

NÍVEIS CRÍTICOS DE ENXOFRE EM SOLOS DE PERNAMBUCO

Michelangelo Bezerra Fernandes

Mestre em Ciência do Solo, Eng.º. Agr.º. Departamento de Agronomia, CEP 52171-900, Recife-PE.
E-mail: michelesam@hotmail.com Fone: (84) 3312-1558.

Fernando José Freire

Prof. Adjunto, UFRPE, Departamento de Agronomia, CEP 52171-900, Recife-PE, e-mail: ffreire@depa.ufrpe.br

Alexandre Campelo de Oliveira

Aluno de graduação, UFRPE, Departamento de Agronomia, CEP 59.625-470, Recife-PE,
E-mail: alexcampelo@hotmail.com

RESUMO - A queima da cana-de-açúcar por ocasião da colheita causa uma expressiva volatilização do enxofre contido no material vegetal, agravando possíveis deficiências deste nutriente a curto e médio prazo. O objetivo desta pesquisa foi avaliar e determinar os níveis críticos de enxofre em solos utilizando o gesso mineral como fonte de enxofre. Foram instalados quatro ensaios de campo em solos de diferentes classes texturais. Em todos os ensaios o delineamento experimental empregado foi blocos ao acaso. Os tratamentos em cada ensaio constituíram-se da combinação de cinco doses de enxofre e três extratores químicos, com três repetições. Avaliaram-se os tratamentos aos trinta dias após a aplicação das doses de enxofre na profundidades 0-0,2m de amostragem. As doses de enxofre foram definidas pela necessidade de calagem, para a camada 0,4-0,6 m de profundidade. Com os resultados de enxofre recuperado e produção da cana-de-açúcar, foram determinados os níveis críticos de enxofre no solo. O extrator acetato de amônio em ácido acético extraiu mais enxofre em solos argilosos, de baixos valores de P-rem e com maiores teores de matéria orgânica, enquanto o extrator cloreto de cálcio apresentou menor poder de extração de enxofre, nas mesmas condições. Já o fosfato de cálcio, contendo fósforo e na presença de ácido acético, extraiu enxofre eficientemente, independente de características físicas e químicas dos solos. Os níveis críticos de enxofre no solo foram crescentes em solos argilosos, de baixos valores de P-rem e com maiores teores de matéria orgânica.

Palavras chave: Sulfato, argila e extratores químicos

CRITICAL LEVELS OF SULFUR IN PERNAMBUCO SOILS

ABSTRACT - The burning of the sugar cane for occasion of the harvest causes an expressive volatilization of the sulfur contained in the vegetable material, worsening possible deficiencies of this nutritious the short and average term. The goal of this research was to evaluate and to determine the critical levels of sulfur in soils using the mineral gypsum as sulfur source. They were installed four field rehearsals in different class texturais soils. In all rehearsals the experimental delineation employee was blocks at random. The treatments in each rehearsal they constituted of the combination of five doses of mineral gypsum and three chemical extractors, with three repetitions. They evaluated the treatments at thirty days after the application of the sulfur doses in the depths 0-0,2m of sampling. The sulfur doses were defined from need to calagem, for the layer 0,4-0,6 m of depth. With the results of recovered sulfur and production of the sugar cane, they were certain the critical levels of sulfur in the soil. The ammonium acetate extractor in acetic acid extracted more sulfur in loamy soils, of low values of P-rem and with larger contents of organic matter, while the calcium chloride extractor introduced sulfur extraction smaller power, at the same terms. Already the calcium phosphate, contend match and in the presence of acetic acid, extracted efficiently, independent sulfur of physical and chemical characteristics of the soils. The critical levels of sulfur in the soil were increasing in loamy soils, of low values of P-rem and with larger contents of organic matter.

Key Words: Sulfate, clay and chemical extractors

INTRODUÇÃO

O enxofre (S) desempenha importante função no metabolismo e, por conseguinte, no ciclo vital das plantas. Moléculas contendo S participam da estrutura de aminoácidos essenciais, da clorofila, enzimas e coenzimas, além de participar de diversos processos metabólicos como ativação enzimática (MASCHNER, 1995; COLEMAN, 1996).

Solos intensamente cultivados onde se utiliza

formulações desprovidas de enxofre (S), podem apresentar baixa disponibilidade desse nutriente. Isso pode resultar em sintomas de deficiência nas culturas, acarretando redução de produtividade (NOGUEIRA & MELO, 2003).

O ânion sulfato (SO_4^{2-}) é a principal forma mineral do S nos solos sob condições aeróbicas e, preferencialmente, absorvida pelas plantas. Sua dinâmica no solo depende, entre outros fatores, do equilíbrio entre o SO_4^{2-} da solução e o adsor-

vido aos minerais da fração argila (DYNIA & CAMARGO, 1995).

A definição de melhores extratores químicos, de nível crítico no solo e de quanto deste elemento aplicar para corrigir solos deficientes são preocupações básicas de técnicos e pesquisadores envolvidos no problema (FONTES et al., 1982).

Teor ou nível crítico de um nutriente corresponde à concentração mínima necessária para atingir o crescimento máximo ou para um percentual deste máximo, correspondendo na realidade a uma estreita zona de transição do que a um ponto definido (FRITZ, 1976) e, é variável entre solos e planta e entre plantas e solo e, também, em função dos teores aplicados de outros nutrientes, calagem e demais tratamentos culturais (FAQUIN et al., 1995; FONSECA, et al., 1997).

A literatura mundial apresenta um aumento nos estudos com enxofre, porém de forma modesta. Trabalhos realizados na última década, especialmente na Índia, indicam aumento da demanda por fertilizante contendo enxofre e, conseqüentemente, nos custos e produção, estimulando o desenvolvimento de técnicas mais eficientes para avaliar a eficiência do uso de fertilizantes contendo enxofre (REDDY, 2001).

Considerando que os níveis críticos de S no solo são influenciados por características físicas e, ou, químicas dos solos, realizou-se este trabalho com os objetivos de determinar os níveis críticos de enxofre no solo e correlacionar como as características físicas e químicas.

MATERIAL E MÉTODOS

Foram instalados 4 ensaios de campo em solos de diferentes classes texturais (Quadro 1) para

Quadro 1. Localização dos ensaios de campo, teor de argila, intervalo e classe textural dos solos na profundidade 0-0,2m.

Solos	Teor de argila (g kg ⁻¹)	Intervalo	Classe de Solo
S1 ST	87,5	< 15%	Classe I
S2 CC	218,6	≥ 15% e < 35%	Classe II
S3 PE	365,2	≥ 35% e < 45%	Classe III
S4 TR	490,0	≥ 45% e < 60%	Classe IV

avaliar os efeitos do gesso mineral como fonte de enxofre (S) no solo e na nutrição de plantas de cana-de-açúcar. Os ensaios foram conduzidos na Zona da Mata de Pernambuco nas Usinas Santa Tereza (S1 ST), Cucau (S2 CC), Petribu (S3 PE) e Trapiche (S4 TR).

Nos ensaios, o delineamento experimental empregado foi o de blocos ao acaso. Os tratamentos em cada ensaio constituíram-se da combina-

ção de 5 doses de S e 3 extratores químicos, com 3 repetições [(5 x 3) x 3]. Avaliaram-se os tratamentos 30 dias após a aplicação das doses de S na profundidade de amostragem 0,0-0,2 m. As parcelas foram constituídas de 6 linhas espaçadas um metro entre si e dez metros de comprimento.

As doses de S foram conseqüência da definição das doses de gesso mineral, cuja atribuição foi à necessidade de calagem (NC), calculada pelo método da neutralização do alumínio trocável ou elevação dos teores trocáveis de cálcio (adaptado de Recomendações de Adubação para o Estado de Pernambuco, 1998) na camada 0,4-0,6 m de profundidade (Quadro 2). Nos solos S1 ST e S4 TR utilizou-se os seguintes níveis da NC: 0; 0,50; 0,75; 1,00 e 1,50 e para os solos S2 CC e S3 PE os níveis de 0; 0,25; 0,50; 0,75 e 1,00.

Considerando as doses de gesso mineral (que contém 18,60% de S) que foram definidas pela NC para a camada 0,4-0,6m, as doses de S aplicadas corresponderam em magnitude daquelas doses para a NC (Quadro 3).

Em todos os ensaios, os solos foram corrigidos com calcário dolomítico (PRNT 80%), conforme a NC da camada 0,0-0,3 m de profundidade, utilizando-se o método da neutralização do alumínio trocável ou elevação dos teores trocáveis de cálcio e magnésio (Recomendações de Adubação para o Estado de Pernambuco, 1998) (Quadro 4). No solo S2 CC, a NC para a recomendação de calcário teve como referência a profundidade de 0,0-0,2 m (Quadro 4). A variedade de cana-de-açúcar utilizada em todos os ensaios foi a SP 79-1011.

O calcário e o gesso mineral foram aplicados

a lançar em área total com os sulcos abertos e posterior incorporação dos corretivos. Aos 30 dias após a aplicação do calcário, realizou-se o plantio e aplicação das doses de gesso. Todas as parcelas receberam adubação de fundação e cobertura (Quadro 5). A cobertura foi realizada 60 dias após o plantio.

Os fertilizantes foram aplicados conforme Recomendações de Adubação para o Estado de

Quadro 2. Caracterização química e física dos solos S1 ST, S2 CC, S3 PE e S4 TR na profundidades 0,4-0,6m de amostragem

	S1 ST	S2 CC	S3 PE	S4 TR
pH (H ₂ O 1:25) ¹	5,50	4,30	4,45	4,50
Ca ²⁺ (cmol _c dm ⁻³) ¹	0,45	0,20	0,95	0,10
Mg ²⁺ (cmol _c dm ⁻³) ¹	1,13	0,70	0,25	0,05
K ⁺ (cmol _c dm ⁻³) ¹	0,06	0,10	0,02	0,08
Al ³⁺ (cmol _c dm ⁻³) ¹	0,30	1,48	0,75	1,10
P-rem (mg dm ⁻³) ²	22,11	-	17,72	6,02
SB (cmol _c dm ⁻³)	2,14	1,00	1,22	0,23
CTC (cmol _c dm ⁻³)	2,24	2,47	1,97	4,73
Areia (g Kg ⁻³) ¹	847,5	399,0	537,0	310,0
Silte (g Kg ⁻³) ¹	82,5	309,0	33,7	20,0
Argila (g Kg ⁻³) ¹	70,0	292,0	429,3	670,0

Quadro 3. Doses de enxofre aplicadas nos solos S1 ST, S2 CC, S3 PE e S4 TR

Solos	Doses de Enxofre				
	kg ha ⁻¹				
S1 ST	0	216	324	432	648
S2 CC	0	167	334	502	669
S3 PE	0	122	244	366	488
S4 TR	0	441	662	883	1.325

Quadro 4. Quantidade de calcário (QC) aplicado nos solos S1 ST, S2 CC, S3 PE, S4 TR E S5 SA

Solos	Quantidade de Calcário (QC)
	t ha ⁻¹
S1 ST	0,37
S2 CC	0,70
S3 PE	1,41
S4 TR	4,50

Quadro 5. Nitrogênio, fósforo e potássio aplicados nas adubações de fundação e cobertura em cana-de-açúcar nos solos de diferentes classes texturais

Solos	Fundação			Cobertura		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
	kg ha ⁻¹					
S1 ST	20	40	35	20	-	35
S2 CC	20	40	35	20	-	35
S3 PE	20	180	35	20	-	35
S4 TR	20	180	35	20	-	35

Pernambuco (1998). para a camada 0-0,2m.

Aos 30 dias após a aplicação das doses de enxofre foi realizada amostragem do solo na profundidade de 0,0-0,2 m. O solo coletado foi seco ao ar, destorroado e passado em peneira de 2 mm de malha. Posteriormente, procedeu-se à extração do S por três extratores: CaCl₂ 10 mmol L⁻¹; NH₄OAc 0,5 mol L⁻¹ em HOAc 0,25 mol L⁻¹ e Ca (H₂PO₄)₂ contendo 500 mg L⁻¹ de P em HOAc 2 mol L⁻¹, segundo ALVAREZ V. et al. (2001).

Após as extrações, o S foi dosado por turbidimetria, segundo ALVAREZ V. et al., (2001).

Os dados das variáveis estudadas foram submetidos à análise da variância pelo teste F (p<5%). Com os resultados de produção e teores de S no solo foram testados modelos de regressão, obtendo-se modelos ajustados, adotando-se como critério para a escolha do modelo, a esperança biológica do ajuste e o maior coeficiente de determinação.

A partir de modelos, foram estimadas doses de máxima eficiência econômica (MEE) para obtenção de 90% da produção máxima. Com base nas doses de máxima eficiência econômica (90%) foram definidos os níveis críticos de enxofre nos solos.

Foram estabelecidas correlações dos níveis críticos em solo com características químicas e físicas dos solos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

S disponível pelos extratores CaCl_2 10 mmol L^{-1} ; NH_4OAc 0,5 mol L^{-1} em HOAc 0,25 mol L^{-1} e $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ contendo 500 mg L^{-1} de P em HOAc 2 mol L^{-1} nos solos.

No solo S1 ST, de uma maneira geral, pôde-se observar que a recuperação do S pelos extratores, ocorreu na seguinte seqüência: $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 500 mg L^{-1} de P em HOAc 2 mol L^{-1} > NH_4OAc 0,5 mol L^{-1} em HOAc 0,25 mol L^{-1} > CaCl_2 10 mmol L^{-1} (Quadros 6). Segundo Hoeft et al.

que está adsorvido e significativas frações de S orgânico (FONTES et al., 1982).

No solo S2 CC, o extrator cloreto de cálcio, imediatamente, aos 30 dias após a aplicação das doses de S, foi eficiente para recuperar S, como os demais extratores (Quadro 7).

No solo S3 PE, o cloreto de cálcio manteve esse desempenho em recuperar S como os demais extratores (Quadro 8). A recuperação de S pelo cloreto de cálcio de acordo com Dias et al., 1994, pode ser explicada pela rápida solubilização do gesso, já que esse extrator determina, preferencialmente, formas de S-SO_4^{-2} presentes na solução do solo e porções de S-SO_4^{-2} adsorvidas, mas passíveis de retornar à solução do solo e correspondem à fração prontamente solúvel (REISEINAUER et al., 1975).

No entanto, no solo S3 PE e S4 TR, o acetato de amônio foi quem mais recuperou o S (Quadros 8 e 9). De acordo com Dias et al., (1994), estudando a extração de S por três extratores em três

Quadro 6. Enxofre recuperado em função do aplicado pelos extratores CaCl_2 10 mmol L^{-1} ; NH_4OAc 0,5 mol L^{-1} em HOAc 0,25 mol L^{-1} e $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ contendo 500 mg L^{-1} de P em HOAc 2 mol L^{-1} no solos S1 ST e na profundidade 0-0,2m aos 30 dias após a aplicação dos tratamentos.

Dose kg ha^{-1}	S1 ST		
	CaCl_2	NH_4OAc	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$
	mg dm^{-3}		
0	5,72	17,67	8,80
216	16,43	31,41	31,67
324	18,74	22,01	29,34
432	16,27	58,29	205,62
648	19,33	16,12	40,36
Média	15,31	29,10	63,16

Quadro 7. Enxofre recuperado em função do aplicado pelos extratores CaCl_2 10 mmol L^{-1} ; NH_4OAc 0,5 mol L^{-1} em HOAc 0,25 mol L^{-1} e $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ contendo 500 mg L^{-1} de P em HOAc 2 mol L^{-1} no solos S2 CC e na profundidade 0-0,2m aos 30 dias após a aplicação dos tratamentos.

Dose kg ha^{-1}	S2 CC		
	CaCl_2	NH_4OAc	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$
	mg dm^{-3}		
0	9,51	12,82	8,05
167	14,27	91,70	74,53
334	24,7	34,27	55,86
502	21,4	115,56	119,16
669	19,18	50,79	74,00
Média	17,81	61,03	66,32

(1973) a maior extração de S pelo fosfato de cálcio é devido ao fato de o fosfato adicionado ao solo deslocar o sulfato adsorvido. O fosfato de cálcio extrai, além do sulfato solúvel, parte do

Latossolos, sendo, dois argilosos e um arenoso, observaram que, a extração de S nos dois Latossolos argilosos com acetato de amônio foi superi-

or a recuperação com cloreto de cálcio e fosfato de cálcio.

Para Tabatabai (1982) o fato da menor extração de S pelo cloreto de cálcio se deve, basicamente, pela extração do $S-SO_4^{2-}$ solúvel, enquanto que os outros dois extratores (acetato e o fosfato) retirariam, também, frações de $S-SO_4^{2-}$ adsorvidas e orgânicas.

Quadro 8. Enxofre recuperado em função do aplicado pelos extratores $CaCl_2$ 10 mmol L^{-1} ; NH_4OAc 0,5 mol L^{-1} em HOAc 0,25 mol L^{-1} e $Ca(H_2PO_4)_2$ contendo 500 mg L^{-1} de P em HOAc 2 mol L^{-1} no solos S3 PE e na profundidade 0-0,2m aos 30 dias após a aplicação dos tratamentos.

Dose kg ha ⁻¹	S3 PE		
	CaCl ₂	NH ₄ OAc mg dm ⁻³	Ca(H ₂ PO ₄)
0	6,87	6,06	6,78
122	8,75	7,81	10,90
244	8,02	16,09	16,09
366	5,53	30,71	37,66
488	20,46	29,90	11,81
Média	9,93	18,11	16,65

Quadro 9. Enxofre recuperado em função do aplicado pelos extratores $CaCl_2$ 10 mmol L^{-1} ; NH_4OAc 0,5 mol L^{-1} em HOAc 0,25 mol L^{-1} e $Ca(H_2PO_4)_2$ contendo 500 mg L^{-1} de P em HOAc 2 mol L^{-1} no solos S4 TR e na profundidade 0-0,2m aos 30 dias após a aplicação dos tratamentos.

Dose kg ha ⁻¹	S4 TR		
	CaCl ₂	NH ₄ OAc mg dm ⁻³	Ca(H ₂ PO ₄)
0	19,91	15,10	28,99
441	28,85	55,22	53,23
662	43,13	62,65	50,58
883	57,48	50,76	60,10
1325	71,06	91,34	74,98
Média	44,08	55,01	53,58

Os teores de S recuperado em todos os solos dos solos (Quadros 6, 7, 8 e 9) foram superiores aos encontrados por Fontes et al., (1982) que estudando a recuperação em doze Latossolos por três extratores químicos observaram que na testemunha a recuperação de S variou de 1,3 a 12,7 mg dm^{-3} e de forma crescente nas outras doses, com uma variação de 40,9 a 82,5 mg dm^{-3} na maior dose.

Em condições controladas, Dias et al., (1994) observaram que o gesso aplicado ao solo foi rapidamente solubilizado e a extração de S foi proporcional à lâmina de água aplicada.

A recuperação de S em todos os solos (Quadros 6, 7, 8, 9), pode está intensificando em profundidade, sugerindo uma migração do elemento da superfície para camadas mais profundas do perfil. Segundo Rheinheimer et al., (2005) a

disponibilidade de S da camada superficial do solo às plantas é diminuída pela aplicação de calcário e de fertilizantes fosfatados em superfície. Possivelmente, aliada a essas práticas agrícolas, a diferença nos teores e na qualidade das argilas (Quadro 2), proporcionam a migração do S da superfície e seu acúmulo em subsuperfície.

Foram ajustadas equações de regressão do S

recuperado em função do aplicado nos solos para cada extrator (Quadro 10).

Diferentemente do solo S1 ST e no solo S2 CC, no solo S3 PE e S4 TR obteve-se um maior número de regressões significativas em que a taxa de recuperação dos extratores variaram de 0,01030 até 0,05782 mg $dm^{-3}/kg ha^{-1}$, respectivamente para os extratores de cloreto de cálcio e acetato de amônio (Quadros 10).

O relacionamento entre a produção de cana-de-açúcar (Mg ha^{-1}) e as doses de S aplicadas nos solos segue a lei dos acréscimos não proporcionais da fertilidade dos solos (Lei de Mitscherlich) (Figura 1).

Corrêa et al., (1999) encontraram resultados semelhantes, mostrando que, o uso do gesso agrícola na cultura da cana, resultaram em aumentos significativos de produtividade.

Trabalho realizado por Morelli et al., (1992), mostra que a aplicação de gesso agrícola em solo cultivado com cana-de-açúcar, resultou em aumentos de produção, com incrementos da ordem de 18 Mg ha⁻¹ em cana planta.

No entanto, Azevedo (2002) trabalhando com a mesma variedade, em cana planta, encontrou produtividade média de 89,42 Mg ha⁻¹.

Espera-se que esses aumentos de produtividade encontrados em cana planta nos solos de teo-

Quadro 10. Equações de regressão ajustadas para os teores de enxofre no solo (mg dm⁻³) recuperados pelos extratores CaCl₂ 10 mmol L⁻¹; NH₄OAc 0,5 mol L⁻¹ em HOAc 0,25 mol L⁻¹ e Ca(H₂PO₄)₂ contendo 500 mg L⁻¹ de P em HOAc 2 mol L⁻¹ na profundidade 0-0,2m em função das doses aplicadas (kg ha⁻¹) nos solos S1 ST, S2 CC, S3 PE e S4 TR aos 30 dias após a aplicação das doses de S.

Extratores químicos	S1 ST
CaCl ₂	$\hat{Y} = 9,1872 + 0,01889 * X$, R ² = 0,68
NH ₄ OAc	$\hat{Y} = \bar{Y} = 29,10$
Ca(H ₂ PO ₄) ₂	$\hat{Y} = \bar{Y} = 63,16$
S2 CC	
CaCl ₂	$\hat{Y} = \bar{Y} = 17,81$
NH ₄ OAc	$\hat{Y} = \bar{Y} = 61,03$
Ca(H ₂ PO ₄) ₂	$\hat{Y} = \bar{Y} = 66,32$
S3 TR	
CaCl ₂	$\hat{Y} = \bar{Y} = 9,93$
NH ₄ OAc	$\hat{Y} = 4,0049 + 0,05782 ** X$, R ² = 0,96
Ca(H ₂ PO ₄) ₂	$\hat{Y} = \bar{Y} = 16,65$
S4 TR	
CaCl ₂	$\hat{Y} = 4,1965 + 0,01030 ** X$, R ² = 0,96
NH ₄ OAc	$\hat{Y} = 21,3777 + 0,05076 * X$, R ² = 0,84
Ca(H ₂ PO ₄) ₂	$\hat{Y} = 31,8550 + 0,03278 ** X$, R ² = 0,94

**, * significativos a 1, 5% de probabilidade, respectivamente.

Quadro 11. Equações de regressão ajustadas para produtividade (t ha⁻¹) como variável dependente das doses de enxofre aplicadas (kg ha⁻¹) e doses de Máxima Eficiência Econômica (kg ha⁻¹) nos solos S1 ST, S2 CC, S3 PE e S4 TR.

Solo	Equação de regressão	R ²	Dose MEE ¹
S1 ST	$\hat{Y} = 78,811 + 0,06527^0 X - 0,0001018^0 X^2$	0,70	24,34
S2 CC	$\hat{Y} = 135,9820 + 0,04239^{ns} X - 0,0008939^0 X^2$	0,86	236,81
S3 PE	$\hat{Y} = 99,5505 + 0,1463^0 X - 0,0003056^0 X^2$	0,70	39,14
S4 TR	$\hat{Y} = 82,5104 + 0,4090 * \sqrt{X} - 0,01031^0 X$	0,82	243,70

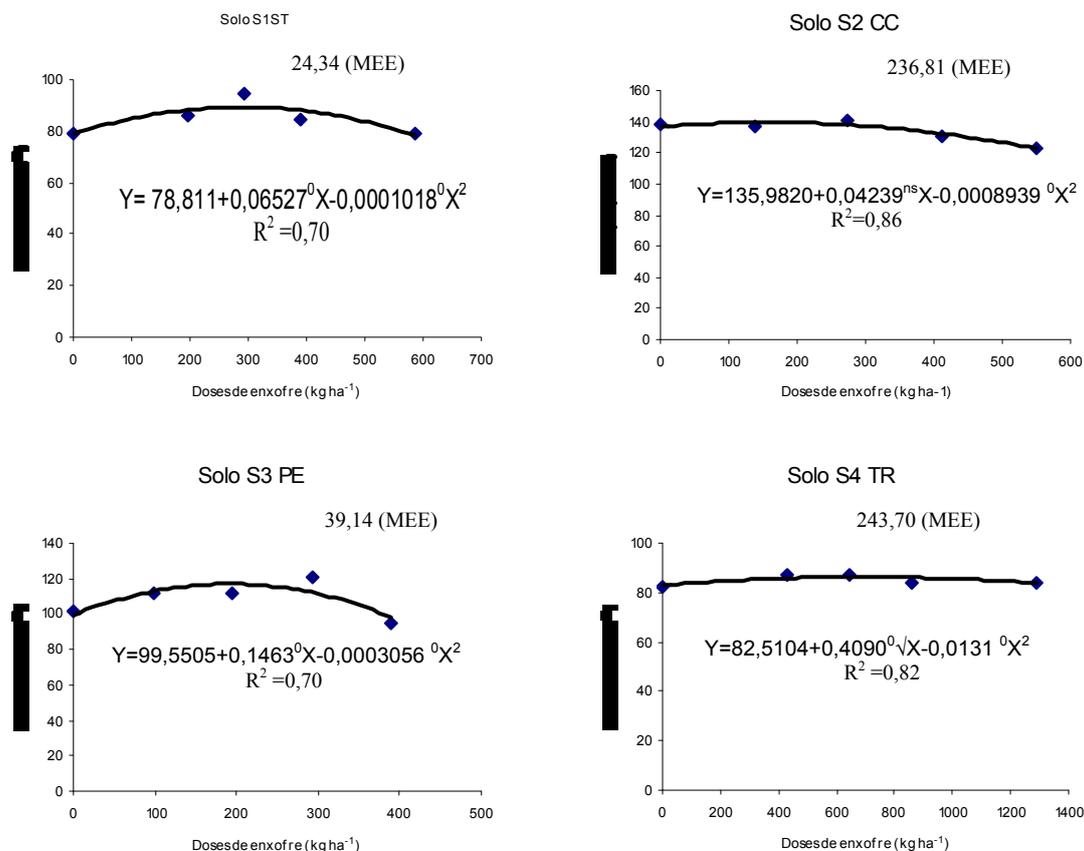


Figura 1- Equações de regressão ajustadas para produtividade (Mg ha⁻¹) como variável dependente das doses de enxofre aplicadas (kg ha⁻¹) nos solos para obtenção de 90-100% da produção máxima em cana-de-açúcar e doses de máxima eficiência econômica (MEE) (kg ha⁻¹).

res de argila diferentes, reflitam-se nas socas, pois como a cana-de-açúcar é uma cultura semi-perene, as práticas de correção do solo foram realizadas visando, também, à longevidade do canavial.

Para o presente estudo e considerando a metodologia empregada para determinação da produtividade agrícola da cana-de-açúcar (Mg ha⁻¹) foi realizada análise de regressão havendo efeito significativo entre a variável dependente (produção de cana-de-açúcar) e a variável independente (doses de S), tendo a grande maioria dos dados, se ajustado a modelos quadráticos (solos S1 ST, S2 CC e S3 PE), no solo S4 TR ajustou-se um modelo raiz quadrada e no solo S4 SA (Quadro 11).

A partir dessas equações, estimaram-se as produções correspondentes a 90% da produção máxima que corresponde à dose de máxima eficiência econômica (MEE), conforme Fonseca (1987) e Rossi (1995).

Para os solos S2 CC e S4 TR considerou-se a dose de 100% da produção máxima para a dose de máxima eficiência econômica (MEE). Isso porque as doses correspondentes a 90% da produção máxima foram superiores as doses de 100% pelo fato do pequeno incremento na produtividade entre as doses correspondentes a 90 e 100%, fazendo com que matematicamente se invertessem, além do fato das doses iniciais terem sido elevadas (Quadro 3).

As doses de S estimadas para a máxima produção econômica (MEE) são variáveis, devido principalmente aos teores de argila do solo de cada solo e variaram de 24,34 a 243,7 kg ha⁻¹ (Quadro 11). Freire (2001) na determinação da demanda S para os cultivos de cana planta, soca e ressocas (kg ha⁻¹) em função da produtividade esperada (Mg ha⁻¹) e do valor do P-remanescente (mg L⁻¹) encontrou valores para cana planta da ordem de 72,13 , 112,58 , 91,68 e 66,90 kg ha⁻¹

de S, respectivamente semelhantes aos utilizados nessa pesquisa.

Níveis críticos de enxofre no solo

A partir das doses de S aplicadas para a obtenção de 90-100% da produção máxima e das equações ajustadas entre os teores de S recuperados pelos extratores em função das doses de S aplicadas, estimaram-se os níveis críticos de S nos solos.

Os valores dos níveis críticos encontrados nessa pesquisa variaram entre os solos. No solo S1 ST variaram de 9,64 a 63,16 mg dm⁻³, no solo S2 CC variaram de 17,81 a 66,62 mg dm⁻³, no solo S3 PE variaram de 9,63 a 16,65 mg dm⁻³, no solo S4 TR variaram de 6,70 a 39,84 mg dm⁻³ e no solo de maneira geral variaram de 6,70 a 66,62 mg dm⁻³ (Quadros 12, 13, 14 e 15) e são superiores aos encontrados por Fontes et al., (1982) que detectaram como limites considerados críticos valores da ordem de 6 a 14 mg kg⁻¹.

Quadro 12. Níveis críticos de enxofre no solo pelos extratores CaCl₂ 10 mmol L⁻¹, NH₄OAc 0,5 mol L⁻¹ em HOAc 0,25 mol L⁻¹ e Ca(H₂PO₄)₂ contendo 500 mg L⁻¹ de P em HOAc 2 mol L⁻¹ aos 30 e 150 dias após a aplicação das doses de enxofre e nas profundidades 0,0-0,2 no solo S1 ST.

Dose (kg ha ⁻¹)	Níveis críticos mg dm ⁻³
CaCl ₂	9,64
NH ₄ OAc	29,10
Ca(H ₂ PO ₄) ₂	63,16
Média	33,96

Os maiores valores de níveis críticos ocorreram no solo S2 CC (Quadro 13) e os menores no solo S3 PE (Quadro 14). A elevada capacidade de extração do fosfato de cálcio e do acetato de amônio (Quadros 7 e 9), aliada a altas doses de S utilizadas nos ensaios contribuíram para determinação de elevadas doses de máxima eficiência

Quadro 13. Níveis críticos de enxofre no solo pelos extratores CaCl₂ 10 mmol L⁻¹, NH₄OAc 0,5 mol L⁻¹ em HOAc 0,25 mol L⁻¹ e Ca(H₂PO₄)₂ contendo 500 mg L⁻¹ de P em HOAc 2 mol L⁻¹ aos 30 e 150 dias após a aplicação das doses de enxofre e nas profundidades 0,0-0,2 no solo S2 CC

Dose (kg ha ⁻¹)	Níveis críticos mg dm ⁻³
CaCl ₂	17,81
NH ₄ OAc	61,03
Ca(H ₂ PO ₄) ₂	66,32
Média	48,38

econômica (Quadro 11), refletindo-se na metodologia de obtenção do nível crítico, principalmente em solos muito argilosos como os encontrados no solo S4 TR (Quadro 15). No solo S3 PE, os extratores foram pouco eficientes para extrair sulfato, provavelmente pelo deslocamento desse anion para profundidades maiores do que as investigadas nessa pesquisa. Contribuindo para essa premissa deve-se considerar ainda a baixa capacidade do solo de reter sulfato desse solo (Quadro 2).

Nascimento & Morelli (1980) encontraram 6,0 mg dm⁻³ como valor de nível crítico de S para dezesseis solos do Rio Grande do Sul utilizando fosfato de cálcio como extrator nas culturas de sorgo e alfafa e estabeleceram esse valor como o nível crítico abaixo do qual é provável uma resposta à aplicação de S.

A CQFS-RS/SC, (2004) estabeleceu um teor crítico de 10 mg dm⁻³ para plantas da família das leguminosas, brássicas e liliáceas, enquanto que para as demais espécies esse valor é de 5 mg dm⁻³, utilizando-se como extrator o fosfato de

cálcio.

Os maiores valores de níveis críticos ocorreram com os extratores fosfato de cálcio e acetato de amônio explicável pela maior capacidade de extrair sulfato do solo desses extratores, principalmente em relação ao cloreto de cálcio.

Para encontrar possíveis relações entre os

Quadro 14. Níveis críticos de enxofre no solo pelos extratores CaCl_2 10 mmol L^{-1} , NH_4OAc 0,5 mol L^{-1} em HOAc 0,25 mol L^{-1} e $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ contendo 500 mg L^{-1} de P em HOAc 2 mol L^{-1} aos 30 e 150 dias após a aplicação das doses de enxofre e nas profundidades 0,0-0,2 no solo S3 PE.

Dose (kg ha^{-1})	Níveis críticos mg dm^{-3}
CaCl_2	9,93
NH_4OAc	6,52
$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$	16,65
Média	11,03

valores de níveis críticos e características físicas e químicas dos solos, estabeleceram-se correlações (Quadro 16).

Analogicamente ele atua como a resina de troca aniônica na determinação do fósforo disponível.

Quadro 15. Níveis críticos de enxofre no solo pelos extratores CaCl_2 10 mmol L^{-1} , NH_4OAc 0,5 mol L^{-1} em HOAc 0,25 mol L^{-1} e $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ contendo 500 mg L^{-1} de P em HOAc 2 mol L^{-1} aos 30 e 150 dias após a aplicação das doses de enxofre e nas profundidades 0,0-0,2 no solo S4 TR.

Dose (kg ha^{-1})	Níveis críticos mg dm^{-3}
CaCl_2	6,70
NH_4OAc	33,75
$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$	39,84
Média	26,76

Constatou-se correlação positiva do acetato de amônio com carbono aos 30 dias após a aplicação das doses de S e em superfície ($r = 0,7240^0$) (Quadro 16), ou seja, quando maior o teor de carbono do solo, maior é o nível crítico de S.

CONCLUSÕES

O acetato de amônio em ácido acético extraiu mais enxofre em solos argilosos, de baixos valores de P-rem e com maiores teores de matéria orgânica, o cloreto de cálcio apresentou menor poder de extração de enxofre, principalmente em

Quadro 16. Coeficiente de correlação linear simples entre os valores de níveis críticos de enxofre em solos cultivados com cana-de-açúcar aos 30 dias após a aplicação das doses de enxofre com características físicas e químicas dos solos.

Característica	Nível crítico		
	CaCl_2	NH_4OAc	$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$
	0,0-0,2 m		
Argila (g kg^{-1})	0,4431 ^{ns}	0,4438 ^{ns}	0,4282 ^{ns}
Carbono (dag kg^{-1})	0,6088 ^{ns}	0,7240 ⁰	0,5359 ^{ns}
CTC (cmolc dm^{-3})	-0,5642 ^{ns}	-0,2446 ^{ns}	-0,4945 ^{ns}
P-rem (mg dm^{-3})	-0,2273 ^{ns}	-0,0983 ^{ns}	0,0214 ^{ns}
CMAS (mg cm^{-3})	-0,4884 ^{ns}	-0,1654 ^{ns}	-0,2737 ^{ns}

Na determinação do nível crítico com o extrator fosfato de cálcio e cloreto de cálcio não se encontrou nenhuma relação com características físicas e químicas dos solos na profundidade estudada (Quadro 16), ou seja, o fosfato de cálcio extrai S, independente do poder tampão do solo.

solos argilosos, de baixos valores de P-rem e com maiores teores de matéria orgânica;

O fosfato de cálcio contendo fósforo e na presença de ácido acético extraiu enxofre com eficiência, independente de características físicas e químicas dos solos;

Os valores dos níveis críticos encontrados nessa pesquisa variaram entre os solos de maneira geral variaram de 6,70 a 66,62 mg dm⁻³.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F.; DIAS, L.E.; OLIVEIRA, J.A Determinação e uso do fósforo remanescente. **R. Bras. Ci. Solo**, 25:27-32, 2000.

ALVAREZ V., V.H.; DIAS, L. E.; RIBEIRO JUNIOR, E. S.; SOUZA, R. B de. **Métodos de análises de enxofre em solos e plantas.** Viçosa: UFV, 2001. 131p.

AZEVEDO, H. M. de. **Resposta da cana-de-açúcar a doses de irrigação e de adubação de cobertura nos tabuleiros costeiros da Paraíba.** 2002. 112 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2002.

COLEMAN, R. The importance of sulfur as a plant nutrient in the world crop production. **Soil Science**, v.101, p.230-239, 1996.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. **Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina.** Porto Alegre : Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004. 394p.

CORREA, J.B.D.; ANDRADE, L.A.B.; ROSA, J.H.; NETO, A.E.F. Efeitos da aplicação de gesso mineral em três variedades de cana-de-açúcar cultivadas em Podzólico Vermelho-Amarelo. **Stab: Açúcar e Álcool**, Piracicaba, v.17, p.38-42, 1999.

DIAS, L.E; ALVAREZ V, V.H; COSTA, L.M da; NOVAIS, R.F. Dinâmica de algumas formas d enxofre em colunas de solos tratados com diferentes doses de fósforo e gesso. **R. bras.Ci.Solo**, Campinas, 18:373-380,1994.

DYNIA, J. F.; CAMARGO, O. A. Absorção e movimento de sulfato em Latossolo de cerrado submetido a calagem e adubação fosfatada. **R. bras. Ci. Solo**. 19:249-253,1995.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solo.** 2ed. Rio de Janeiro, 1997, 214p.

FAQUIN, V.; HOFFMANN, C.R.; EVANGELISTA, A.R. & GUEDES, G.A.A. O potássio e o enxofre no crescimento da braquiária e do colonião em amostras de um Latossolo da região noroeste do Paraná. **R. Bras. Ci. Solo**, 19:87-94, 1995.

FONSECA, D.M.; GOMIDE, J.A.; ALVAREZ V.,V.H.; NOVAIS, R.F. Fatores que influenciam os níveis críticos de fósforo para o estabelecimento de gramíneas forrageiras: I. Casa de vegetação. **R. Bras. Ci. Solo**, 21: 27-34, 1997.

FONTES, M. P.F; NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V.H.; BORGES, A. C. Disponibilidade do enxofre em três extratores químicos em Latossolo de Minas Gerais. **R. bras. Ci. Solo**, v.6, p.125-130, 1982.

FREIRE, F.J. **Sistema para cálculo do balanço nutricional e recomendação de corretivos e fertilizantes para cana-de-açúcar.** 2001. 144p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de plantas) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG.2001.

FRITZ, G.F. Mineral nutrition. In: NOGLE, G. & FRITZ, G.F. **Introductory Plant Physiology.** Prentice-Hall. Inc: Englew Hood Cliffs, New Jersey, 1976. p.223-271.

HOEFT, R.G.; WALSH, L.M.; KEENEY, D.R. Evaluation of various extractants for available soil sulfur. **Soil Sci. Sco.Am.Proc.**, Madison, v.37, p.401-411, 1973.

MARSCHNER, H. **Function of mineral nutrients: Macronutrients.** In: MARSCHNER, H. (Ed.) **Mineral nutrition of plants.** San Diego: Academic Press, 1995. cap.8, p.255-265.

MORELLI, J.L.; DALBEN, A.E.; ALMEIDA, J.O.C.; DEMATTÊ, J.L.I. Calcário e gesso na produtividade da cana de açúcar e nas características químicas de um Latossolo de textura média Álico. **R. bras. Ci. Solo**, Campinas, v.16, p. 187 – 194, 1992.

NASCIMENTO do, J.A.L.; MORELLI, M. Enxofre em solos do Rio Grande do Sul. II Disponibilidade. **R. bras. Ci. Solo**. 4:135-138,1980.

NOGUEIRA, M. A.; MELO, W. J. Enxofre disponível para a soja e atividade de arilsulfatase em

solo tratado com gesso agrícola. **R. bras. Ci. Solo.** v.27, n.4, 2003.

RECOMENDAÇÕES DE ADUBAÇÃO PARA O ESTADO DE PERNAMBUCO. CAVALCANTI, F.J.A. coord. Recife, 2ª aproximação, 2. ed. rev., IPA, 1998. 198p.

REDDY, K.S; SING, M.; TRIPARTHI, A. K.; SWARUP, A.; DWVEDI, A. K. Changes in organic and inorganic sulfur fractions and S mineralisation in a Typical Haplustert after long-term cropping with different fertilizer and organic manure inputs. **Australian Journal of Soil Research**, v.39, p.737-748, 2001.

REISENAUER, H.M. Soil assays for the recognition of sulphur deficiency. In: McLachlan, K.D. (Ed.). **Sulphur in Australian Agriculture**. Sydney: University Press, 1975. p.182-187.

RHEINHEINER, D.S; ALVAREZ, J.W.R.; OSORIO FILHO, B.D.; 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. **Cienc. Rural.** v.35, n.3, 2005.

ROSSI, C. **Crescimento e nutrição do braquiário em Latossolo dos Campos das Vertentes (MG) sob influência da calagem e fonte de fósforo.** 1995.65f. Dissertação (Mestrado em Solos e nutrição de Plantas). Universidade Federal de Lavras, Lavras.

TABATABAI, M.A. Sulfur. In: PAGE, A.L.; MILLER, R.H. & KEENEY, D.R., eds. **Methods of soil analysis**. 2.ed. Madison, **American Society of Agronomy**, 1982. pt.2, p.501-538. (Agronomy, 9).