soca, para avaliar o efeito de fertilizantes fosfatados misturados com fontes de S aplicados no plantio da cana-de-açúcar (variedade RB 92-579), Companhia Mineira de Açúcar e Alcool, Uberaba – MG.

Contrastes	TCH	TAH
	----- t ha <sup>-1</sup> -----	
SFT <b>vs</b> (SFT + S <sup>0</sup> ) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (FNR Bayóvar + S <sup>0</sup> )	ns	ns
SFT <b>vs</b> (SFT + Gesso) + (MAP + Gesso) + (FNR Bayóvar + Gesso)	ns	10,8 <b>x</b> (12,2) + (12,1) + (11,4)*
(SFT + S <sup>0</sup> ) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (FNR Bayóvar + S <sup>0</sup> ) <b>vs</b> (SFT + Gesso) + (MAP + Gesso) + (FNR Bayóvar + Gesso)	ns	ns
(SFT + S <sup>0</sup> ) + (SFT + Gesso) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (MAP + Gesso) <b>vs</b> (FNR Bayóvar + Pastilha S) + (FNR Bayóvar + Gesso)	ns	ns

\* significativo pelo teste de Scheffé a 0,05 de significância; ns: não significativo.

Apesar dos baixos índices pluviométricos observados no período inicial e final de condução deste experimento aliado às condições de cultivo (área, solo, relevo, época de plantio e corte) esses resultados indicam que a associação do gesso aos fosfatos foi mais eficiente em aumentar a produção de açúcar da cana soca. Segundo Nuernberg et al. (2005), o uso de gesso favorece o crescimento radicular e sob condições de deficiência hídrica há o melhor aproveitamento da água e dos nutrientes disponíveis em profundidade, propiciando uma maior tolerância das plantas aos veranicos (FARINELLI; LOBODA, 2005; MALUFF, et al., 2010; RAIJ, 2011; ROSSETTO; SANTIAGO, 2011; BASSACO; WALCZAK, 2014; SOARES, 2016).

Para os teores de P no solo, na profundidade de 20 a 40 cm, o SFT e os fosfatos (SFT, MAP FNR Bayóvar) misturados com Gesso foram superiores aos fosfatos (SFT, MAP FNR Bayóvar) misturados com S<sup>0</sup> (Tabela 17).

**Tabela 17.** Análise de contrastes sobre os teores de P e S do solo (0-20 e 20-40 cm), 775 dias após a aplicação de fertilizantes fosfatados misturados com fontes de S sobre os teores de P (extrator Mehlich-1 e Resina) e S no plantio da cana-de-açúcar (Variedade RB 92-579), Companhia Mineira de Açúcar e Álcool, Uberaba – MG.

Contrastes	P-Mehlich1			S		
	----- mg dm <sup>-3</sup> -----					
	0 – 20 cm			20 – 40 cm		
SFT				52,0	23,5	
<b>vs</b>				<b>x</b>	<b>x</b>	
(SFT + S <sup>0</sup> ) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (FNR Bayóvar + S <sup>0</sup> )	ns	ns	ns	(27,5) + (12,7) + (12,7)*	(18,2) + (12,6) + (12,7)*	ns
SFT						
<b>vs</b>						
(SFT + Gesso) + (MAP + Gesso) + (FNR Bayóvar + Gesso)	ns	ns	ns	ns	ns	ns
(SFT + S <sup>0</sup> ) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (FNR Bayóvar + S <sup>0</sup> )				(27,5) + (12,7) + (12,7)	(18,2) + (12,6) + (12,7)	
<b>vs</b>				<b>x</b>	<b>x</b>	ns
(SFT + Gesso) + (MAP + Gesso) + (FNR Bayóvar + Gesso)	ns	ns	ns	(31,3) + (44,6) + (48,5)*	(18,3) + (24,3) + (18,4)*	ns
(SFT + S <sup>0</sup> ) + (SFT + Gesso) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (MAP + Gesso)						
<b>vs</b>						
(FNR Bayóvar + S <sup>0</sup> ) + (FNR Bayóvar + Gesso)	ns	ns	ns	ns	ns	ns

\* significativo pelo teste de Scheffé a 0,05 de significância; ns: não significativo.

Estes resultados mais expressivos observados nos tratamentos fosfatados misturados com gesso (SFT, MAP e FNR Bayóvar) se assemelham aos encontrados na cana planta. De acordo com Soares (2016) a associação de fontes de P com gesso pode aumentar a eficiência na disponibilização de P no solo, pois o gesso ao liberar íons Ca<sup>2+</sup> e SO<sub>4</sub><sup>-2</sup> profundidade, pode reduzir compostos de Al e fixação de P (RAIJ, 2011; ROSSETTO; SANTIAGO, 2011; FIORINI et al., 2016; SOARES, 2016).

Segundo Fernandes et al. (2007) a cana-de-açúcar é grande extratora de S do solo e a aplicação de gesso agrícola pode contribuir de forma expressiva para o crescimento e desenvolvimento pleno da cultura (FERRAZ et al., 2015). O favorável desenvolvimento radicular com o uso de gesso permite à cana-de-açúcar maior exploração do ambiente e, conseqüentemente, melhor uso da água e nutrientes (ARAÚJO, 2015).

Em relação ao S<sup>0</sup> pastilha, a taxa de oxidação pode justificar as respostas dos tratamentos, possivelmente devido aos baixos valores de pH, matéria orgânica (microrganismos), tamanho de partícula da fonte e baixos índices pluviométricos da área experimental (VITTI; OTTO; SAVIETO, 2015).

A aplicação de fosfato natural (alta e baixa reatividade) + SFT + S<sup>0</sup> não apresentou diferenças significativas para TCH e TAH da cana soca.

Sobre os teores de P no solo (extrator Mehlich1 e Resina), os fosfatos naturais de alta e baixa reatividade + SFT + S<sup>0</sup> foram superiores ao SFT e MAP misturados com S, profundidade 20 a 40 cm (Tabela 18). Comportamento semelhante com extrator Mehlich1 foi observado quando os fosfatos naturais de alta e baixa reatividade + SFT + S<sup>0</sup> foram comparados com o fosfato natural reativo Bayóvar misturados com S.

**Tabela 18.** Análise de contrastes sobre os teores de P e S do solo (0-20 e 20-40 cm), 775 dias após a aplicação de fertilizantes fosfatados produzidos com fosfato solúvel, insolúvel e enxofre elementar no plantio da cana-de-açúcar (Variedade RB 92-579), Companhia Mineira de Açúcar e Álcool, Uberaba – MG.

Contrastes	P-Mehlich1	P-Resina	S	P-Mehlich1	P-Resina	S
	----- mg dm <sup>-3</sup> -----					
	0 – 20 cm			20 – 40 cm		
(SFT + S <sup>0</sup> ) + (SFT + Gesso) + (MAP + S <sup>0</sup> ) + (MAP + Gesso)				(27,5) + (31,3) + (12,7) + (44,6)	(18,2) + (18,3) + (12,6) + (24,3)	
vs	ns	ns	ns	x	x	ns
(FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> ) + (FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> )				(47,6) + (48,9)*	(22,1) + (27,8)*	
SFT						
vs	ns	ns	ns	ns	ns	ns
(FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> ) + (FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> )						
(FNR Bayóvar + S <sup>0</sup> ) + (FNR Bayóvar + Gesso)				(12,7) + (48,5)		
vs	ns	ns	ns	x (47,6) + (48,9)*	ns	ns
(FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> ) + (FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> )						
FN Baixa Reatividade + SFT + S <sup>0</sup> vs FN Alta Reatividade + SFT + S <sup>0</sup>	ns	ns	ns	ns	ns	ns

\* significativo pelo teste de Scheffé a 0,05 de significância; ns: não significativo.

Conforme se esperava, os fosfatos complexos (produzidos com fonte solúvel, insolúvel e enxofre elementar) apresentaram maior eficiência sobre os teores de P no solo aos 775 dias após aplicação no sulco de plantio, indicando sua solubilização no solo.

Alguns autores verificaram resultados satisfatórios da adubação fosfatada em cana planta e seu efeito residual em cana soca. De acordo com Korndörfer; Alcarde (1992), o efeito residual de P no solo oriundo de fertilizantes tende a ser maior em cana-de-açúcar do que em culturas anuais, em função da localização do fertilizante no fundo do sulco de plantio e ausência de movimentação do solo durante quatro anos ou mais. Os fosfatos insolúveis são mais eficientes em longo prazo em razão da disponibilização

de P aumentar com o tempo decorrido da sua aplicação ao solo (RAJAN; WATKINSON; SINCLAIR, 1996; HOROWITZ; MEURER, 2004).

Além disso, o efeito da solubilização destes fosfatos naturais ocorre devido a reação de hidrólise do fosfato monocálcio proveniente da mistura do fosfato solúvel no grânulo. Essa reação produz prótons ( $H^+$ ) e solubiliza o P da rocha de alta e baixa reatividade através de acidez, gerando ácido fosfórico (CÉSAR, 2016). Outro agente importante na solubilização destes fosfatos é o  $S^0$  que gera acidez (RAJAN; WATKINSON; SINCLAIR, 1996; NASCIMENTO, 2016).

Trabalhos científicos nesse sentido já realizados em culturas como milho, soja, trigo e azevém, demonstraram eficiência agrônômica dos fosfatos naturais (alta ou baixa reatividade) associados com SFT, sendo equivalentes ou mais eficientes que os fosfatos totalmente acidulados (NACHTIGALL et al., 1989; CHIEN, 1996; PROCHNOW et al., 2004; OLIVEIRA JUNIOR, 2007; FRANZINI et al., 2009; CÉSAR, 2016).

Sobre os teores de S no solo, percebeu-se que em ambos os experimentos de campo não foram observadas diferenças estatísticas. Provavelmente a coleta de solo não foi suficiente para amostrar o S disponível no solo proveniente das fontes aplicadas, já que a profundidade de coleta foi de 0 a 40 cm e em solos arenosos o  $SO_4^{2-}$  pode ser perdido por percolação (STIPP; CASARIN, 2010).

Degryse et al. (2015) avaliaram a oxidação de diferentes fontes de S (Sulfato de Amônio; MicroEssential com 10, 9 e 15% de  $S-SO_4^-$ ; Tiger90 e Sulfurgran, ambos  $S^0$  pastilhados com bentonita e  $S^0$  farelado) em um solo de cerrado brasileiro e de Alberta, Canadá. Os autores verificaram que todos os tratamentos apresentaram taxas consideráveis de lixiviação após 40 semanas de aplicação, destacando-se para as fontes fareladas com maiores taxas de lixiviação e menores para o  $S^0$  pastilhado com bentonita.

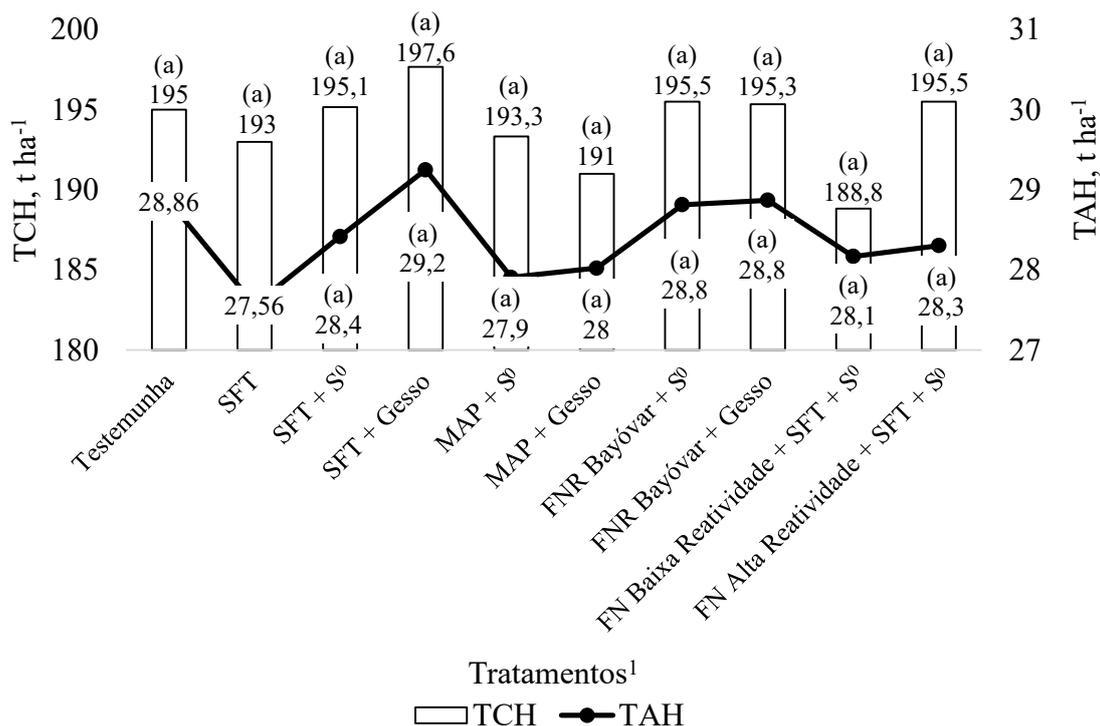
Cesar (2016), ao avaliar o efeito da aplicação de P e S, verificou que o  $SO_4^{2-}$  tendeu a se acumular no ponto mais distante do ponto de aplicação das fontes devido a competição do  $SO_4^{2-}$  pelos sítios de adsorção com o ânion  $H_2PO_4^-$ . Com a difusão do P dos fertilizantes, a maioria dos sítios disponíveis para a adsorção de ânions foi ocupada pelo  $H_2PO_4^-$ , que possui maior afinidade para adsorção nas partículas do solo do que o  $SO_4^{2-}$ , fazendo com que o sulfato migrasse de ponto mais distante da aplicação dos fertilizantes onde havia sítios disponíveis para sua adsorção (ALVAREZ et al., 2007).

Além disso, a variabilidade nas análises de solo aliado ao elevado coeficiente de variação dos testes estatísticos pode justificar a falta de diferenças. Por outro lado, solos

com teores de S inferiores a  $10 \text{ mg dm}^{-3}$ , as chances de repostas à adubação são maiores (FIORINI et al., 2016).

### 3.2.3. Produção Acumulada

Os valores acumulados de TCH e TAH apresentaram variação de 188,8 a 197,6  $\text{t ha}^{-1}$  de TCH e de 27,5 a 28,8  $\text{t ha}^{-1}$  de TAH, respectivamente (Figura 23). A produção média acumulada observada foi de 194  $\text{t ha}^{-1}$  de TCH e 28,4  $\text{t ha}^{-1}$  de TAH.



TCH: CV(%): 5,3; DMS (Dunnett): 7,42; TAH: CV(%): 5,9; DMS (Dunnett): 1,19; <sup>1</sup>Médias seguidas por letras distintas em cada variável diferem entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de significância; \*Médias diferentes da testemunha em cada variável por Dunnett (P<0,05);

**Figura 23.** Produção acumulada de colmos (TCH) e de açúcar (TAH) (Soma de dois cortes), em função da aplicação de diferentes fertilizantes fosfatados contendo S no plantio da cana-de-açúcar (Variedade RB 92-579), Companhia Mineira de Açúcar e Álcool, Uberaba – MG.

Os contrastes sobre produção acumulada de colmos e açúcar não apresentaram diferenças significativas.

#### 4. CONCLUSÕES

A mistura de fertilizantes fosfatados (SFT, MAP e FNR Bayóvar) e enxofre elementar foi eficiente em aumentar a produção de colmos e açúcar e os teores de fósforo no solo.

O fosfato natural de alta e baixa reatividade ambos incorporados com SFT e S<sup>0</sup> no grânulo foram mais eficientes em aumentar os teores de fósforo no solo que o fosfato natural reativo Bayóvar misturados com enxofre elementar e gesso.

O efeito positivo dos tratamentos com gesso em relação ao enxofre elementar pode estar relacionado à intensidade do estresse hídrico e as condições de cultivo verificado em um dos experimentos.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, J. C. V.; LEITE, C. R. F.; SOUZA, J. R. P. Efeitos de maturadores nas características tecnológicas da cana-de-açúcar com e sem estresse hídrico. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 26, n. 4, p. 441-448, 2005.  
<https://doi.org/10.5433/1679-0359.2005v26n4p441>
- ALVAREZ, V. H. A.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, LOPES, A. S. Interpretação dos resultados das análises de solo. 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.
- ALVAREZ-V, V. H.; ROSCOE, R.; KURIHARA, C. H.; PEREIRA, N. F.; Enxofre. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 595-646.
- ARAÚJO, L. G. Uso do gesso e sua influência na produção de cana-de-açúcar, atributos químicos e estoque de carbono no solo de cerrado. 2015. 101f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, 2015.
- ARAÚJO, M. S. B.; SALCEDO, I. H. Formas preferenciais de acumulação de fósforo em solos cultivados com cana-de-açúcar na região Nordeste. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 21, p. 643-650, 1997.  
<https://doi.org/10.1590/S0100-06831997000400015>
- BASSACO, M. V. M.; WALCZAK, A. Crescimento inicial do híbrido *Eucalyptus urograndis* sob diferentes doses de fósforo e gesso agrícola no município de Jaguariaíva – PR. **Revista da União Latino-americana de Tecnologia**, Jaguariaíva, v. 2, p. 78-96, 2014.
- BOLAN, N. S.; SYERS, J. K.; TILLMAN, R. W.; SCOTTER, D. R. Effect of liming and phosphate additions on sulphate leaching in soils. **J. Soil Sci.**, v. 39, p. 493-504, 1988.  
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1988.tb01234.x>
- CAIONE, G. **Avaliação de fontes de fósforo no desenvolvimento, produtividade e composição bromatológica de cana-de-açúcar**. 2011, 74f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, 2011.
- CÉSAR, F. R. C. F. **Efeito do enxofre elementar na eficiência de fosfatos naturais**. 2012. 90f. (Mestrado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.
- CÉSAR, F. R. C. F. **Eficiência agrônômica de misturas no mesmo grânulo de fosfatos acidulados, fosfatos naturais e enxofre elementar**. 2016. 136f. (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.

CHIEN, S. H.; FRIESEN, D. K.; HAMILTON, B. W. Effect of application method on availability of elemental sulfur in cropping sequences. **Soil Science Society of American Journal**, v. 52, p. 165-169, 1988.

<https://doi.org/10.2136/sssaj1988.03615995005200010029x>

CHIEN, S. H.; MENON, R. G.; BILLINGHAM, K. S. Phosphorus availability from phosphate rock as enhanced by water-soluble phosphorus. **Soil Science Society of America Journal**, v. 60, p. 1173-1177, 1996.

<https://doi.org/10.2136/sssaj1996.03615995006000040031x>

CONSECANA – Conselho dos Produtores de cana-de-açúcar, açúcar e álcool do estado de São Paulo. **Manual de Instruções**. 5ed. Piracicaba: CONSECANA, 2006.112p.

COPERSUCAR. **Amostragens e análise de cana-de-açúcar**. São Paulo: Centro de Tecnologia Copersucar, 1980. 37p.

COWELL, L. E.; SCHOENAU, J. J. Stimulation of elemental sulfur oxidation by sewage sludge. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 75, p. 247-249, 1995.

<https://doi.org/10.4141/cjss95-035>

DEUBER, R. Maturação da cana-de-açúcar na região sudeste do Brasil. In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 4., 1988, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: Centro de Tecnologia COOPERSUCAR, 1988. p. 33-40.

DIAS, K. G. L. **Fontes e doses de foto do cafeeiro: produtividade, dinâmica de nutrientes no solo e nutrição mineral de plantas**. 2012, 90f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2012.

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

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solo. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2009b. 412p.

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

EVANS, J.; MCDONALD, L.; PRICE, A. Application of reactive phosphate rock and sulfur fertilizers to enhance the availability of soil phosphate in organic farming.

**Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 75, p. 233-246, 2006.

<https://doi.org/10.1007/s10705-006-9030-1>

EVANS, J.; PRICE, A. Influence of rates of reactive phosphate rock and Sulphur on potentially available phosphorus in organically managed soils in the south-eastern near-Mediterranean cropping region of Australia. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 84, p. 105-118, 2009.

<https://doi.org/10.1007/s10705-008-9230-y>

FARINELLI, R.; LOBODA, M. S. Efeito da aplicação de gesso agrícola no comportamento da cultura do amendoim. **Cultura Agronômica**, Ilha Solteira, v. 15, n. 2, p. 1-20, 2005.

FERNANDES, A. C. **Cálculos na Agroindústria da Cana-de-açúcar**, 2. ed. Piracicaba: STAB - Sociedade dos Técnicos Açucareiros e Alcooleiros do Brasil. 2003. 240p.

FERNANDES, A. C. **Cálculos na agroindústria da cana-de-açúcar**. Piracicaba: Stab: Açúcar, Álcool e Subprodutos, v. 11, p. 55-65, 2000.

FERRAZ, E. L. S.; BARBOSA, M. A.; FRANCO, F. O.; BATISTA, J. L.; SANTOS, D. M. M. Gessagem em cana de açúcar efeitos no solo e produção. **Informativo Técnico do Semiárido**, v. 9, n. 2, p. 70 -79, 2015.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciênc. Agrotec**, v. 38, n. 2, p. 109-112, 2014.  
<https://doi.org/10.1590/S1413-70542014000200001>

FIORINI, I. V. A.; PINHO, R. G. V.; PIRES, L. P. M.; SANTOS, À. O.; FIORINI, F. V. A.; CANCELLIER, L. L.; RESENDE, E. L. Avaliação de fontes de enxofre e das formas de micronutrientes revestindo o npk na cultura do milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 15, n. 1, p. 20-29, 2016.  
<https://doi.org/10.18512/1980-6477/rbms.v15n1p20-29>

FRANDOLOSO, J. F.; LANA, M C.; FONTANIVA, S.; CZYCZA, F. R. Eficiência de adubos fosfatados associados ao enxofre elementar na cultura do milho. **Rev. Ceres, Viçosa**, v. 57, n. 5, p. 686-694, 2010.  
<http://dx.doi.org/10.1590/S0034-737X2010000500019>

FRANZINI, V. I.; MURAOKA, T.; CORASPE-LEON, H. M.; MENDES, F. L. Eficiência de fosfato natural reativo aplicado em misturas com superfosfato triplo em milho e soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, p. 1092-1099, 2009.  
<https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009000900004>

GEELHOED, J. S.; HIEMSTRA, T.; VAN RIEMSDIJK, W. H. Phosphate and sulfate adsorption on goethite: Single anion and competitive adsorption. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 61, n. 2, p. 2389-2396, 1997.  
[https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(97\)00096-3](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(97)00096-3)

GERMIDA, J. J.; JANZEN, H. H. Factors affecting the oxidation of elemental sulfur in soils. **Fertilizer Research**, v. 35, p. 101-114, 1993.  
<https://doi.org/10.1007/BF00750224>

HAMID, A. M. A. **Effect of sulfur fertilizer on sugarcane in the heavy clay soils of Sudan**. 2014. 88f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Colégio de Doutorado, Universidade de Ciência e Tecnologia do Sudão, Kanana, Sudão, 2014.

- HOROWITZ, N.; MEURER, E. J. Eficiência agronômica de fosfatos naturais. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. (Ed.). **Fósforo na agricultura brasileira**. Piracicaba, POTAFOS, 2004. p. 665-682.
- KIRIMIZARCHI, M.; AMINUDDIN, H.; KHANIF, M. Y.; RADZIAH, O. Elemental Sulphur application effects on nutrient availability and sweet maize (*Zea mays* L.) response in a high pH soil of Malaysia. **Malaysian Journal of Science**, v.18, p.75-86, 2014.
- KITTAMS, H. H.; ATTOE, O. J. Availability of phosphorus in rock phosphate-sulfur infusions. **Agronomy Journal**, v. 57, p. 331-334, 1965.  
<https://doi.org/10.2134/agronj1965.00021962005700040006x>
- KORNDÖRFER, G. H.; ALCARDE, J. C. Acúmulo e teor de fósforo em folhas de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**. Campinas, v. 16, n. 2, p. 217-222, 1992.
- KUMAR, V.; CHAND, M.; SINGH, S.; SINGH, R. Effect of Sulphur application on sugarcane production in Haryana. **Indian Journal of Sugarcane Technology**, v. 31, n. 1, p. 1-5, 2016.
- KUMAR, V.; GOYAL, N. K.; KAMBOOJ, B. R. Effect of different levels and sources of Sulphur application on sugarcane production. **Sugar Tech**, v. 13, n. 2, p. 103-107, 2011.  
<https://doi.org/10.1007/s12355-011-0063-7>
- LAVANHOLI, M. G. D. P. **Qualidade da cana-de-açúcar como matéria prima para produção de açúcar e álcool**. In: DINARDO-MIRANDA, L. L.; VASCONCELOS, A. C. M.; LANDELL, M. G. A. Campinas: Instituto Agronômico, 2008. 882p.
- LÉON, L. A.; FENSTER, W. E.; HAMMOND, L. L. Agronomic potential of eleven phosphate rocks from Brazil, Colombia, Perú and Venezuela. **Soil Sc. Soc. Am. J.**, Boulder, v. 50, p. 798-802, 1986.
- MALUF, H. J. G., RAMALHO, J. R. C.; COSTA, S. G.; SILVA, J. C. O.; PINTO, S. I. C. Efeito de doses de gesso agrícola na absorção de nutrientes na cultura do milho (*Zea mays* L.). In: III Semana de Ciência e Tecnologia IFMG. **Anais...** Bambuí, MG. 2010.
- MARTINEZ, H. E. P.; CARVALHO, J. G.; SOUSA, 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.
- MOKWUNYE, A. U.; CHIEN, S. H. Reactions of partially acidulated phosphate rock with soils from the tropics. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, p. 477-482, 1980.  
<https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400030008x>

- NACHTIGALL, G. R.; BRAUNER, J. L.; ZOLEZZI, M.; TAPIA, F. Mistura de superfosfato triplo com fosfato de Jacupiranga no mesmo grânulo na eficiência do fosfato natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 13, p. 269-273, 1989.
- NASCIMENTO, C. A. C. **Frações de fósforo no solo e aproveitamento de fosfatos pela cana-de-açúcar**. 2016. 77f. (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.
- NORMAN, A. L.; GIESEMANN, A.; KROUSE, H. R.; JÄGER, H. J. Sulphur isotope fractionation during Sulphur mineralization: results of an incubation-extraction experiment with a Black Forest soil. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 34, p. 1425-1438, 2002.  
[https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(02\)00086-X](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(02)00086-X)
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solos e planta em condições tropicais**. Viçosa, MG, Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.
- NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. Fósforo. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG: SBCS, 2007. p. 471-550.
- OLIVEIRA JUNIOR, A. **Eficiência agrônômica de fosfatos de rocha, utilizados isoladamente ou associados ao superfosfato triplo, para a cultura da soja**. 2007. 123f. (Doutorado – Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.
- PEREIRA, J. R.; FARIA, C. M. B.; MORGADO, L. B. Efeito de níveis e do resíduo de fósforo sobre a produtividade da cana-de-açúcar em vertissolo. **Pes. Agropec. Bra.**, Brasília, v. 30, v. 1, p. 43-48, 1995.
- PRADO, H. Ambientes de produção de cana-de-açúcar na região Centro-Sul do Brasil. Potafós, Piracicaba. **Informações Agronômicas**, n. 110, p. 13-17, 2005.
- PROCHNOW, L. I.; CHIEN, S. H.; CARMONA, G.; HENAO, J. Greenhouse evaluation of phosphorus sources produced from a low-reactive Brazilian phosphate rock. **Agronomy Journal**, v. 96, p. 761-768, 2004.  
<https://doi.org/10.2134/agronj2004.0761>
- RAIJ, B. V.; ANDRADE, J.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. IAC. 284p. 2001.
- RAIJ, B. V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas: Instituto Agrônômico/Fundação IAC. 1997. 285p. (Boletim 100).
- RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420p.
- RAJAN, S. S. S.; WATKINSON, H.; SINCLAIR, A. G. Phosphate rocks for direct application to soils. **Advances in Agronomy**, v. 57, p. 77.159, 1996.

RIDESA – Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro. **Catálogo nacional de variedades “RB” de cana-de-açúcar**. Rede Interuniversitária para o Desenvolvimento do Setor Sucroalcooleiro, Curitiba, 2010. 136p.

ROSSETTO, R.; SANTIAGO, A. D. **Gessagem**. EMBRAPA: Agência de Informação Tecnológica – AGEITEC. 2011. Disponível em: <[https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01\\_35\\_711200516717.html](https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_35_711200516717.html)> Acesso em: 05 ago. 2018.

SAIK, R. D. The evolution of a sulphur bentonite fertilizer: one company's perspective. **Sulphur in Agriculture**, Washington, v. 19, p. 74-77, 1995.

SAVINI, I.; KOALA, S.; KIHARA, J. Minjingu phosphate rock availability in low-pH highly weathered soil as affected by added salts. **Scientia Agricola**, v.72, p.440-451, 2015.

<https://doi.org/10.1590/0103-9016-2014-0315>

SESSO, F. **Variedades de cana CTC e seu manejo**. XIV Seminário da cana-de-açúcar STAB Centro, Vitória. 2014. Disponível em: <[http://www.stab.org.br/xiv\\_sem\\_cana\\_centro\\_2014/fernando\\_web.pdf](http://www.stab.org.br/xiv_sem_cana_centro_2014/fernando_web.pdf)> Acesso em: 07 ago. 2018.

SIMÕES NETO, D. E.; OLIVEIRA, A. C.; FREIRE, F. J.; FREIRE, M. B. G. S.; NASCIMENTO, C. W. A.; ROCHA, A. T. Extração de fósforo em solos cultivados com cana-de-açúcar e suas relações com a capacidade tampão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, p. 840-848, 2009.

<https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000700005>

SOUSA, D. M. G.; REIN, T. A. Disponibilidade de fósforo em latossolo de cerrado sob plantio direto adubado com duas fontes de fósforo avaliada por diferentes extratores. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 32. **Anais...** 2012.

SOUSA, D. M. G.; REIN, T. A.; GOEDERT, W. J.; LOBATO, E.; NUNES, R. S. Fósforo. In: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: Nutrientes**. Informações Agronômicas, v. 2, p. 71-126, 2010.

SOUSA, R. T. X. **Fertilizante organomineral para a produção de cana-de-açúcar**. 2014. 81f. Tese (Doutorado em Agronomia/Fitotecnia) – Instituto de Ciências agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

SPSS v.17.0.0. **SPSS**. Chicago, Illinois, 2008. CD-ROM

VITTI, G. C.; OTTO, R.; SAVIETTO, J. Manejo do Enxofre na agricultura. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 152, p. 1-14, 2015.

WIEDENFELD, B. Sulfur applications effects on soil properties in a calcareous soil and on sugarcane growth and yield. **Journal of Plant Nutrition**, v. 34, p. 1003-1013, 2011. <https://doi.org/10.1080/01904167.2011.555582>

ZAVASCHI, E. **Avaliação do superfosfato triplo orgânico-complexado**. 2014. 74p.  
Tese (Doutorado) – Escolha Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade  
de São Paulo, Piracicaba, 2014.

**CAPÍTULO 4: SULFUR FERTILIZATION IN LOUISIANA SUGARCANE  
PRODUCTION SYSTEMS**

## ABSTRACT

NICCHIO, BRUNO NICCHIO. **Sulfur fertilization in Louisiana sugarcane production systems (USA)**. 2018. 37p. Thesis (Doctorate's degree in Agronomy/Soil Science and Plant Nutrition) - Federal University of Uberlândia.<sup>1</sup>

Sulfur (S) plays an important role in sugarcane metabolism, and is required in photosynthesis and production of amino acids and proteins, withal, the crop exhibits luxury consumption and removes a considerable quantity of S from the soil. A 90 cane tonnage yield ha<sup>-1</sup> can remove as much as 20 kg of S. The demand for S fertilizers has increased, which partially contributes to increasing number of cases of S deficiencies in crop production in the US. Field experiments were established in south Louisiana to evaluate the effect of different S sources on sugarcane yield, S concentration and uptake, and quality component. The treatments were arranged in a randomized complete block design with six, four and three replications. Three trials were conducted at the LSU AgCenter Sugar Research Station using the following S sources applied at 22.4 kg ha<sup>-1</sup>: micronized elemental S (MST, Sulvaris<sup>®</sup>) blend with phosphate and potash, and a liquid form (MST, Sulvaris<sup>®</sup>), ammonium sulfate, ammonium thiosulfate, and Microessentials<sup>®</sup>. Two controls (without S and K; without S only) were also included. A large demonstration trial was also conducted at Dugas Farm in Donaldsonville based comparing the performance of phosphate-MST, potash-MST and liquid MST, ammonium sulfate, Microessentials (MES15), and a control (without S). The granular S source was broadcast applied whereas the liquid MST was dribbled approximately 15 cm from the middle of the row. The parameters analyzed were S leaf, stalk composition and removal rate, cane tonnage and sugar yield, Brix, TRS and purity content, soil S, P, K, Ca, Mg, Zn, Cu and pH. Analysis of variance was performed using program SISVAR and for any significant effect, treatment comparison was made based on Tukey test at 0.05 level of significance. The results of this study showed that S sources containing sulfate and MST (micronized elemental sulfur, Sulvaris<sup>®</sup> Inc.) were effective in raising leaf and stalk S content and stalk S removal rate of. Cane tonnage and sugar yield of S-treated plot regardless of source were numerically higher than the control plots for both locations, i.e. St. Gabriel and Donaldsonville. For Donaldsonville site, the application of phosphate MST increased BRIX and sucrose content of cane juice. Moreover, both phosphate MST and Microessentials applications were effective in raising leaf and stalk S content and stalk S removal rate of and soil test P level on a silt loam soil.

**Keywords:** Elemental sulfur, sulfate, sulfur uptake, yield and *Saccharum* spp.

---

<sup>1</sup>Supervising committee: Gaspar Henrique Korndörfer – UFU (Supervisor), Brenda Servaz Tubana – LSU (Co-supervisor).

## RESUMO

NICCHIO, BRUNO NICCHIO. **Aplicação de enxofre nos sistemas de produção de cana-de-açúcar na Louisiana (EUA)**. 2018. 37f. Tese (Doutorado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia<sup>1</sup>.

O enxofre (S) desempenha um papel importante no metabolismo da cana-de-açúcar e é necessário na fotossíntese e na produção de aminoácidos e proteínas; além disso, a cultura exibe consumo de luxo e remove uma quantidade considerável de S do solo. Um rendimento de 90 t ha<sup>-1</sup> de colmos pode remover até 20 kg de S. A demanda na adubação com fontes de S aumentou, o que parcialmente contribui para aumentar o número de casos de deficiências de S na produção agrícola nos EUA. Experimentos de campo foram estabelecidos no sul da Louisiana para avaliar o efeito de diferentes fontes de S no rendimento da cana-de-açúcar, concentração e absorção de S e qualidade tecnológica. Os experimentos foram arranjados em blocos ao acaso, com seis, quatro e três repetições. Três ensaios foram conduzidos na Estação de Pesquisa de Açúcar LSU AgCenter usando as seguintes fontes S aplicadas na dose de 22,4 kg ha<sup>-1</sup>: S elementar micronizado (MST, Sulvaris<sup>®</sup>) com fosfato e potássio granulado, e uma forma líquida (MST, Sulvaris<sup>®</sup>), sulfato de amônio, tiossulfato de amônio e Microessentials (MES15). Dois controles (sem S e K; sem S somente) também foram incluídos. Um grande ensaio de demonstração também foi conduzido na Fazenda Dugas em Donaldsonville, comparando o desempenho de fosfato-MST, potássio-MST e líquido MST, sulfato de amônio, Microessentials<sup>®</sup> e controle (sem S). A fonte granular S e MST líquida foram aplicadas na faixa aproximada de 15 cm da linha da cana. Os parâmetros analisados foram: S foliar, concentração e acúmulo de S no colmo, tonelada de colmos e açúcar, Brix, ATR, teor de pureza, S, P, K, Ca, Mg, Zn, Cu e pH do solo. A análise de variância foi realizada utilizando o programa SISVAR e, quando significativo, a comparação do tratamento foi feita com base no teste de Tukey, com nível de significância de 0,05. Os resultados deste estudo mostraram que as fontes de S contendo sulfato e MST (enxofre elementar micronizado, Sulvaris<sup>®</sup> Inc.) foram efetivas em elevar o S foliar e concentração e acúmulo de S no colmo. A produção de colmos e de açúcar das parcelas tratadas com S, independentemente da fonte, foram numericamente superiores às parcelas controle para ambos os locais, ou seja, St. Gabriel e Donaldsonville. Para o site de Donaldsonville, a aplicação de fosfato MST aumentou o conteúdo de BRIX e sacarose do caldo de cana. Além disso, as aplicações de fosfato MST e Microessentials foram eficientes em aumentar o S foliar e concentração no colmo, acúmulo de S e teor de P em solo siltoso.

**Palavras-chave:** Enxofre elementar, sulfato, extração de enxofre, produtividade e *Saccharum spp.*

---

<sup>1</sup>Comitê Orientador: Gaspar Henrique Korndörfer – UFU (Orientador), Brenda Servaz Tubana – LSU (Co-orientadora).

## 1. INTRODUCTION

Sugarcane is commercially produced in four states in the United States: Louisiana, Florida, Texas, and Hawaii. In Louisiana, this activity is part of history of the state and economy, being also characterized as one of the American historical industries (LEGENDRE, 2001; SANTOS, 2017). It is important to know that the sugarcane production is vital to Louisiana's economy with an annual economic impact of \$2 billion to cane growers and raw sugar factories, while also generating an overall economic value of \$3 billion. Sugarcane is produced on more than 160.000 hectares of land in South Louisiana with production of approximately 13 million tons of cane yearly with average yield of 76,6 t ha<sup>-1</sup> compare to the average yield of the country at 80 t ha<sup>-1</sup>. Suffice to say, sugarcane production and processing is a major part of Louisiana's economy and a treasured way of life for hundreds of farming families in state (AMERICAN SUGAR CANE LEAGUE, 2018; USDA, 2018).

In this region of the USA, cane cultivation is practically done for 9 months with the planting season from July to October. During winter (December to February), cane shoots are frozen back to the ground and resprouts and begins to grow and tiller in the spring (March to May). Cane grows most rapidly during the summer months (June to August) and with adequate moisture and warm temperatures, sugarcane can grow more than one inch per day. In Louisiana, three or four annual crops are harvested from each planting (AMERICAN SUGAR CANE LEAGUE, 2018). Therefore, sugarcane nutrition requires substantial attention and inputs in order to ensure maximum production (WIEDENFELD, 2011).

Sulphur (S) is one of the 17 elements essential to crop production, and it is essential for maximum crop yield and quality, often ranked behind only nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) in importance and is becoming more of a limiting nutrient in crop production than in the past (JESCHKE; DIEDRICK, 2010). The atmospheric S deposition has declined since the implementation of Clean Air Act in 1985, which partially contributes to increasing number of cases of S deficiencies in crop production in the US. The reasons for this increasing need include: higher crop yields, which require more S; increased use of high analysis fertilizers containing little or no S; reduced amounts of atmospheric S fallout in rainfall; and reduced soil S reserves from organic matter losses due to mineralization and erosion. Since S is essential for the

development and nutritional quality of crops, it must be replenished to avoid yield losses (LUCHETA; LAMBAIS, 2012; HAMID; DAGASH; AHMED, 2014).

Sulfur plays an important role in plant metabolism, and is required in photosynthesis and production of amino acids (methionine and cysteine) and proteins. It is involved in chlorophyll formation, activation of enzymes and is a part of vitamins biotin and thiamine (B1) (HEGDE; BABU, 2007; SAMARAWEERA, 2009). Sulfur deficiencies are often confused with N deficiencies. Symptoms of S deficiency appear as stunted plant growth, general yellowing of leaves. In less severe S deficiency situations, visual symptoms may not be apparent, but both yield and quality of crops will be affected. Sulfur concentrations in crop plants should range between 0,2 and 0,5 percent and the elemental status of crops is best diagnosed by plant analysis (TANDON, 1991; HAMID; DAGASH; AHMED, 2014).

The concentration of S in plant tissue is commonly used as an aid in diagnosis of deficiency, and the establishment of critical concentration values is an essential prerequisite for the interpretation of leaf analysis (SHRIFT, 1961; RANDALL et al., 1997). Sugarcane exhibits luxury consumption and removes a considerable quantity of S from the soil. Based on previous works, cane stalk S content ranged from 50 to 90 g kg<sup>-1</sup> and a 90 ton millable stalk yield ha<sup>-1</sup> can remove as much as 20 kg S (HAMID; DAGASH; AHMED, 2014).

About 69 million tons of S is produced annually in the world, in all its forms to be consumed by the global industry. The largest exporting countries in the world are (in descending order): Canada, Russia, Saudi Arabia, United Arab Emirates, Kazakhstan, Japan and Iran, representing more than 70% of world production. As the main importing countries, we have China, Morocco, the USA, Tunisia, India and Brazil. The S-containing fertilizers can be divided into two main groups according to their chemical form: sulphate and elemental S (S<sup>0</sup>). Sulphate fertilizers, such as gypsum or ammonium sulphate, provide an immediate source of S to the plant, but sulphate is susceptible to leaching losses. Elemental S fertilizers contain very high concentrations of S (70–100%) and vary greatly in the physical characteristics. They may have the potential benefits of offering a continual release of sulphate during the growth season and into subsequent growth seasons together with minimal SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> leaching loss. The use of S<sup>0</sup> as fertilizer is a cheap alternative to replenish S lost from the soil and allows the utilization of concentrated commercial forms of N and P. Molten S<sup>0</sup> mixed with sodium/calcium bentonite results in a product that is safe and easy to apply. The product works based on

the principle that clay particles absorb water and swell, which subsequently cause the prills to fracture and disperse small particles of  $S^0$  (RILEY; ZHAO; MCGRATH, 2000; LUCHETA; LAMBAIS, 2012).

Granular  $S^0$  has been used by growers in recent years because of better handling and blending properties compared to powdered S and also because the physical properties of powdered S make commercial application difficult and segregation of different particle sizes in fertilizer blends preventing uniform distribution of mixed fertilizers (MISERQUE; PIRARD, 2004; CHIEN; GEARHART; VILLAGARCIA, 2011). In addition also formulations are currently available consisting of micronized elemental S (i.e. microspheres having a particle size of 1-6 microns) which can be applied on the ground or in a foliar spray as a wettable suspension (CHAPMAN, 1989). Although oxidation of elemental S by soil microorganisms is slower when the S is in the granular form, this may be an advantage for sugarcane because it is a long cycle culture (RICE; GILBERT; MCCRAY, 2010; CHIEN; GEARHART; VILLAGARCIA, 2011).

Elemental S is increasingly being used as a fertilizer for agricultural crops, as a result of more widespread S deficiency in many regions of the world and has many advantages as a fertilizer, but it must be oxidized by soil microorganisms to  $SO_4^{2-}$  before it becomes available to plant (BEATON; HENDERSON, 1998). The rate of  $S^0$  oxidation is strongly dependent on environmental conditions, fertilizer properties, and application methods. Soil temperature and moisture are major factors affecting microbial populations and activity while  $S^0$  particle size, fertilizer granule dispersability, and fertilizer placement also influence greatly the oxidation of  $S^0$  (JANZEN; BETTANY, 1987; GERMIDA; JANZEN, 1993; ZHAO et al., 1996; BEATON; HENDERSON, 1998; HU et al., 2002).

Sulfur deficiency has become more common in the last decades and the demand for S fertilizers has increased. Commercial fertilizers containing elemental S ( $S^0$  or ES) are usually in granular form, but their efficiency under field conditions has rarely been studied (DEGRYSE et al., 2018). In view of the limited information available on the response of sugarcane to S fertilization in Louisiana, replicated field experiments were conducted to evaluate the effect of different S sources on sugarcane yield and quality components and S status of both cane and soil.

## 2. MATERIAL AND METHODS

### 2.1. Description of sulfur sources

Six S sources were used for this research: two liquid (liquid MST and ammonium thiosulfate) and four granulated sources (ammonium sulfate, Microessentials/MES15, phosphate and potash MST). The complete analysis of these S sources is shown in Table 1.

**Table 1.** Nutrient composition and concentration of the different sources of S.

Description	S	N	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
	-----%-----			
Phosphate MST <sup>‡</sup> (MAP + MST) <sup>1</sup>	22	10	-	44
Microessentials (MAP <sup>†</sup> + AS + MST) <sup>1</sup>	15	13	-	33
Potash MST <sup>1</sup>	13	-	52	-
Potash + Ammonium Sulfate <sup>1</sup>	24	12	60	-
Liquid MST <sup>2</sup>	45	8	-	-
Ammonium Thiosulfate <sup>3</sup>	26	12	-	-

<sup>‡</sup>MST<sup>TM</sup>: micronized elemental sulfur (Sulvaris Inc.); <sup>†</sup>MAP: monoammonium phosphate; <sup>1</sup>granular sources; <sup>2</sup>liquid source with density 13.3 kg L<sup>-1</sup>; <sup>3</sup>liquid source with density 10.9 kg L<sup>-1</sup>.

The phosphate MST used in this experiment is a mixture of ammonium phosphate with micronized elemental sulfur. The Microessentials (MES15) is MAP enriched with S as 7.5% sulphate and 7.5% as elemental S. The potash MST is a combination of potassium chloride and elemental S in the granule. The potash + ammonium sulfate is the major potash fertilizer containing S and it is a white material produced by different processes, depending on the original raw material. Most potassium sulfate (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) is recovered directly from potash salts or brines. About 40% of world K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> production is based on the reaction between potassium chloride and H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (FAN, 2007; RANDAZZO, 2009; HAMID, 2014). The liquid MST is a combination of elemental S and urea-ammonium nitrate (UAN) solution. Ammonium thiosulfate (ATS) is a popular liquid source of S because of its high solubility and compatibility with various ions. A wide variety of N-S, N-P-S, and N-P-K-S formulations can be derived with ATS. Fertilizer grade ATS is in 60% aqueous solution and it is compatible in any proportion with neutral to slightly acidic phosphate-containing solutions or suspension, as well as with aqueous NH<sub>3</sub> and N solutions. Thiosulfates (S<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)<sup>-2</sup> are noncorrosive and nonhazardous to handle; they also are well

adapted to or suitable for direct applications or blending, offering versatility to farmers and fertilizer retailers (RANDAZZO, 2009; HAMID, 2014).

## 2.2. Experimental design

The treatments (Table 3 and 4) were set up in randomized complete block design replicated by 6, 4 or 3 times. All sources were applied on the basis of 22.4 kg S ha<sup>-1</sup> rate. The experiments conducted at the LSU AgCenter Sugar Research Station were consisting of four dry sulfur sources (phosphate MST, Microessentials, potash MST, and potash + ammonium sulfate), two liquid sources (liquid MST and ammonium thiosulfate), and a control without S and K, and a control without S (Table 2).

**Table 2.** Treatments implemented in sites located at the LSU AgCenter Sugar Research Station, St. Gabriel, Louisiana.

Treatment No.	Source
1	Control, no S, no K
2	Control, no S
3	Phosphate MST
4	Microessentials
5	Potash MST
6	Potash + Ammonium Sulfate
7	Liquid MST
8	Ammonium Thiosulfate

The experiment conducted in Donaldsonville consisting of the same four dry sources (phosphate MST, Microessentials, potash MST, and potash + ammonium sulfate), one liquid source (liquid MST), and a control (Table 3).

**Table 3.** Treatments implemented in the demonstration plots in Donaldsonville, Louisiana.

Treatment No.	Source
1	Control
2	Phosphate MST
3	Microessentials
4	Potash MST
5	Potash + Ammonium Sulfate
6	Liquid MST

The experimental plots of first and second sites were composed of three rows with a length of 12 m and a spacing of 1,8 m between them, totaling 65 m<sup>2</sup> of area per

plot. Between the plots were adopted spaces in the headwaters with two meters without cane planted. The plot size of third site composed of three rows of 15 m in length, with a spacing of 1,8 m between them, totaling 81 m<sup>2</sup> of area per plot. The experimental plots of the Donaldsonville experiment were composed of three rows of 167 m in length, with a spacing of 1,8 m between them, totaling 902 m<sup>2</sup> of area per plot.

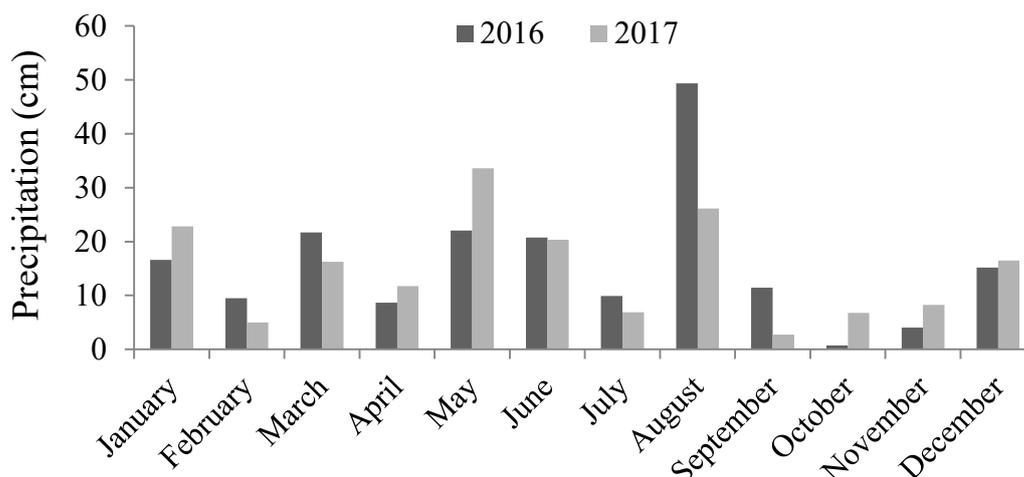
### 2.3. Establishment of Field Trials

Four field trials were conducted from 2016 to 2017 and three of them were established at the LSU AgCenter Sugar Research Station in St. Gabriel, Louisiana (Figure 1).



**Figure 1.** Satellite image of the installation area of three experiments at LSU AgCenter Sugar Research Station, St. Gabriel.

This location received an accumulated rainfall of 189,9 (1899 mm) and 176,9 (1769 mm) centimeters in 2016 and 2017 during the plant cane and first ratoon crop period, respectively (Figure 2).



**Figure 2.** Monthly accumulated precipitation in 2016 and 2017, Sugar Research Station in St. Gabriel, LA (source: weather.lsuagcenter.com).

The soil of the first and second site experiments area is classified as Commerce silt loam soil and the third is classified as Sharkey clay soil (USDA, 2013). Detailed information on soil characteristics is presented in Table 4.

**Table 4.** Chemical characterization (0-15 cm) of soil classified as Commerce silt loam and Sharkey clay soil (Sugar Research Station, Saint Gabriel, Louisiana, USA).

Sites	pH H <sub>2</sub> O	P	S	K	Ca	Mg	Cu	Zn	OM
		----- mg dm <sup>-3</sup> -----						-- % --	
1	6,2	25,9	12,4	103	1781	374	3,18	2,34	1,53
2	5,2	45,0	8,3	162	2222	466	3,12	2,20	2,06
3	6,8	19,0	8,8	91	1606	312	1,41	1,11	1,37

P, S, K, Ca, Mg, Cu, Zn = Mehlich-3; OM = Organic Matter.

The application of the treatments was carried out at the beginning of cane regrowth in early spring (April 25, 2017). For Saint Gabriel sites, granular S was applied by hand (Figure 3A) and liquid S was dribble-applied using a backpack sprayer (Figure 3B) next to the cultivation row (Figure 3C).



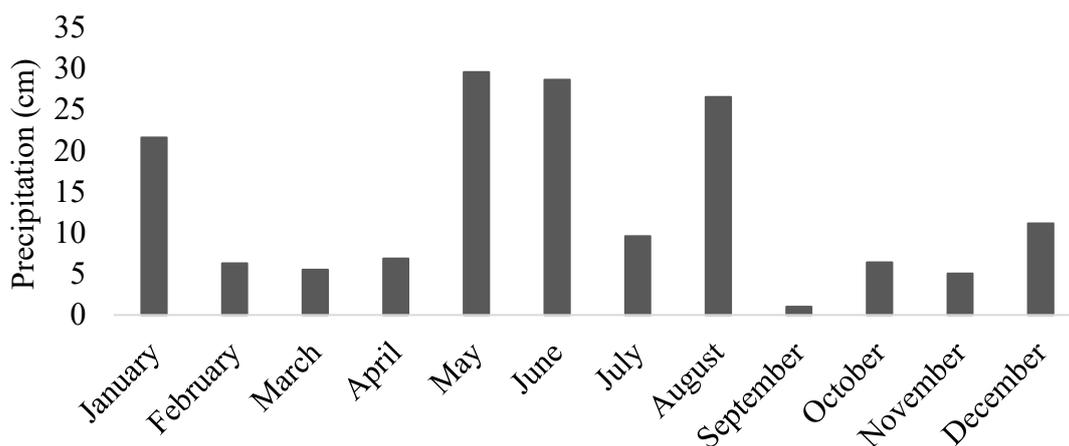
**Figure 3.** Detail of the application of sulfur sources performed in April 2017 (Sugar Research Station, Saint Gabriel, Louisiana, USA).

The fourth experiment was also conducted in partnership with Mr. Keith Dugas; his fields are located in Donaldsonville, Louisiana (Figure 4).



**Figure 4.** Satellite image of the location of the demonstration plots at Mr. Keith Dugas' Farm, Donaldsonville, Louisiana.

This location received an accumulated rainfall of 158,2 (1582 mm) centimeters during the ratoon crop period in 2017 (Figure 5).



**Figure 5.** Monthly accumulated precipitation from January to December in 2017 at Mr. Keith Dugas' Farm, Donaldsonville, LA (source: cocorahs.org).

The soil at this location is classified as silt loam soil with the detailed information presented in Table 5 (USDA, 2013).

**Table 5.** Chemical characterization (0-15 cm) of soil classified as Silt loam soil (Donaldsonville, Louisiana, USA).

pH H <sub>2</sub> O	P	S	K	Ca	Mg	Cu	Zn	OM
----- mg dm <sup>-3</sup> -----								-- % --
6.6	11,2	1,5	77,8	1250	239,3	2,61	1,72	1,35

P, S, K, Ca, Mg, Cu, Zn = Mehlich-3; OM = Organic Matter.

The granular S sources were broadcast-applied using a Gandy applicator (Figure 6A) whereas the liquid source was dribbled on the shoulders (both side) of each plot using a four-wheeler mounted with fertilizer applicator (Figure 6B and 6C).



**Figure 6.** Application method of the different sulfur sources performed in April 2017 (Donaldsonville, Louisiana, USA).

The cultivar used for the three sites at the Sugar Research Station was L01-299 with the first site as plant cane while for the second, third, and fourth sites as first ratoon. L01-299 has a good characteristic of production in the ratoons, adapts well to heavy soils and being resistant to brown rust (*Puccinia melanocephala*), leaf scald (*Xanthomonas albilineans*) and sugarcane borer (*Diatraea saccharalis*), but susceptible to brown stripes (*Cochliobolus stenospilus*) and sugarcane smut (*Ustilago scitaminea*) (GRAVOIS, 2013).

In Donaldsonville, the sugarcane variety used was HoCP 04-838 (first ratoon). This variety was released to growers in 2011 with good harvesting characteristics and has very good sugar yield potential. The variety is also rated as resistant to the sugarcane borer, making it a good choice to plant where insecticide applications may be limited. This new variety is most impressive with its good freeze tolerance and for late harvest (GRAVOIS, 2013).

Planting and fertilization (N, P, and K) were based on current LSU AgCenter recommendations. In addition, weed control was performed according to the research station program. Periodic monitoring for any biotic and abiotic stress was made until harvest in order to keep the cane in good conditions.

#### **2.4. Sampling and Analysis**

One month after the treatment application, 18 leaf (second dewlap) samples were taken from each plot. Leaf tissue samples were also taken at harvest from the 10 random whole plants cut from the middle row of each plot (Figure 7A). The ten plants were further cleaned then shredded before passing through SpectraCane Near Infrared Spectroscopy for quality components analysis which included sucrose, theoretical recoverable sugar (TRS), BRIX (total soluble solids), and purity (Figures 7B and 7C). Grab samples of shredded stalk were collected. The leaves and shredded stalk samples were oven-dried at 60°C to constant weight, ground further using a Wiley Mill grinder (Model N°3, Arthur H. Thomas CO. Philadelphia, USA), digested with concentrated nitric acid (HNO<sub>3</sub>) and 30% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> at 152°C, and analyzed using inductively coupled plasma (ICP) – Optical Emission Spectroscopy (OEM) for S composition.

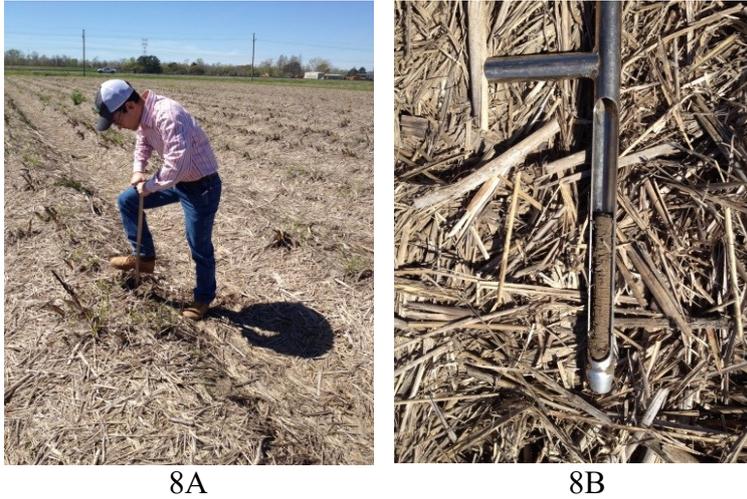
Eight months after application of S treatments (November, 2017), cane stalks for each plot was cut into billets using a chopper harvester (CASE IH Austoft® 8000 series cane harvester) and dispensed into a weigh wagon with load cells (Cameco Industries,

Thibodaux, LA) (Figure 7B). Cane tonnage per plot was determined and used for computing on a per hectare basis (Figure 7B). Sugar yield was computed as the product of cane tonnage and TRS.



**Figure 7.** Leaf and stalk sampling, processing, and spectroscopy analysis for cane quality components, Sugar Research Station Sucrose Laboratory, St. Gabriel, Louisiana, in November of 2017.

Soil samples were collected one month after S fertilization only for the Donaldsonville site. After the harvest, soil samples were collected from all the sites. At least 16 core samples from the inner rows for each plot at 0-15 cm depth were collected using a standard soil probe (JMC; Model No. 641-792-8285); samples were thoroughly mixed then placed in labeled paper bags (Figure 8A and B). Soil samples were then oven-dried (Despatch LBB series; model number LBB2-18-1) at 60°C for about three days, processed using a Humboldt electric flail soil grinder. Two grams of samples were weighed and mixed with Mehlich-3 (MEHLICH, 1984) solution. After filtering out the sample extracts, they were analyzed through inductively coupled plasma spectrometry (ICP) for P, K, S, Ca, Mg, Mn, Fe, Zn and Cu concentration. Soil pH was measured from a 1:1 DI water/soil suspension using a Seven Compact pH/Ion S220 (Mettler-Toledo Ag).



**Figure 8.** Post-harvest soil sampling at the 0-15 cm depth.

### **2.5. Statistical Analysis**

All parameters measured were subjected to analysis of variance (ANOVA) using the statistical program SISVAR (FERREIRA, 2014). Being the F test significant, the means of the treatments were compared by the Tukey test at 0.05 level of significance.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1. Leaf and stalk S content, and S stalk removal rate

The effects of S application and sources on leaf and stalk S of each site are presented in Tables 6, 7, 8 and 9. For site 1, leaf S midseason (Mid), stalk S, and S uptake were significantly affected by the treatment (Table 6). Microessentials, potash + ammonium sulfate and ammonium thiosulfate significantly increased leaf S (Mid) content of sugarcane however leaf S measured at harvest was not affected.

**Table 6.** Leaf S content 30 days after treatment application (Mid) and at harvest (Har), stalk S content and uptake of sugarcane (plant cane) treated with different sources of sulfur on a Commerce silt loam soil, St. Gabriel, LA (*Site 1*).

Treatments*	Leaf S (Mid <sup>1</sup> )	Leaf S (Har <sup>2</sup> )	Stalk S	S Uptake
	----- % -----			kg ha <sup>-1</sup>
Control (No S, No K)	0,173 ab	0,095	0,039 c	11,95 b
Control (No S)	0,138 b	0,103	0,042 bc	14,54 b
Phosphate MST <sup>+</sup>	0,176 ab	0,093	0,051 abc	15,99 ab
Microessentials	0,185 a	0,096	0,058 a	20,34 a
Potash MST <sup>+</sup>	0,180 ab	0,093	0,050 abc	17,84 ab
Potash + AS <sup>-</sup>	0,187 a	0,101	0,052 ab	16,73 ab
Liquid MST <sup>+</sup>	0,173 ab	0,103	0,051 abc	16,53 ab
Ammonium Thiosulfate	0,181 a	0,097	0,045 abc	14,64 ab
Average	0,174	0,098	0,048	16,07
<i>P-value</i>	0,057	0,802	0,004	0,049

\*Means followed by distinct letters in each column differ from each other by the Tukey test at 0,05 significance level; <sup>1</sup>Mid – Middle Season; <sup>2</sup>Har – Harvest; <sup>+</sup>Micronized Elemental Sulfur; <sup>-</sup>Ammonium Sulfate.

The application of S increased leaf S content by ~ 0.045% (~45 g kg<sup>-1</sup> dry weight). The concentrations of leaf S (Mid) were within the appropriate level content (0,13 – 0,18 % of S) to sugarcane in Louisiana according to Gravois; Golden (1982), Anderson; Bowen (1990) and Landry et al. (1991). However, the leaf S concentrations at harvest was reduced just below the critical level (< 0,10 % of S).

Furthermore, stalk S and uptake were significantly increased in plots treated with Microessentials, obtaining the highest value of stalk S content at 0,058% (58 g kg<sup>-1</sup> dry weight) and S stalk uptake or removal rate at 20,34 kg ha<sup>-1</sup> (Table 6). In terms of pattern, S treated plot regardless of source showed higher S removal rate than the control plot. Greater effect of S in plant cane was due to the well-oxidized conditions during planting, which favored availability of S (HUNSIGI, 1993; MISHRA et al., 2014). However, the results of S measured in the stalk and removal rate of plant cane crop were considered low compared with the report of Mishra et al. (2014). They

reported S uptake values ranged from 43,75 to 80,09 kg ha<sup>-1</sup> from a plant cane grown on a well-drained sandy loam soil (22,5 % clay, 58,6 % silt and 18.90 % sand) with a pH of 7,76 applied with 60 kg S ha<sup>-1</sup>.

For the Site 2, the S application significantly affected leaf S (Mid), stalk S, and S uptake (Table 7). Potash + ammonium sulfate significantly increased leaf S content by 0,042% or 42 mg kg<sup>-1</sup> dry weight and also the S treated plots when compare to the control plots.

**Table 7.** Leaf S content 30 days after treatment application (Mid) and at harvest (Har), stalk S content and uptake of sugarcane (1<sup>st</sup> ratoon) treated with different sources of sulfur on a Sharkey clay soil, St. Gabriel, LA (*Site 2*).

Treatments*	Leaf S (Mid <sup>1</sup> )	Leaf S (Har <sup>2</sup> )	Stalk S	S Uptake
	----- % -----			kg ha <sup>-1</sup>
Control (No S, No K)	0,099 d	0,080	0,028 b	5,89 b
Control (No S)	0,099 d	0,077	0,027 b	6,08 b
Phosphate MST <sup>+</sup>	0,116 c	0,081	0,043 a	9,70 a
Microessentials	0,134 ab	0,081	0,043 a	9,95 a
Potash MST <sup>+</sup>	0,118 c	0,075	0,042 a	9,20 a
Potash + AS <sup>-</sup>	0,141 a	0,074	0,043 a	9,61 a
Liquid MST <sup>+</sup>	0,121 bc	0,081	0,041 a	9,30 a
Ammonium Thiosulfate	0,128 abc	0,075	0,041 a	9,05 a
Average	0,119	0,078	0,038	8,54
<i>P-value</i>	0,000	0,813	0,000	0,000

\*Means followed by distinct letters in each column differ from each other by the Tukey test at 0,05 significance level; <sup>1</sup>Mid – Middle Season; <sup>2</sup>Har – Harvest; <sup>+</sup>Micronized Elemental Sulfur; <sup>-</sup>Ammonium Sulfate.

Results also showed that S treated plots obtained 0,040% S in stalk or 40 mg kg<sup>-1</sup> dry weight while the untreated plots (control) had only 0,028% or 28 mg kg<sup>-1</sup> dry weight (Table 7). The S treated plots had higher S uptake (9,4 kg ha<sup>-1</sup>) compared to the control plots with only 6 kg S ha<sup>-1</sup>. Ghosh et al. (1990) reported that the uptake of S increased with S application using ammonium sulfate as S source on sugarcane cv. 1148 for field trials carried out in Uttar Pradesh, India.

The S concentrations in leaf at midseason and harvest were within the critical level (0,13 – 0,18 % of S) for sugarcane in Louisiana according to Gravois; Golden (1982), Anderson; Bowen (1990) and Landry et al. (1991). The application of Microessentials and potash + ammonium sulfate raised the leaf S content within the critical S level. As Viator; Kovar; Hallmark (2001) observed the application of gypsum on sugarcane on a silty clay loam soil increased S leaf concentrations.

For Site 3, potash MST, potash + ammonium sulfate, and ammonium thiosulfate significantly increased leaf S content at midseason with values of 0,174% (174 mg kg<sup>-1</sup> dry weight), 0,170% (170 mg kg<sup>-1</sup> dry weight), and 0,165% (165 mg kg<sup>-1</sup> dry weight), respectively (Table 8).

**Table 8.** Leaf S content 30 days after treatment application (Mid) and at harvest (Har), stalk S content and uptake of sugarcane (1<sup>st</sup> ratoon) treated with different sources of sulfur on a Commerce silt loam soil, St. Gabriel, LA (*Site 3*).

Treatments*	Leaf S	Leaf S	Stalk S	S Uptake
	(Mid)	(Har)		
	----- % -----			kg ha <sup>-1</sup>
Control (No S, No K)	0,137 b	0,074	0,028 c	4,66 c
Control (No S)	0,150 ab	0,075	0,035 bc	6,14 bc
Phosphate MST <sup>+</sup>	0,163 ab	0,082	0,048 ab	8,58 ab
Microessentials	0,161 ab	0,079	0,047 ab	7,86 ab
Potash MST <sup>+</sup>	0,174 a	0,085	0,059 a	10,1 a
Potash + AS <sup>-</sup>	0,170 a	0,078	0,046 ab	7,94 ab
Liquid MST <sup>+</sup>	0,156 ab	0,082	0,040 bc	6,70 bc
Ammonium Thiosulfate	0,165 a	0,084	0,048 ab	8,74 ab
Average	0,159	0,080	0,044	7,65
<i>P-value</i>	0,023	0,055	0,000	0,001

\*Means followed by distinct letters in each column differ from each other by the Tukey test at 0,05 significance level; <sup>1</sup>Mid – Middle Season; <sup>2</sup>Har – Harvest; <sup>+</sup>Micronized Elemental Sulfur; <sup>-</sup>Ammonium Sulfate.

The S content in the leaf at harvest for Sites 1, 2 and 3 were not significantly affected by S fertilization (Table 6, 7 and 8). The S concentrations of leaf at midseason were within the sufficient S level content 0,13 – 0,18 % for sugarcane in Louisiana according to Gravois; Golden (1982), Anderson; Bowen (1990) and Landry et al. (1991). However, the leaf S concentrations at harvest fell below critical level (< 0,10 % of S). The stalk S content and uptake were significantly higher in plots treated with potash MST (Table 8) with values of 0,059% (59 mg kg<sup>-1</sup> dry weight) and 10,1 kg ha<sup>-1</sup>, respectively. Additionally, S treated plot regardless of source showed higher S removal rate than the control with no S and no K.

For Donaldsonville site, leaf S (midseason and harvest), stalk S, and S uptake were significantly affected by the treatment (Table 9). The application of S containing Microessentials and potash + ammonium sulfate significantly increased the leaf S content and S uptake of the sugarcane.

**Table 9.** Leaf S content 30 days after treatment application (Mid) and at harvest (Har), stalk S content and uptake of sugarcane (1<sup>st</sup> ratoon) treated with different sources of sulfur on a silt loam soil, Donaldsonville, LA (*Site 4*).

Treatments*	Leaf S	Leaf S	Stalk S	S Uptake
	(Mid)	(Har)		
	----- % -----			kg ha <sup>-1</sup>
Control	0,09 c	0,060 b	0,010 c	2,76 c
Phosphate MST <sup>+</sup>	0,12 bc	0,113 a	0,031 b	10,0 a
Microessentials	0,20 a	0,104 ab	0,038 a	9,89 a
Potash MST <sup>+</sup>	0,13 b	0,111 ab	0,036 ab	6,56 b
Potash + AS <sup>-</sup>	0,20 a	0,107 ab	0,036 ab	9,19 a
Liquid MST <sup>+</sup>	0,15 b	0,117 a	0,034 ab	7,95 ab
Average	0,15	0,103	0,032	7,94
<i>P-value</i>	0,00	0,102	0,000	0,00

\*Means followed by distinct letters in each column differ from each other by the Tukey test at 0,05 significance level; <sup>1</sup>Mid – Middle Season; <sup>2</sup>Har – Harvest; <sup>+</sup>Micronized Elemental Sulfur; <sup>-</sup>Ammonium Sulfate.

The potash + ammonium sulfate obtained a value of 0,20%, 0,11%, 0,036%, and 9,1 kg ha<sup>-1</sup> for leaf S content, stalk S content and S uptake, respectively whereas Microessentials-treated cane obtained 0,20%, 0,10%, 0,038%, and 9,8 kg ha<sup>-1</sup> for leaf S content, stalk S content and S uptake, respectively. All these levels were within the sufficient level of S content (0,13 – 0,18 % of S) for sugarcane (GRAVOIS; GOLDEN, 1982; ANDERSON; BOWEN, 1990; LANDRY et al., 1991). Besides these treatments, the phosphate MST application also resulted in increase of S uptake with 10,0 kg ha<sup>-1</sup> (Table 9).

All the trials conducted in St. Gabriel and Donaldsonville generally showed that S treated plot regardless of source had higher leaf S and stalk content as well as S removal rate than the control plot. McCray et al. (2011) reported that while the four trials they had in Florida demonstrated that the S application raised leaf S concentrations to sufficient level ( $\geq 1,3$  g S kg<sup>-1</sup>), not all of them showed significant response to S application. Similarly, Mishra et al. (2014) verified higher values of S uptake in ratoon crop cane on a sandy loam soil by effect of ammonium sulfate fertilization compared with control.

In general, the cane had more positive response to Microessentials than most of the other S sources, which may be indicative of the value of having S both in sulfate and elemental forms. Sulfate and thiosulfate fertilizers, which have high initial release rates, are almost immediately available for plant uptake and therefore produce maximum yield response in the year of application. In contrast, available S release from many elemental S fertilizers is very slow to adequately supply a crop during the first year after

application. Very finely divided elemental S may produce enough available S during the initial growing season to produce a significant, while below maximum, yield response when applied at usual levels (JAZEN; BETTANY, 1986).

### 3.2. Cane quality parameters (BRIX, Sucrose and Purity)

The response of TRS, BRIX, sucrose and purity to S fertilization and source were very similar with no statistical difference (Table 10).

**Table 10.** Theoretical recoverable sugar (TRS), brix, sucrose and purity of sugarcane (plant cane) treated with different sources of sulfur on a Commerce silt loam soil, St. Gabriel, LA (*Site 1*).

Treatments*	TRS <sup>1</sup> kg TC <sup>-1</sup>	BRIX -----	Sucrose ----- % -----	Purity -----
Control (No S, No K)	119	18,9	16,6	85,9
Control (No S)	122	19,4	17,0	86,0
Phosphate MST <sup>+</sup>	122	19,2	16,9	86,5
Microessentials	116	18,9	16,3	85,5
Potash MST <sup>+</sup>	119	19,1	16,7	85,7
Potash + AS <sup>-</sup>	115	18,6	16,2	85,2
Liquid MST <sup>+</sup>	124	19,2	17,1	87,6
Ammonium Thiosulfate	115	18,7	16,1	84,9
Average	119	19,0	16,6	85,9
<i>P-value</i>	0,37	0,30	0,35	0,42

\*Means followed by distinct letters in each column differ from each other by the Tukey test at 0,05 significance level; <sup>1</sup>Mid – Middle Season; <sup>2</sup>Har – Harvest; <sup>+</sup>Micronized Elemental Sulfur; <sup>-</sup>Ammonium Sulfate.

At Site 2, the quality cane were also no statistically different (Table 11).

**Table 11.** Theoretical recoverable sugar (TRS), brix, sucrose and purity of sugarcane (1<sup>st</sup> ratoon) treated with different sources of sulfur on a Sharkey clay soil, St. Gabriel, LA (*Site 2*).

Treatments*	TRS <sup>1</sup> kg TC <sup>-1</sup>	BRIX -----	Sucrose ----- % -----	Purity -----
Control (No S, No K)	125	19,6	17,3	86,8
Control (No S)	121	19,4	16,9	85,9
Phosphate MST <sup>+</sup>	125	19,7	17,3	86,6
Microessentials	128	19,9	17,7	87,4
Potash MST <sup>+</sup>	124	19,4	17,2	87,0
Potash + AS <sup>-</sup>	124	19,4	17,1	87,0
Liquid MST <sup>+</sup>	125	19,6	17,3	86,8
Ammonium Thiosulfate	128	19,9	17,7	87,3
Average	125	19,6	17,3	86,8
<i>P-value</i>	0,33	0,34	0,33	0,35

\*Means followed by distinct letters in each column differ from each other by the Tukey test at 0,05 significance level; <sup>1</sup>Mid – Middle Season; <sup>2</sup>Har – Harvest; <sup>+</sup>Micronized Elemental Sulfur; <sup>-</sup>Ammonium Sulfate.

Similar to the first and second site, TRS, BRIX, sucrose and purity had no observable response to the treatments (Table 12).

**Table 12.** Theoretical recoverable sugar (TRS), brix, sucrose and purity of sugarcane (1<sup>st</sup> ratoon) treated with different sources of sulfur on a Commerce silt loam soil, St. Gabriel, LA (*Site 3*).

Treatments*	TRS <sup>1</sup> kg TC <sup>-1</sup>	BRIX -----	Sucrose % -----	Purity
Control (No S, No K)	136	21,2	18,8	87,0
Control (No S)	139	21,4	19,2	87,8
Phosphate MST <sup>+</sup>	141	21,8	19,5	87,7
Microessentials	136	21,5	18,9	86,4
Potash MST <sup>+</sup>	134	21,1	18,6	86,8
Potash + AS <sup>-</sup>	139	21,6	19,3	87,5
Liquid MST <sup>+</sup>	136	21,1	18,8	87,7
Ammonium Thiosulfate	137	21,3	18,9	87,4
Average	137	21,4	19,0	87,3
<i>P-value</i>	0,82	0,76	0,823	0,525

\*Means followed by distinct letters in each column differ from each other by the Tukey test at 0,05 significance level; <sup>1</sup>Mid – Middle Season; <sup>2</sup>Har – Harvest; <sup>+</sup>Micronized Elemental Sulfur; <sup>-</sup>Ammonium Sulfate.

Similar trend was also observed with Hamid (2014) on a clayey and alkaline soil of Sudan wherein S application did not change cane quality parameters (BRIX, sucrose and purity). Moreover, Mishra et al. (2014) verified no significant effect of S application on sucrose content in juice for cane grown on a sandy loam soil. For the same type of soil, Kapur et al. (2005) did not observe significant influence of S fertilization on plant cane. In addition, there was no residual S effect on first ratoon of sucrose and purity content of cane juice recorded.

In Donaldsonville site, the TRS, BRIX and sucrose content of the cane treated with potash + ammonium sulfate were significantly affected by the treatments (Table 13). Here, the application of phosphate MST also significantly affected BRIX and sucrose content cane increasing their values by 0,6% using cane treated with Microessentials as reference.

**Table 13.** Theoretical recoverable sugar (TRS), brix, sucrose and purity of sugarcane (1<sup>st</sup> ratoon) treated with different sources of sulfur on a silt loam soil, Donaldsonville, LA (*Site 4*).

Treatments*	TRS <sup>1</sup> kg TC <sup>-1</sup>	BRIX ----- % -----	Sucrose	Purity
Control	125 ab	10,0 c	17,4 ab	86,3
Phosphate MST <sup>+</sup>	129 ab	20,5 a	17,9 a	86,0
Microessentials	123 b	20,0 bc	17,3 b	85,0
Potash MST <sup>+</sup>	128 ab	20,5 a	17,9 ab	86,0
Potash + AS <sup>-</sup>	129 a	20,5 a	18,0 a	86,0
Liquid MST <sup>+</sup>	128 ab	20,4 ab	17,8 ab	85,8
Average	127	20,3	17,7	85,8
<i>P-value</i>	0,05	0,02	0,02	0,28

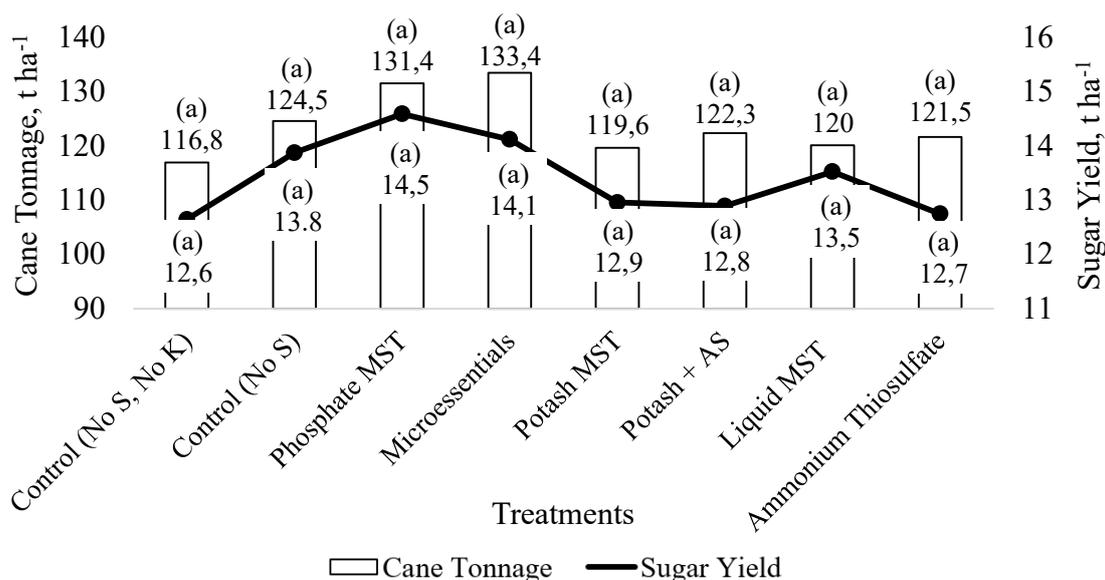
\*Means followed by distinct letters in each column differ from each other by the Tukey test at 0,05 significance level; <sup>1</sup>Mid – Middle Season; <sup>2</sup>Har – Harvest; <sup>+</sup>Micronized Elemental Sulfur; <sup>-</sup>Ammonium Sulfate.

The results obtained from this study are in agreement with reports of Singh; Srivasta; Singh (2007) that verified significant effect on BRIX and sucrose percent of cane juice with elemental S application (80 kg ha<sup>-1</sup> of S). Alam et al. (2002) also observed similar trend on sugarcane field on calcareous soil in India. They reported that the maximum sucrose content was 15.68% from plots treated with S; this was 6.95% higher than the control. Naga Madhuri; Jayaprakash; Sarala (2011) conducted experiment on a sandy loam soils which also revealed that BRIX and sucrose content of cane juice were significantly influenced by S application using elemental S and gypsum as source. Hamid; Dagash (2014) observed on a Vertisol that S application significantly affected Brix but not sucrose and purity.

For production of good quality of sugar, high sucrose and purity combined with an appropriate level of BRIX are desirable characteristics of cane juice (NAGA MADHURI; JAYAPRAKASH; SARALA, 2011). According to Sousa (2014), the quality parameters of sugarcane can be influenced by the dilution effect, which means that the high cane tonnage brought about by S application would have lower S in leaf and stalk eventually leading to comparable cane quality parameters with S unfertilized cane. Factors such as variety, temperature and moisture, and soil management influence the cane quality parameters, making it difficult to evaluate the effect of fertilizers on these parameters (PEREIRA et al., 1995). A season-long availability of S is important for crops especially for sugarcane, which has a long growing season in Louisiana.

### 3.3.Cane Tonnage and Sugar Yield

Across all sites, no statistical differences were observed on cane tonnage and sugar yield (Figure 9, 10, 11 and 12). On the other hand, S treated plots on average had numerically higher cane tonnage (7.9 t ha<sup>-1</sup>) and sugar yield (826 kg ha<sup>-1</sup>) compared with the control without S and without K (Figure 9) wherein, Microessentials and phosphate MST treated plots obtained the highest value of 133.4 and 131.4 t ha<sup>-1</sup> of cane tonnage, and 14.1 and 14.5 t ha<sup>-1</sup> of sugar yield, respectively.

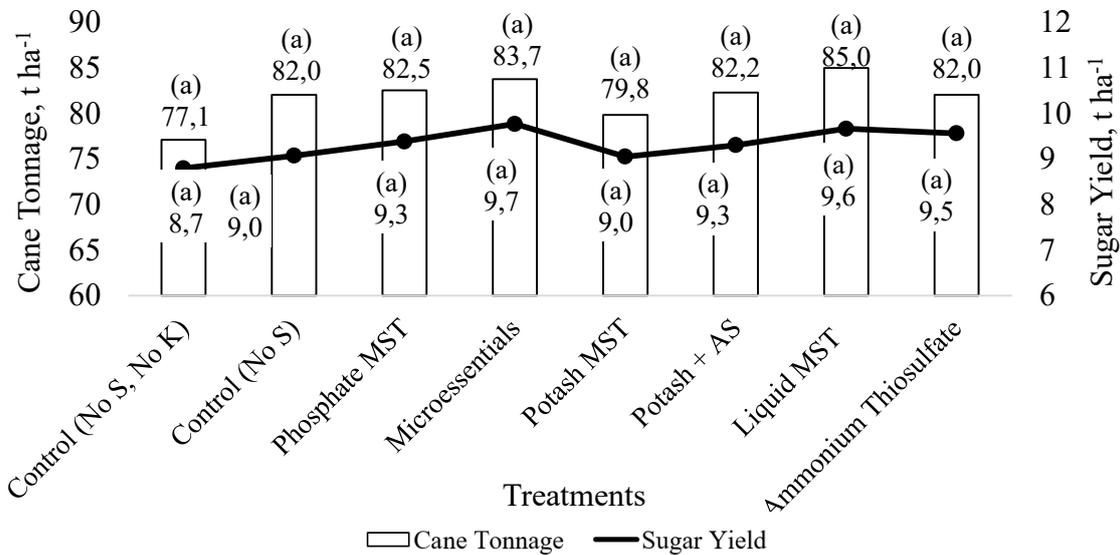


Cane Tonnage (*P-value*): 0,392; Sugar Yield (*P-value*): 0,43. Means followed by distinct letters in each variable differ from each other by the Tukey test at 0,05 significance level.

**Figure 9.** Cane tonnage and sugar yield of sugarcane (plant cane) treated with different sources of sulfur on a Commerce silt loam soil, St. Gabriel, LA (*Site 1*).

These results agree with those of Hamid (2014) which did not observe increase in cane tonnage and sugar yield with application of S (28,5 to 114,2 kg ha<sup>-1</sup> of S). While Mishra et al. (2014) observed significant influence of S application on sugarcane growth, yield and sugar accumulation plant cane (cane tonnage: 48,4-78,5 t ha<sup>-1</sup>; sugar: 5,5-8,8 t ha<sup>-1</sup>) as well as ratoon crop (cane tonnage: 76,4-102,1 t ha<sup>-1</sup>; sugar: 8,1-10,7 t ha<sup>-1</sup>). Singh et al. (2007) observed that application of S (elemental sources) up to 80 kg ha<sup>-1</sup> on an Entisol soil in India increased the cane yield significantly. Increase in cane yield of plant cane with S application has been reported by others (SAROHA; SINGH, 1980; GHOSH et al., 1990; SINGH, 2001; VIATOR; KOYAR; HALLMARK, 2001; SINGH et al. 1997; SINGH; SRIVASTAVA; SINGH, 2007; KUMAR et al., 2016).

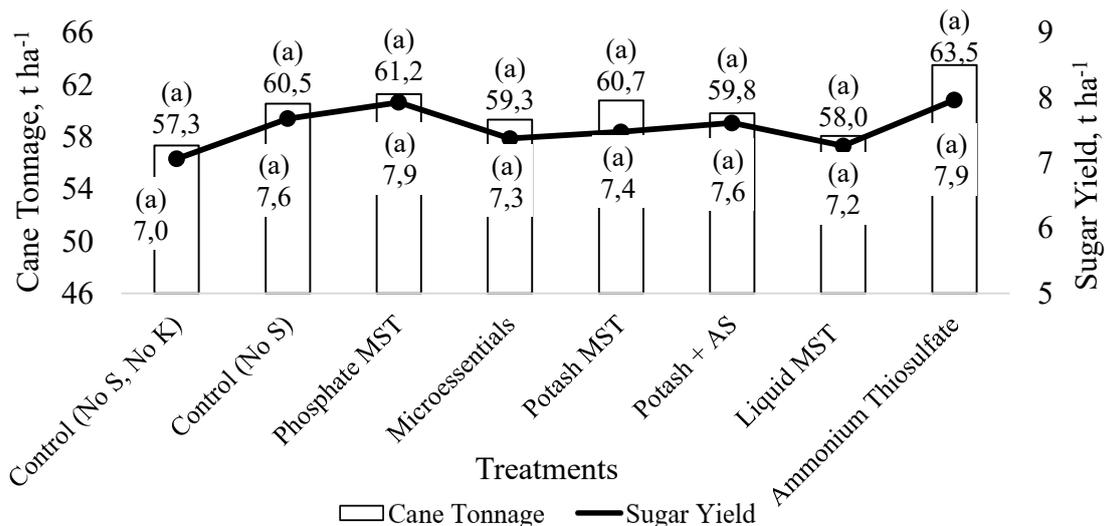
For Site 2, cane tonnage and sugar yield of S treated plots on average were numerically higher by 5,4 t ha<sup>-1</sup> and 660 kg ha<sup>-1</sup>, respectively compared with the control with no S and no K (Figure 10).



Cane Tonnage (*P-value*): 0,556; Sugar Yield (*P-value*): 0,52. Means followed by distinct letters in each variable differ from each other by the Tukey test at 0,05 significance level.

**Figure 10.** Cane tonnage and sugar yield of 1<sup>st</sup> ratoon cane treated with different sources of sulfur on a Sharkey clay soil, St. Gabriel (*Site 2*).

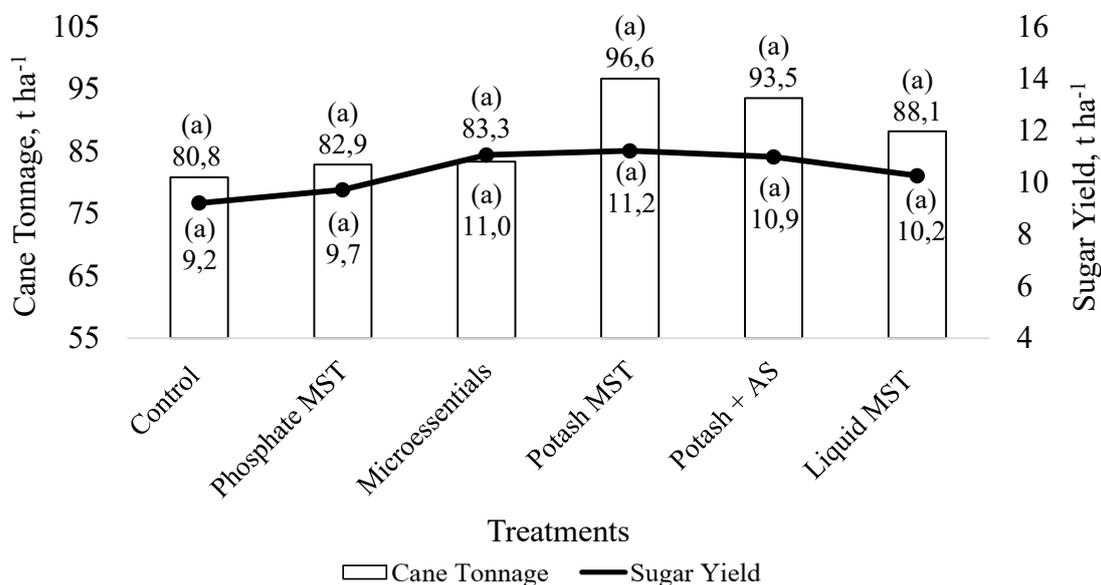
At Site 3, cane tonnage and sugar yield of S treated plots on average were numerically higher by 5,3 t ha<sup>-1</sup> and 540 kg ha<sup>-1</sup>, respectively compared with the control with no S and no K (Figure 11).



Millable Stalk (*P-value*): 0,682; Sugar Yield (*P-value*): 0,73. Means followed by distinct letters in each variable differ from each other by the Tukey test at 0,05 significance level.

**Figure 11.** Cane tonnage and sugar yield of 1<sup>st</sup> ratoon cane treated with different sources of sulfur on a Commerce silt loam soil, St. Gabriel, LA (*Site 3*).

In Donaldsonville, cane tonnage and sugar yield of S treated plots on average were numerically higher by 8,0 t ha<sup>-1</sup> and 1400 kg ha<sup>-1</sup>, respectively compared with the control (Figure 12).



Cane Tonnage (*P-value*): 0,367; Sugar Yield (*P-value*): 0,44. Means followed by distinct letters in each variable differ from each other by the Tukey test at 0,05 significance level.

**Figure 12.** Cane Tonnage and sugar yield of 1<sup>st</sup> ratoon cane treated with different sources of sulfur on a silt loam soil, Donaldsonville, LA (*Site 4*).

In general, the high variability among the replicates within treatments and the low S rate applied recommended by Gravois (2014) to Louisiana State probably did not produce a level of confidence that is high nor significant. The results are in agreement with those of Kapur et al. (2005) that verified no significant effect of 20 kg ha<sup>-1</sup> of S on a sandy loam soil, nevertheless, S-levels of 40 kg S ha<sup>-1</sup> and above increased the yield significantly. Ghosh et al. (1990) observed the application rate of 40 kg S ha<sup>-1</sup> on a sandy loam soil with low soil S level in India was sufficient. They further reported that cane and sugar yield response was optimized with 80 kg S ha<sup>-1</sup> application rate. On the other hand, Lifang et al. (2001) reported an absence of yield response by a ratoon crop cane, which received 60 kg S ha<sup>-1</sup> (potassium-magnesium sulfate and gypsum as sources) for three areas in Yunnan province in China. The low S rate applied (20 kg ha<sup>-1</sup>) in the present study probably was not enough to raise soil S to sufficient level hence did not produce observable difference on cane agronomics to reach a level of confidence that is high or significant among the replicates within the treatments.

Mishra et al. (2014) verified that the application of iron, manganese and S influenced significantly sugarcane growth, yield and sugar accumulation in plant as well as ratoon crops with three foliar applications of 1% FeSO<sub>4</sub> and 1% MnSO<sub>4</sub> during the peak tillering phase (May) or with basal application of 60 kg S ha<sup>-1</sup>. Kumar et al. (2016) also observed the influence of S application in two experiments using sugarcane plant cane and ratoon crop as test crops. There have been other yield responses to various S sources including elemental S that were attributed to increases in available S to the crop (SINGH; SRIVASTAVA; SINGH, 2007; KUMAR; GOYAL; KAMBOOJ, 2011; MCCRAY et al., 2011; NAGA MADHURI; JAYAPRAKASH; SARALA, 2011; WIEDENFELD, 2011; HAMID; DAGASH; AHMED, 2014; HAMID; DAGASH, 2014).

### 3.4. Chemical properties of soil

There were no notable changes on several soil chemical properties brought about by the application of dry and liquid S sources on Site 1 (Table 14).

**Table 14.** Chemical properties of soil treated with different sources of sulfur on a Commerce silt loam soil, St. Gabriel, LA (*Site 1*).

Treatments*	pH	S	Ca	Mg	P	K	Zn	Cu	Fe	Mn
	H <sub>2</sub> O	----- mg kg <sup>-1</sup> -----								
Control (No S, No K)	6,67	5,86	1866	423	30,7	104	3,64	3,42	495	130
Control (No S)	6,25	6,72	1889	422	35,2	110	4,20	3,54	518	141
Phosphate MST <sup>+</sup>	6,68	6,38	1896	428	33,7	105	3,81	3,49	502	137
Microessentials	6,67	6,62	1894	454	30,0	108	3,69	3,50	507	134
Potash MST <sup>+</sup>	6,78	6,96	1978	462	31,2	115	3,83	3,49	514	145
Potash + AS <sup>-</sup>	6,66	7,08	1991	455	33,7	119	3,85	3,72	544	129
Liquid MST <sup>+</sup>	6,45	6,78	1875	414	32,7	109	3,55	3,45	514	118
Ammonium Thiosulfate	6,51	6,48	1831	409	26,7	106	3,42	3,39	498	127
Average	6,63	6,59	1902	433	31,7	109	3,68	3,50	511	132
<i>P-value</i>	0,49	0,51	0,84	0,44	0,63	0,43	0,29	0,87	0,77	0,57

\*Means followed by distinct letters in each column differ from each other by the Tukey test at 0,05 significance level; <sup>1</sup>Mid – Middle Season; <sup>2</sup>Har – Harvest; <sup>+</sup>Micronized Elemental Sulfur; <sup>-</sup>Ammonium Sulfate.

The S values tended to be higher in plots treated with potash + ammonium sulfate (7,08 mg kg<sup>-1</sup>), potash MST (6,96 mg kg<sup>-1</sup>) and liquid MST (6,78 mg kg<sup>-1</sup>) compared to untreated plots (7 mg kg<sup>-1</sup>). The soil K, Zn, Cu and Fe also showed the highest value of 119; 3,83; 3,49 and 544 mg kg<sup>-1</sup>, respectively with the application of potash + ammonium sulfate (Table 14). Singh; Srivastava; Singh, (2007), observed increased available S with S application on an Entisol soil after three years of sugar

cane production (9,7; 10,1 and 11,2 mg kg<sup>-1</sup> of S). Sakal et al. (2002) also reported an increase in available S with increasing levels of S application post-harvest.

According to Gravois (2014), ratoon crop is more likely to respond to S fertilization than plant cane consequence of an environment condition with a higher incorporation of the microorganisms and organic matter in soil. Sugarcane grown on fine-textured soils (clays) is more likely to respond to S fertilization than sugarcane grown on coarse-textured soils (sandy loams and silt loams). In addition, the rate of this required oxidation process of elemental S is strongly dependent on environmental conditions, fertilizer properties, and application methods. Soil temperature and moisture are major factors affecting microbial populations and activity while S<sup>0</sup> particle size, fertilizer granule dispensability, and fertilizer placement also influence greatly the oxidation of S<sup>0</sup> (JANZEN; BETTANY, 1987 and 1986; GERMIDA; JANZEN, 1993; ZHAO et al., 1996; BEATON; HENDERSON, 1998; HU et al., 2002). Corroborating with these results, Wiedenfeld (2011), while evaluating S application in alkaline soil in Texas for sugar cane production, observed that S showed slow soil oxidation and soil movement.

There were no observable changes on most of the soil chemical properties brought about by the application of dry and liquid S sources on the second site (Table 15). However, soil S content showed significant increased than the Phosphate MST with liquid MST application with the highest value of 9,06 mg kg<sup>-1</sup>.

**Table 15.** Chemical properties of soil treated with different sources of sulfur on a Sharkey clay soil, St. Gabriel, LA (*Site 2*).

Treatments*	pH	S	Ca	Mg	P	K	Zn	Cu	Fe	Mn
	H <sub>2</sub> O	----- mg kg <sup>-1</sup> -----								
Control (No S, No K)	5,45	7,26 ab	2274	533	49,9	147	3,05	2,49	664	82,5
Control (No S)	4,51	7,38 ab	2333	525	54,8	156	3,28	2,57	672	84,1
Phosphate MST <sup>+</sup>	5,44	7,68 b	2239	519	55,9	148	3,11	2,57	675	83,0
Microessentials	5,42	8,40 ab	2206	511	56,1	155	3,04	2,52	671	83,9
Potash MST <sup>+</sup>	5,49	7,68 ab	2268	509	54,2	151	3,25	2,56	665	87,5
Potash + AS <sup>-</sup>	5,68	7,23 ab	2283	503	47,8	136	3,30	2,99	650	91,4
Liquid MST <sup>+</sup>	5,33	9,06 a	2341	541	64,6	156	3,07	2,07	692	73,9
Ammonium Thiosulfate	5,47	7,75 ab	2322	537	57,3	152	3,13	2,27	678	81,9
Average	5,47	7,68	2283	522	55,1	150	3,10	2,54	671	83,5
<i>P-value</i>	0,34	0,00	0,76	0,68	0,35	0,66	0,49	0,10	0,37	0,59

\*Means followed by distinct letters in each column differ from each other by the Tukey test at 0,05 significance level; <sup>1</sup>Mid – Middle Season; <sup>2</sup>Har – Harvest; <sup>+</sup>Micronized Elemental Sulfur; <sup>-</sup>Ammonium Sulfate.

The large differences on the rates of available S released from the elemental S forms can be attributed to initial particle size and degree of particle dispersion of the fertilizer. This can explain the effect of liquid MST, because a finely divided S-suspension tends to oxidize at a faster rate than the S-powder, which, in turn, tends to oxidize at a faster rate than the coated granule. The dispersion of S particles within the soil can govern the release of available S from elemental S; because elemental S is hydrophobic and S-oxidizing microorganisms probably cannot proliferate within these pockets of elemental S at usual soil moisture tensions that can affect its efficiency over time. Several authors observed that the oxidation of elemental S to sulfate has close relation to the total surface area of S applied (FOX et al. 1964; KOEHLER; ROBERTS, 1983; JAZEN; BETTANY, 1986 and 1987; HOROWITZ; MEURER, 2007; STIPP; CASARIN, 2010; VITTI; OTTO; SAVIETO, 2015).

With regards to the soil nutrient content based on Mehlich-3 extraction procedure, S fertilization did not show any significant influence on these measured parameters (Table 16).

**Table 16.** Chemical properties of soil treated with different sources of sulfur on a Commerce silt loam soil, St. Gabriel, LA (*Site 3*).

Treatments*	pH	S	Ca	Mg	P	K	Zn	Cu	Fe	Mn
	H <sub>2</sub> O	----- mg kg <sup>-1</sup> -----								
Control (No S, No K)	7,27	5,30	1402	358	14,2	77,6	2,46	2,34	450	130
Control (No S)	7,19	5,37	1493	372	12,0	83,8	2,41	2,48	447	127
Phosphate MST <sup>+</sup>	7,41	6,46	1546	398	16,2	91,7	2,52	2,62	483	134
Microessentials	7,33	4,96	1404	341	14,3	74,2	2,18	2,23	388	124
Potash MST <sup>+</sup>	6,74	6,21	1480	362	13,7	91,0	2,60	2,62	492	128
Potash + AS <sup>-</sup>	7,34	5,18	1368	336	11,3	81,1	2,29	2,40	390	124
Liquid MST <sup>+</sup>	7,40	6,38	1455	368	10,7	78,5	2,49	2,48	429	138
Ammonium Thiosulfate	6,99	5,89	1510	360	13,8	85,8	2,66	2,62	483	127
Average	7,21	5,75	1457	362	13,3	83,0	2,37	2,54	445	129
<i>P-value</i>	0,29	0,41	0,79	0,50	0,71	0,28	0,70	0,65	0,13	0,83

\*Means followed by distinct letters in each column differ from each other by the Tukey test at 0,05 significance level; <sup>1</sup>Mid – Middle Season; <sup>2</sup>Har – Harvest; <sup>+</sup>Micronized Elemental Sulfur; <sup>-</sup>Ammonium Sulfate.

The differences observed at Site 2 (compared to Sites 1 and 3), can be partly explained by the greater microbial population brought about by the high clay content of the soil and higher initial contents of nutrients and organic matter when compared to Sites 1 and 3. According to Vitti; Otto; Savietto (2015), the oxidation of S tends to increase in more fertile soils, with higher content of clay and organic matter due to the greater maintenance of the microbial population.

There were evident changes on soil pH, S and P content 30 days after the application of the treatments for Donaldsonville site with liquid MST showing higher pH value (6,15) and Mehlich-3 S at 12,5 mg kg<sup>-1</sup> compared to control plots with pH value of 5,53 and S value of 6,59 mg kg<sup>-1</sup> (Table 17).

**Table 17.** Chemical properties after 30 days of soil treated with different sources of sulfur on a silt loam soil, Donaldsonville, LA.

Treatments*	pH H <sub>2</sub> O	S	Ca	Mg	P	K	Zn	Cu	Fe	Mn
		----- mg kg <sup>-1</sup> -----								
Control	5,53 b	6,59 b	1312	223	12,0 b	73,5	2,09	1,83	317	126
Phosphate MST <sup>+</sup>	5,87 ab	11,5 a	1311	234	20,3 a	88,6	1,94	1,96	357	135
Microessentials	5,90 ab	11,8 a	1684	248	19,1 a	87,3	2,38	2,34	361	164
Potash MST <sup>+</sup>	5,79 ab	10,2 ab	1375	244	11,0 b	87,9	2,07	2,02	365	146
Potash + AS <sup>-</sup>	5,73 ab	9,50 ab	1360	230	12,0 b	83,8	2,07	1,93	365	149
Liquid MST <sup>+</sup>	6,15 a	12,5 a	1579	256	11,3 b	100,9	2,47	2,34	362	169
Average	5,84	10,5	1442	240	14,3	87,7	2,26	2,04	356	149
<i>P-value</i>	0,14	0,01	0,32	0,72	0,00	0,19	0,34	0,49	0,74	0,24

\*Means followed by distinct letters in each column differ from each other by the Tukey test at 0,05 significance level; <sup>1</sup>Mid – Middle Season; <sup>2</sup>Har – Harvest; <sup>+</sup>Micronized Elemental Sulfur; <sup>-</sup>Ammonium Sulfate.

The application of phosphate MST and Microessentials resulted in significant increased on soil S and P content at 11,5 and 11,8 mg kg<sup>-1</sup> of S and 20,3 and 19,1 mg kg<sup>-1</sup> of P, respectively (Table 17).

After harvest, soil P was similar in plots treated with Microessentials and phosphate MST while S, Ca, Mg, K, Zn, Cu and Mn values just tended to be higher in plots treated with Microessentials even with no statistical difference (Table 18).

**Table 18.** Chemical properties post-harvest cane of soil treated with different sources of sulfur on a silt loam soil, Donaldsonville, LA.

Treatments*	pH H <sub>2</sub> O	S	Ca	Mg	P	K	Zn	Cu	Fe	Mn
		----- mg kg <sup>-1</sup> -----								
Control	6,10	5,76	1260	229	5,98 b	69,7	1,76	1,83	317	126
Phosphate MST <sup>+</sup>	5,90	6,92	1215	222	12,20 a	72,1	1,87	1,79	379	133
Microessentials	6,27	7,71	1576	252	11,65 a	80,8	2,37	2,25	359	158
Potash MST <sup>+</sup>	6,04	6,92	1379	237	6,64 b	77,9	2,10	1,98	358	139
Potash + AS <sup>-</sup>	5,95	6,14	1218	221	5,84 b	71,5	1,93	1,93	346	136
Liquid MST <sup>+</sup>	6,25	7,16	1459	252	6,57 b	88,0	2,43	2,18	354	158
Average	6,08	6,91	1355	236	8,17	77,0	2,17	1,91	354	143
<i>P-value</i>	0,48	0,18	0,34	0,62	0,00	0,35	0,74	0,19	0,46	0,67

\*Means followed by distinct letters in each column differ from each other by the Tukey test at 0,05 significance level; <sup>1</sup>Mid – Middle Season; <sup>2</sup>Har – Harvest; <sup>+</sup>Micronized Elemental Sulfur; <sup>-</sup>Ammonium Sulfate.

The presence of S in these phosphates possibly increased the efficiency in the soil P availability because of increase in the elemental S oxidation (VITTI; OTTO; SAVIETO, 2015). The results are in agreement with those of Mishra et al. (2014) that verified significant influenced by various micronutrients and S application on P content of soil.

Jazen; Bettany (1986) evaluated the application of two soluble S sources (thiosulfate, and sulfate) and four elemental S forms (S powder, S-coated urea, S suspension, and S-impregnated urea) in a growth chamber, using five successive harvests of rapeseed as the test crop. They observed that the elemental S forms showed widely different rates of release, apparently related to the initial particle size of the product and the dispersion of the particles within the soil. Several reports show that the elemental S applied in powder can present a faster rate of oxidation because of the smaller particle size of the fertilizer allows greater contact with the soil. However, the use in this physical form is not practical due to the difficulties in handling and application management (WAINWRIGHT, 1984; GERMIDA; JANZEN, 1993; HU et al., 2002; CÉSAR, 2016). Granulated S sources can present low efficiency to powdered sources due to lower degree of dispersion in the soil, which can reduce the contact of the microorganisms with the source, requiring a longer time for colonization and oxidation. However, this may be an advantage for sugarcane because it is long cycle or cropping season (RICE; GILBERT; MCCRAY, 2010; DEGRYSE et al., 2015).

Similar pH values among the elemental S based treatments and the control for both locations can be attributed to the low oxidation rate of these sources. The oxidation process of elemental S reduces soil pH. Nevertheless, the degree of acidification varies depending on the amount of applied S<sup>0</sup> and the soil buffering capacity (YANG et al., 2008; LUCHETA; LAMBAIS, 2012; MCCRAY; SHANGNING; CRUSCIOL, 2018). In tropical soils, the oxidation rate of S generally is higher in soils with pH close to 6.0 (BURNS, 1967; NOR; TABATABAI, 1977; JANZEN AND BETTANY, 1987; CHAPMAN, 1989; HOROWITZ, 2003; VITTI; OTTO; SAVIETO, 2015).

The anion SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> is the mineral form of S most found in soil and the main one absorbed by plants under aerobic conditions but clay soils may have a high adsorption capacity of SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, reducing their movement in the soil. On the other hand, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> can be lost by leaching on sandy soils, since its movement in these soils may be higher when associated with the low organic matter present, indicating smaller reserves of organic S (STIPP; CASARIN, 2010). However, for this process to happen, minimum soil

moisture conditions are required, because under conditions of low soil moisture the oxidation rate is limited by insufficient water for microbial activity (VITTI; OTTO; SAVIETO, 2015). This was observed at Site 2 (clayey soil retains more humidity) and 30 days after application of the treatments in Donaldsonville, where the rainfall indexes were higher than the post-harvest sampling, which may have favored the higher oxidation rate of S from the applied sources (Figures 2 and 5).

Another factor that may justify the low significant response of the treatments is the initial soil S content. Soils with levels of S less than  $10 \text{ mg dm}^{-3}$  may present higher responses to S fertilization (FIORINI et al., 2016). Moreover, the majority of S in soil is present in organic forms not readily available for plant uptake (LUCHETA; LAMBAIS, 2012). Site 1 had initial S content of  $12,4 \text{ mg dm}^{-3}$  of S, and Site 3 had  $8,8 \text{ mg dm}^{-3}$ . Where the treatments effect found to significant, was for the site with initial S content of  $8,3 \text{ mg dm}^{-3}$  (Site 2) and  $0,15 \text{ mg dm}^{-3}$  (Donaldsonville).

Thus, the low S rate applied (recommended by Gravois, 2014) may have influenced the reduction of the oxidation process and the availability of S to the plants (JAZEN; BETTANY, 1987). Along with that, even with the difference on leaf S, stalk S and S uptake contents observed, the S rate used for the treatments might not have been enough to raise S contents in the soil and significantly increased cane tonnage and sugar yield. For that reason, elemental S application still needs to be adjusted to meet the plant demand for sulfate ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) on sugarcane in a short period while avoiding soil and water pollution. In general, this biological process depends on several favorable environmental conditions to obtain greater efficiency in fertilization as pH values, organic matter, microbiological activity, the presence of other nutrients, clay content, temperature, soil moisture, fertilizer particle size and soil management practices (WATKINSON; LEE, 1994; HOROWITZ, 2003; LUCHETA; LAMBAIS, 2012; VITTI; OTTO; SAVIETO, 2015).

#### 4. CONCLUSIONS

The results of this study showed that S sources containing sulfate and MST (micronized elemental sulfur, Sulvaris<sup>®</sup> Inc.) were effective in raising leaf and stalk S content and stalk S removal rate of.

Cane tonnage and sugar yield of S-treated plot regardless of source were numerically higher than the control plots for both locations, i.e. St. Gabriel and Donaldsonville.

For Donaldsonville site, the application of phosphate MST increased BRIX and sucrose content of cane juice. Moreover, both phosphate MST and Microessentials applications were effective in raising leaf and stalk S content and stalk S removal rate of and soil test P level on a silt loam soil.

## REFERENCES

- ALAM, M.; PRASAD, U. S.; SINGH, K. D. N.; NATH, R. P.; KUMAR, M. Effect of sulphur on sugarcane yield and availability of sulphur in calcareous soils. **Indian Journal of Sugarcane Technol**, v. 15, p. 6-10, 2002.
- AMERICAN SUGAR CANE LEAGUE. **What Sugarcane Means to Louisiana**. 2018. Available: <<http://www.amscl.org/industry-info>> Access: Jun 10, 2018.
- ANDERSON, D. L.; BOWEN, J. E. **Sugarcane nutrition**. Georgia: Potash and Phosphate Institute. 1990. 39p.
- BEATON, J. D.; HENDERSON, A. M. Important Considerations for S-fertilizer Management in the Asian Region. In: PROCEEDINGS OF THE FOURTH INTERNATIONAL WORKSHOP ON SULPHUR USE FOR CHINESE AGRICULTURE, Hefei, China, 1998. Washington: The Sulphur Institute, 1998.
- BURNS, G. R. **Oxidation of sulphur in soils**. Washington: Sulfur Institute, 1967.
- CHAPMAN, S. J. Oxidation of micronized elemental sulphur in soil. **Plant and Soil**, v. 116, p. 69-76, 1989.  
<https://doi.org/10.1007/BF02327258>
- CHIEN, S. H.; GEARHART, M. M.; VILLAGARCIA, S. Comparison of ammonium sulfate with other nitrogen and sulfur fertilizers in increasing crop production and minimizing environmental impact: A review. **Soil Science**, v. 176, p. 327–335, 2011.  
<https://doi.org/10.1097/SS.0b013e31821f0816>
- CÉSAR, F. R. C. F. **Eficiência agronômica de misturas no mesmo grânulo de fosfatos acidulados, fosfatos naturais e enxofre elementar**. 2016. 136f. (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.
- DEGRYSE, F.; AJIBOYE, B.; BAIRD, R.; SILVA, R. C.; MCLAUGHLIN, M. J. Oxidation of elemental sulfur in granular fertilizers depends on the Soil-Exposed surface area. **Soil Fertility & Plant Nutrition**, v. 80, p. 294-305, 2015.  
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.07.015>
- DEGRYSE, F.; SILVA, R. C.; BAIRD, R.; BEYRER, T.; BELOW, F.; MCLAUGHLIN, M. J. Uptake of elemental or sulfate-S from fall- or spring-applied co-granulated fertilizer by corn—A stable isotope and modeling study. **Field Crops Research**, v. 221, p. 322-332, 2018.  
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.07.015>
- FERREIRA, D. F. Sisvar: a Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciênc. Agrotec**, v. 38, n. 2, p. 109-112, 2014.  
<https://doi.org/10.1590/S1413-70542014000200001>

FOX, R. L.; OLSON, R. A.; RHOADES, H. F. Factors influencing the availability of sulfur fertilizers to alfalfa and corn. **Soil Science Society Proceedings**, v. 28, p. 406-408, 1964.

<https://doi.org/10.2136/sssaj1964.03615995002800030031x>

GERMIDA J. J.; JANZEN, H. H. Factors affecting the oxidation of elemental sulfur in soils. **Fertilizer Research**, v. 35, p. 101-114, 1993.

<https://doi.org/10.1007/BF00750224>

GHOSH, A. K.; RAI, R. K.; SAXENA, Y. R.; SHRIVASTAVA, A. K. Effect of sulphur application on the nutritional status, yield and quality of sugarcane. **Journal of the Indian Society of Soil Science**, v. 38, n. 1, p. 73-76, 1990.

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

GRAVOIS, K.; GOLDEN, L. E. **The Sulphur status of the 1981 stubble sugarcane crop in Louisiana**. Baton Rouge: LSU Agron. v.78, p.1-9, 1982.

HAMID, A. M. A. **Effect of sulfur fertilizer on sugarcane (*Saccharum officinarum* spp.) In the heavy clay soils (Vertisols) of (Kenana/Sudan)**. Sudan University of Science and Technology College of Graduate Studies - Thesis Degree of (M.Sc.) in Crop Production (Agronomy). Kanana, Sudan. 2014. 88p.

HAMID, A. M. A.; DAGASH, Y. M. I.; AHMED, O. A. Impact of Sulphur Fertilizer on Sugarcane Performance Under Heavy Clay Soils “Vertisols”, Sudan. **Journal of Agriculture and Environmental Sciences**, v. 3, n. 1, p. 1-9, 2014.

HEGDE, D. AND BABU, S. Correcting sulphur deficiencies in soils and crops. **Indian Journal of Fertilisers**, v. 65, p. 1-3, 2007.

HOROWITZ, N. **Oxidação e eficiência agrônômica do enxofre elementar em solos do Brasil**. 2003. 109p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

HOROWITZ, N.; MEURER, E. J. Relação entre atributos de solos e oxidação de enxofre elementar em quarenta e duas amostras de solos do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 3, p. 455-463, 2007.

HU, Z. Y.; BEATON, J. D.; CAO, Z. H.; HENDERSON, A. Sulfate formation and extraction from red soil treated with micronized elemental sulfur fertilizer and incubated in closed and open systems. **Commun. Soil Sci. Plant Anal.**, v. 33, n. 11-12, p. 1779–1797, 2002.

<https://doi.org/10.1081/CSS-120004822>

HUNSIGL, G. **Production of sugarcane (theory and practice)**. Springer, Berlin, 1993. 91-99p.

<https://doi.org/10.1007/978-3-642-78133-9>

- JANZEN, H. H.; BETTANY, J. R. Measurement of sulfur oxidation in soils. **Soil Science**, v. 134, n. 6, p. 444-452, 1987.  
<https://doi.org/10.1097/00010694-198706000-00008>
- JAZEN, H. H.; BENETTY, J. R. Release of available sulfur from fertilizers. **Can. J. Soil Sci.**, v. 66, p. 91-103, 1986.  
<https://doi.org/10.4141/cjss86-010>
- JESCHKE, M.; DIEDRICK, K. **Sulfur fertility for crop production**. Crop Insights. 2010. 20p.
- KAPUR, M. L.; SAINI, L. K.; BHULLAR, M. S.; UPPAL, S. K. Direct and Residual Effects of Sulphur Fertilization on Productivity of Sugarcane. **SugarTech**, v. 7, n. 2-3, p. 24-27, 2005.
- KOEHLER F. E.; ROBERTS, S. An evaluation of different forms of sulphur fertilizers. In: MORE, A. I. (ed.) Proceedings of the Sulphur Conference, n. 2, p. 833-841, 1983. London: The British Sulphur Corporation Limited.
- KUMAR, V.; CHAND, M.; SINGH, S.; SINGH, R. Effect of sulphur application on sugarcane production in Haryana. **Indian Journal of Sugarcane Technology**, v. 31, n. 1, p. 1-5, 2016.
- KUMAR, V.; GOYAL, N. K.; LAMBOOJ, B. R. Effect of different levels and sources of Sulphur application on Sugarcane production. **Sugar Tech**, v. 13, n. 2, p. 103-107, 2011.  
<https://doi.org/10.1007/s12355-011-0063-7>
- LANDRY, D.; FUNDERBURG, E. R.; HOLDER, J. B.; RICAUD, R. **Fertilizer and soil fertility practices for sugarcane in Louisiana**. La. Coop. Ext. Ser., Baton Rouge. 1991. 5p.
- LEGENDRE, B.L. **Sugarcane production handbook**. Pub. 2859. Baton Rouge: Louisiana State University AgCenter. 2001.
- LEITE, J. M. **Acúmulo de fitomassa e de macronutrientes da cana-de-açúcar relacinadas ao uso de fontes de nitrogênio**. 2010. 90p. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”). Piracicaba, Brazil. 2010.
- LIFANG, H.; FAN, S.; LIBO, F.; ZONGSHENG, Z. Effects of Phosphorus, Potassium, Sulfur, and Magnesium on Sugar Cane Yield and Quality in Yunnan. **Better Crops International**, v. 15, n. 1, p. 6-9, 2001.
- LUCHETA, A. R.; LAMBAIS, M. R. Sulfur in Agriculture. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1369-1379, 2012.  
<https://doi.org/10.1590/S0100-06832012000500001>

- MCCRAY, J. M.; SHANGNING, J.; CRUSCIOL, C. Influence of elemental sulfur on sugarcane yield on histosols with near-neutral pH. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 49, n. 1, p. 109–123, 2018.  
<https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1421653>
- MEHLICH, A. Mehlich-3 soil test extractant: a modification of Mehlich-2 extractant. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 15, p. 1409–1416, 1984.  
<https://doi.org/10.1080/00103628409367568>
- MISERQUE, O.; PIRARD, E. Segregation of the bulk blend fertilizers. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v. 74, p. 215–224, 2004.  
<https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2004.03.017>
- MISHRA, K.; SHUKLA, S. K.; YADAV, D. V.; AWASTHI, S. K. Iron, Manganese and Sulphur Uptake and Nutrients Availability in Sugarcane Based System in Subtropical India. **Sugar Tech**, v. 16, n. 3, p. 300–310, 2014.  
<https://doi.org/10.1007/s12355-013-0269-y>
- NAGA MADHURI, K.V.; JAYAPRAKASH, M.; SARALA, N. V. Effect of sulphur on quality of sugarcane juice and jaggery. **International Journal of Applied Biology and Pharmaceutical**, v. 2, n. 2, p. 218-221, 2011.
- NOR, Y. M.; TABATABAI, M. A. Oxidation of elemental sulphur in soils. **Soil Sci. Soc. Am J.**, v. 41, p. 736-741, 1977.  
<https://doi.org/10.2136/sssaj1977.03615995004100040025x>
- ORLANDO FILHO, J. **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba: IAA/PLANALSUCAR. Superintendência geral, 1983. 369p.
- PEREIRA, J. R.; FARIA, C. M. B.; MORGADO, L. B. Efeito de níveis e do resíduo de fósforo sobre a produtividade da cana-de-açúcar em vertissolo. **Pes. Agropec. Bra.**, Brasília, v. 30, v. 1, p. 43-48, 1995.
- RANDALL, P.; WANG, Q.; HOCKING, P.; PINKERTON, A. Critical values for sulfur in young plants of oilseed rape (*Brassica napus L.*) determined with reference to dry weight, leaf area and specific leaf weight. **Plant Nutrition for Sustainable Food Production and Environment**, p. 335–339, 1997.
- RICE, R. W.; GILBERT, R. A.; MCCRAY, J. M. **Nutritional requirements for Florida sugarcane**. UF/IFAS Electronic Data Information Source (EDIS) Database. Gainesville, Florida: University of Florida, 2010. Available on:  
<<http://edis.ifas.ufl.edu/sc028>> Access: Jun 10, 2018.
- RILEY, N. G.; ZHAO, F. J.; MCGRATH, S. P. Leaching losses of sulphur from different forms of sulphur fertilizers: a field lysimeter study. **Soil Use and Management**, v. 18, p. 120-126, 2002.  
<https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2002.tb00229.x>

SAKAL, R.; SINGH, A. P.; SINGH, K. D. N. Effect of sulphur on yield, nutrients uptake and quality of sugarcane grown on calciorthents. **Ann Pi. Soil Res.**, v. 4, p. 7-14, 2002.

SAMARAWEERA, D. N. **Studies on forms and transformation of sulphur and response of rice to sulphur application in rice-rice cropping sequence.** Thesis - Soil Science and Agricultural Chemistry, University of Agricultural Sciences, Dharwad University of Agricultural Sciences, Dharwad. 2009. 222p.

SANTOS, G. A. **Silício na produção de cana-de-açúcar.** 2017. 111f. (Doutorado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

SAROHA, M. S.; SINGH, H. G. Inter relationship between iron and sulphur in prevention of chlorosis in sugarcane on alkaline calcareous soil. **Indian Journal of Agricultural Sciences**, v. 54, p. 30- 40, 1980.

SHRIFT, A. Biochemical interrelations between selenium and sulfur in plants and microorganisms. **Federal Proceedings**, p. 695–702, 1961.

SHUKLA, S. K.; YADAV, R. L.; SUMAN, A.; SINGH, P. N. Improving rhizospheric environment and sugarcane ratoon yield through bioagents amended farmyard manure in udic ustochrept soil. **Soil and Tillage Research**, v. 99, p. 158–168, 2008.  
<https://doi.org/10.1016/j.still.2008.02.007>

SINGH, A.; RAO, S. P.; GUPTA, A. K.; KUSHWAHA, H. P. Effect of P and S application on yield, quality of nutrient content in sugarcane. **Indian Sugar**, v. 48, n. 2, p. 33-37, 1997.

SINGH, A.; SRIVASTAVA, R. N.; SINGH, S. B. Effect of Sources of Sulphur on Yield and Quality of Sugarcane. **SugarTech**, v. 1, p. 98-100, 2007.

SINGH, K. D. N. Influence of sulphur on cane juice and jaggery (gur) quality. **Indian Journal of Sugarcane Technology**, v. 16, n. 1, p. 50-53, 2001.

SOUSA, R. T. X. **Fertilizante organomineral para a produção de cana-de-açúcar.** 2014. 81f. Tese (Doutorado em Agronomia/Fitotecnia) – Instituto de Ciências agrárias, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2014.

STIPP, S. R.; CASARIN, V. A importância do enxofre na agricultura brasileira. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba, n. 129, p. 14-20, 2010.

TANDON, H. L. S. Sulphur research and agricultural production in India. **Sulphur research and agricultural production in India.** 1991.

USDA (United States Department of Agriculture), NASS (National Agricultural Statistics Service), Agricultural Statistics Board. Crop production. 2016. Available on: <[https://www.nass.usda.gov/Charts\\_and\\_Maps/A\\_to\\_Z/in-sugarcane.php](https://www.nass.usda.gov/Charts_and_Maps/A_to_Z/in-sugarcane.php)> Access: Jun 10, 2018.

VIATOR, R. P.; KOVAR, J. L.; HALLMARK, W. B. Gypsum and compost effects on sugarcane root growth, yield, and plant nutrients. **Agronomy Journal**, v. 94, n. 6, p. 1332-1336, 2001.

<https://doi.org/10.2134/agronj2002.1332>

VITTI, G. C.; OTTO, R.; SAVIETTO, J. Manejo do Enxofre na agricultura. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 152, p. 1-14, 2015.

WAINWRIGHT, M. Sulfur oxidation in soils. **Adv. Agron.**, v. 37, p. 349-396, 1984.

[https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60458-7](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60458-7)

WATKINSON, J. H.; LEE A. Kinetics of field oxidation of elemental sulfur in New Zealand pastoral soils and the effects of soil temperature and moisture. **Fertilizer Research**, v. 37, p. 59-68, 1994.

<https://doi.org/10.1007/BF00750674>

WIEDENFELD, B. Sulfur application effects on soil properties in a calcareous soil and on sugarcane growth and yield. **Journal of Plant Nutrition**, v. 34, p. 1003–1013, 2011.

<https://doi.org/10.1080/01904167.2011.555582>

YADAV, R. L.; SHUKLA, S. K.; SUMAN, A.; SINGH, P. N. Trichoderma inoculation and trash management effects on soil microbial biomass, soil respiration, nutrient uptake and yield of ratoon sugarcane under subtropical conditions. **Biology and Fertility of Soils**, v. 45, p. 461–468, 2009.

<https://doi.org/10.1007/s00374-009-0352-4>

YANG, Z.; HANEKLAUS, S.; SINGH, B. R.; SCHNUG, E. Effect of repeated applications of elemental sulfur on microbial population, sulfate concentration, and pH in soils. **Comm. Soil Sci. Plant Anal.**, v. 39, p. 124-140, 2008.

<https://doi.org/10.1080/00103620701759079>

ZHAO, F. J.; LOKE, S. Y.; CROSLAND, A. R.; MCGRATH, S. P. Method to determine elemental sulphur in soils applied to measure sulphur oxidation. **Soil Biol. Biochem**, v. 28, n. 8, p. 1083-1087, 1996.

[https://doi.org/10.1016/0038-0717\(96\)00073-9](https://doi.org/10.1016/0038-0717(96)00073-9)