

## MANEJO DO ENXOFRE NA AGRICULTURA



Godofredo Cesar Vitti<sup>1</sup>

Rafael Otto<sup>2</sup>

Julia Savieto<sup>3</sup>

### 1. INTRODUÇÃO

**D**e acordo com a legislação brasileira, o enxofre (S) é classificado como macronutriente secundário, juntamente com o cálcio (Ca) e o magnésio (Mg), sendo expresso na forma de S elementar ou de  $\text{SO}_3$ . Para transformar S em  $\text{SO}_3$  deve-se multiplicá-lo por 2,5, ou seja, 1 S equivale a 2,5  $\text{SO}_3$ .

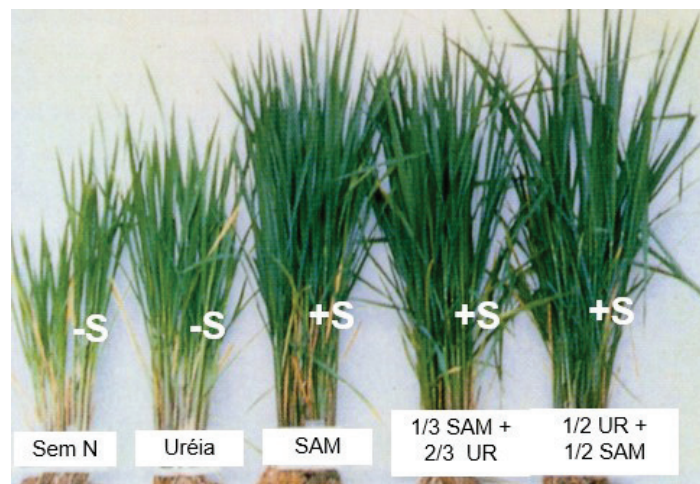
O S é denominado macronutriente secundário não por ser menos importante do que os macronutrientes primários (N,  $\text{P}_2\text{O}_5$  e  $\text{K}_2\text{O}$ ), mas sim por estar contido em fórmulas de baixa concentração, como nos fertilizantes nitrogenados (sulfato de amônio, 24% S) e fosfatados (superfosfato simples, 12% S). Entretanto, com o aumento da utilização de fórmulas mais concentradas em nitrogênio (N) (ureia e nitrato de amônio) e em  $\text{P}_2\text{O}_5$  (superfosfato triplo, MAP e DAP), o S passou a ser fator limitante da produtividade e qualidade das culturas de interesse econômico.

### 2. ENXOFRE NA PLANTA

O S desempenha funções essenciais no desenvolvimento e na qualidade das plantas, desde a participação na formação de aminoácidos e proteínas até controle hormonal, fotossíntese e mecanismos de defesa da planta contra patógenos.

#### 2.1. Metabolismo do nitrogênio

O S e o N “andam juntos” no metabolismo das plantas (Figura 1) por meio de duas rotas principais: a) formação de proteínas de qualidade e b) fixação biológica do  $\text{N}_2$  do ar e incorporação do N mineral em aminoácidos.



**Figura 1.** Interações de nitrogênio e enxofre em plantas de arroz. SAM = sulfato de amônio; UR = ureia.

Fonte: Lefroy et al. (1992).

#### 2.1.1. Formação de proteínas de qualidade

As proteínas são formadas por 20 aminoácidos, sendo que, evidentemente, todos apresentam N em sua composição. Já o S participa da composição de quatro aminoácidos: cistina, metionina, cisteína e taurina. Esta interação tem duas implicações fisiológicas: (1) a relação N/S para a maior parte das plantas varia de 10/1 a 15/1 e está associada ao crescimento e à produção, e (2) na ausência

**Abreviações:** Ca = cálcio;  $\text{CS}_2$  = bissulfeto de alila; DAP = fosfato diamônio;  $\text{K}_2\text{SO}_4$  = sulfato de potássio; Mg = magnésio; N = nitrogênio; MAP = fosfato monoamônio; P = fósforo; S = enxofre; SAM = sulfato de amônio; TSP = superfosfato triplo; UR = ureia.

<sup>1</sup> Professor Titular Sênior, Departamento de Ciência do Solo, ESALQ, Piracicaba, SP; e-mail: [gcvitti@usp.br](mailto:gcvitti@usp.br)

<sup>2</sup> Professor Doutor, Departamento de Ciência do Solo, ESALQ, Piracicaba, SP; e-mail: [rotto@usp.br](mailto:rotto@usp.br)

<sup>3</sup> Acadêmica de Engenharia Agrônoma, Membro do GAPE, Departamento de Ciência do Solo, ESALQ, Piracicaba, SP; e-mail: [savieto.julia@gmail.com](mailto:savieto.julia@gmail.com)

## INFORMAÇÕES AGRONÔMICAS

Publicação trimestral gratuita do International Plant Nutrition Institute (IPNI), Programa Brasil. O jornal publica artigos técnico-científicos elaborados pela comunidade científica nacional e internacional visando o manejo responsável dos nutrientes das plantas.

ISSN 2311-5904

### COMISSÃO EDITORIAL

#### Editor

Valter Casarin

#### Editores Assistentes

Luís Ignácio Prochnow, Eros Francisco, Silvia Regina Stipp

#### Gerente de Distribuição

Evandro Luis Lavorenti

### INTERNATIONAL PLANT NUTRITION INSTITUTE (IPNI)

#### Presidente do Conselho

Mostafa Terrab (OCP Group)

#### Vice-Presidente do Conselho

Oleg Petrov (Uralkali)

#### Tesoureiro

Tony Will (CF Industries Holdings, Inc.)

#### Presidente

Terry L. Roberts

#### Vice-Presidente, Coordenador do Grupo da Ásia e África

A.M. Johnston

#### Vice-Presidente, Coordenadora do Grupo do Oeste Europeu/Ásia Central e Oriente Médio

Svetlana Ivanova

#### Vice-Presidente Senior, Diretor de Pesquisa e Coordenador do Grupo das Américas e Oceania

Paul E. Fixen

### PROGRAMA BRASIL

#### Diretor

Luís Ignácio Prochnow

#### Diretores Adjuntos

Valter Casarin, Eros Francisco

#### Publicações

Silvia Regina Stipp

#### Analista de Sistemas e Coordenador Administrativo

Evandro Luis Lavorenti

#### Assistente Administrativa

Elisângela Toledo Lavorenti

#### Secretária

Kelly Furlan

### ASSINATURAS

Assinaturas gratuitas são concedidas mediante aprovação prévia da diretoria. O cadastramento pode ser realizado no site do IPNI:

<http://brasil.ipni.net>

Mudanças de endereço podem ser solicitadas por email para: [kfurlan@ipni.net](mailto:kfurlan@ipni.net) ou [etoledo@ipni.net](mailto:etoledo@ipni.net)

Nº 152 DEZEMBRO/2015

## CONTEÚDO

### Manejo do enxofre na agricultura

Godofredo Cesar Vitti, Rafael Otto, Julia Savieto ..... 1

### Evolução dos sistemas de cultivo de milho no Brasil

Aildson Pereira Duarte; Claudinei Kappes ..... 15

Divulgando a Pesquisa ..... 19

IPNI em Destaque ..... 20

Painel Agrônomico ..... 23

Cursos, Simpósios e outros Eventos ..... 24

Publicações Recentes ..... 25

Publicação Recente do IPNI ..... 26

Ponto de Vista ..... 28

### NOTA DOS EDITORES

Todos os artigos publicados no Informações Agronômicas estão disponíveis em formato pdf no website do IPNI Brasil: <<http://brasil.ipni.net>>

Opiniões e conclusões expressas pelos autores nos artigos não refletem necessariamente as mesmas do IPNI ou dos editores deste jornal.

### FOTO DESTAQUE

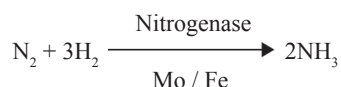


Dr. Luís Ignácio Prochnow (ao centro), Dr. Aildson Pereira Duarte (à esquerda) e Dr. Claudinei Kappes (à direita) durante visita a uma propriedade produtora de milho nos Estados Unidos.

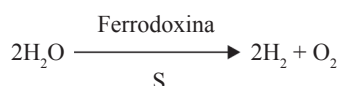
ou deficiência de S há formação de proteína de baixa qualidade, principalmente devido à falta dos aminoácidos essenciais cistina e metionina, ou seja, aqueles que são metabolizados somente pelas plantas superiores. O consumo de plantas deficientes em cistina e metionina resultará em doenças irreversíveis no animal e no homem, como escorbuto, hemofilia, cegueira noturna, dentre outras.

### 2.1.2. Fixação biológica do N<sub>2</sub> do ar atmosférico e incorporação do N mineral em aminoácidos

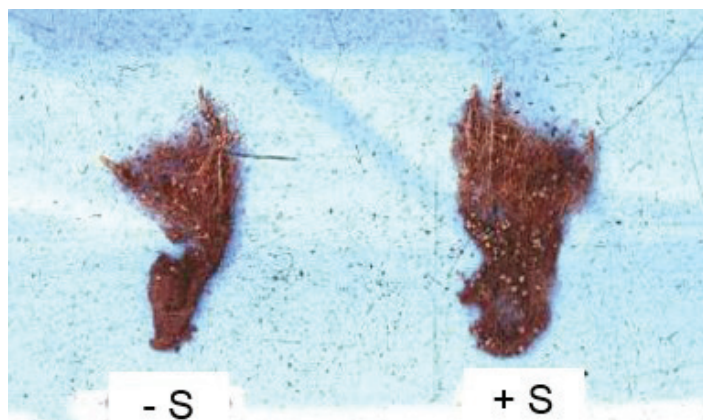
A equação geral e simplificada da fixação do N<sub>2</sub> do ar atmosférico do solo é:



O H<sub>2</sub> se origina da ação da enzima ferredoxina, contendo S na sua estrutura, sobre a molécula de água (hidrólise), conforme equação simplificada a seguir:

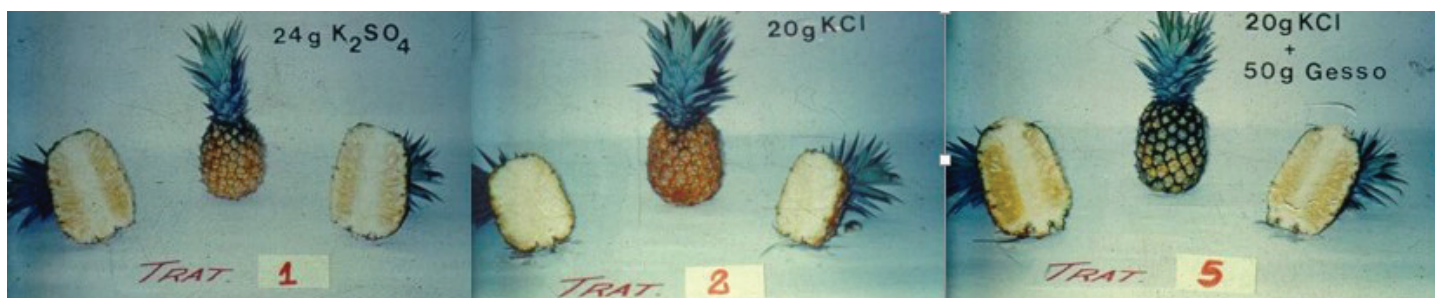
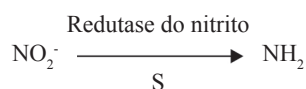


Assim, na falta de S não há geração de H<sub>2</sub> para a fixação biológica de N (Figura 2).



**Figura 2.** Nódulos de soja sem e com a presença de enxofre.  
Fonte: Malavolta (1982).

A via de assimilação do N é um processo vital que controla o crescimento e o desenvolvimento das plantas e tem efeitos marcantes sobre a produtividade final das culturas. O S faz parte da enzima redutase do nitrito (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>), e participa do processo, conforme equação simplificada a seguir:



**Figura 3.** Efeito do S na qualidade do abacaxi.  
Fonte: Vitti e Heirinchs (2007).

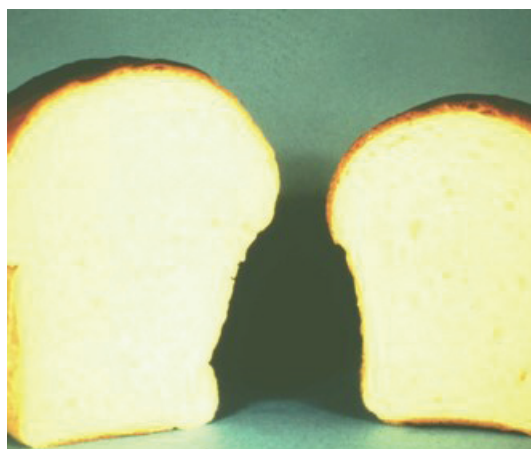
O S faz parte da composição de coenzimas, como tiamina (B1) e biotina, essenciais para a nutrição humana, bem como da coenzima A (CoA), composto essencial no estágio inicial do ciclo de Krebs – uma das etapas do processo da respiração celular dos organismos aeróbios.

## 2.2. Qualidade do produto agrícola

Em hortaliças, o S dá origem ao aroma e a sabor característicos devido à formação de bissulfeto de alila (CS<sub>2</sub>), presente no alho, cebola e mostarda.

O S faz parte de enzimas proteolíticas que conferem sabor específico às frutas, como a papaína no mamão, a bromelina no abacaxi e a ficinase no figo. Assim, na deficiência de S os frutos ficam com sabor aguado, reduzindo, assim, sua qualidade. Na Figura 3 nota-se o efeito do S na qualidade do abacaxi: o uso do sulfato promove maturação uniforme e menor acidez, seja com o uso de sulfato de potássio (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) como de cloreto de potássio (KCl) associado ao gesso. Intuitivamente, os produtores de abacaxi têm utilizado misturas de KCl com sulfato de amônio visando os efeitos positivos do S nessa cultura.

A deficiência de S, além de afetar a qualidade da proteína, no caso do trigo, afeta também a qualidade da panificação, pela sua influência na extensibilidade da massa, conforme apresentado na Figura 4. Além de pães menores, a textura fica mais granulada, a massa mais rígida, o miolo mais firme e pesado, causando envelhecimento precoce. Esse processo é contornado utilizando-se brometo na panificação, porém, este é um composto altamente tóxico para o ser humano.



**Figura 4.** Influência do enxofre na extensibilidade da massa de pão. À esquerda, trigo com presença de S.  
Fonte: The Sulphur Institute (1987).

## 2.4. Qualidade da forragem

No Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIATI), Colômbia, foi desenvolvida uma leguminosa forrageira, *Desmodium ovalifolium*, considerada adequada pela sua adaptabilidade a solos de baixa fertilidade, pisoteio e à seca; entretanto, ela foi refugada pelo gado devido à baixa palatabilidade. Acidentalmente, esses pastos foram adubados com S e o problema foi sanado.

Fato semelhante foi observado em experimento realizado no cerrado de Minas Gerais: a utilização de S na forma de gesso agrícola aumentou a palatabilidade do capim pela ocorrência de leguminosas nativas, como *Stylosantes*, *Centrosema* e *Desmodium*, conforme pode ser observado na Tabela 1.

## 2.3. Resistência ao frio e à seca

O sulfato, quando absorvido pela planta, é reduzido a radicais sulfidrilos (-SH) e dissulfeto (-S-S), os quais aumentam a resistência das plantas às baixas temperaturas e ao estresse hídrico, principalmente em culturas de inverno. Na cultura da soja, a ausência desses radicais ocasiona maior acamamento das plantas.

## 2.4. Deficiências visuais na planta

A deficiência de S é uma manifestação morfológica das alterações fisiológicas ocorridas no interior da planta; assim, quando os sintomas visuais de deficiência são observados, já ocorreram perdas na produtividade e na qualidade da cultura.

O S é um elemento relativamente imóvel na planta, portanto, as deficiências ocorrem inicialmente nas partes novas da planta, principalmente nas folhas novas, com clorose (amarelecimento) em toda a extensão do limbo. Em estádios mais avançados, além da clorose, a deficiência de S ocasiona hastes e colmos mais curtos e crescimento reduzido (Figura 5), causados pela menor síntese de proteínas e maior relação N solúvel/N protéico, ou seja, menor atividade das redutases de nitrato e de nitrito, não incorporando o N mineral (solúvel) em N protéico.

## 2.5. Exigências nutricionais

As quantidades de S extraídas pelos vegetais superiores são variáveis, de 0,02% a 1,8% na matéria seca. De modo geral, tem-se a seguinte ordem decrescente de extração: hortaliças > algodão > leguminosas > cereais e gramíneas.

Em culturas de interesse agrônomo o S é extraído em quantidades superiores às de fósforo (P), conforme pode ser observado na Tabela 2. Além da maior extração de S pelas culturas de alto

Tabela 1. Gesso e fosfato em pastagem de *Brachiaria brizanta*.

Tratamento	Matéria seca (kg ha <sup>-1</sup> )	Proteína bruta (%)	Taxa de lotação (UA ha <sup>-1</sup> )	Peso vivo (kg ha <sup>-1</sup> ano <sup>-1</sup> )
Fosfato + gesso agrícola	2.775	7,19	0,70	161,3
Fosfato	2.304	6,25	0,58	110,1
Controle	1.851	6,19	0,47	69,1

Fonte: Vilela (1986).

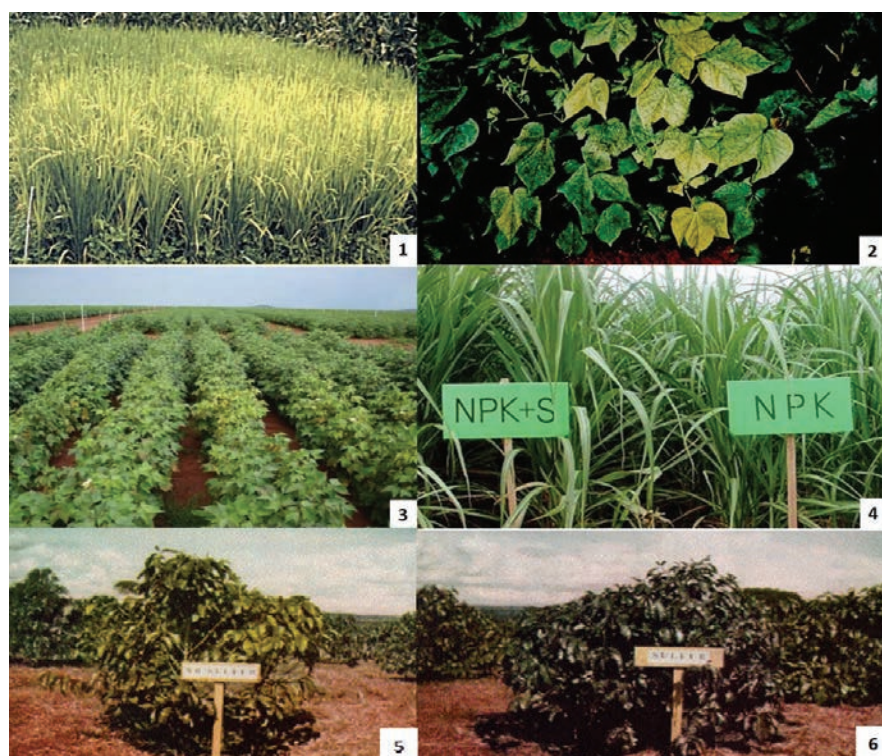


Figura 5. Deficiência de S em diversas culturas: 1 = arroz, 2 e 3 = algodão, 4 = cana-de-açúcar, 5 e 6 = café.

Fonte: Rosolem et al. (2007); Lott et al. (1960).

valor econômico e pelas forrageiras, verifica-se também elevada extração do elemento pelas hortaliças crucíferas, as quais, na dieta dos seres humanos, têm resultado na diminuição de doenças de alta periculosidade. Na Tabela 3 estão apresentadas as quantidades de S necessárias para a obtenção de altas produtividades das culturas.

## 2.6. Diagnose foliar

Além da técnica de avaliação da necessidade de S por meio da diagnose visual, utiliza-se a diagnose foliar (análise de tecidos vegetais) para a recomendação da adubação sulfatada. A diagnose foliar é realizada em época de maior transporte do nutriente para as flores em formação.

Para a diagnose foliar é necessário coletar um tipo específico de folha da planta e em período determinado (Tabela 4). Para a obtenção de produtividades elevadas, os teores de S devem estar dentro de determinado intervalo, que varia de acordo com a cultura (Tabela 5).

## 3. ENXOFRE NO SOLO

A maior proporção do S no solo encontra-se na matéria orgânica (cerca de 95%) e seu ciclo assemelha-se ao do N, sendo o fluxo controlado por reações de oxidação e redução mediadas por organismos presentes no solo (Tabela 6).

**Tabela 2.** Quantidade de enxofre e fósforo extraídos por diversas culturas.

Cultura	S	P	Colheita
	---- (kg ha <sup>-1</sup> ) ----		(t ha <sup>-1</sup> )
Algodão	33	8	1,3
Cana-de-açúcar	58	21	100
Feijão	25	9	1
Batatinha	38	27	27,6
Café	27	9	2 (coco)
Abacaxi	41	33	50.000 pés
<b>Forrageiras</b>			
• Colonião	45	44	23
• Napier	75	64	25
• Alfafa	24	21	5
<b>Hortaliças</b>			
• Couve-flor	21	9	9,2
• Repolho	64	31	84
• Ervilha	19	8	100.000 plantas
• Espinafre	6	5	22.222 plantas
• Nabo	13	11	-

Fonte: Malavolta (1976).

**Tabela 3.** Quantidade de S total na produtividade de culturas de interesse econômico.

Cultura	Produção	S
	(t ha <sup>-1</sup> )	(kg ha <sup>-1</sup> )
Arroz	8	12
Trigo	5,4	22
Milho	11,2	34
Amendoim	4,5	24
Soja	4	28
Algodão	4,3	34
Capim pangola	26,4	52
Abacaxi	40	16
Cana-de-açúcar	224	96

Fonte: Adaptada de Kamprath e Till (1983).

**Tabela 4.** Cultura, época e tipo de folha para a diagnose foliar.

Cultura	Época	Tipo de folha
Soja	Início do florescimento	3° trifólio com ou sem pecíolo
Milho	Aparecimento de inflorescência feminina	Folha abaixo e oposta à espiga superior
Algodão	Início do florescimento	5ª folha a partir do ápice sem pecíolo
Feijão	No florescimento	3ª folha com pecíolo
Cana-de-açúcar	Primavera-verão	Folha +1 (3ª a partir do ápice com bainha visível)
Café	Início do verão (dezembro e janeiro)	3° par de folhas a partir do ápice
Citros	Primavera	3ª folha a partir do fruto

Fonte: Raij et al. (1997).

**Tabela 6.** Formas de oxidação do enxofre no solo.

	Meio anaeróbico (sem O <sub>2</sub> )		Meio aeróbico (com O <sub>2</sub> )		
Estado de oxidação	S <sup>2-</sup>	S <sup>0</sup>	S <sup>2+</sup>	S <sup>4+</sup>	S <sup>6+</sup>
Composto ou íon	H <sub>2</sub> S	S	S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	SO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
	Sulfetos	Enxofre elementar	Tiosulfato	Dióxido de enxofre	Sulfato
Capacidade de campo	Solos de baixa drenagem (inundado) ou compactado		Solo com alta drenagem e "poroso"		

Fonte: Adaptada de Horowitz (2003).

**Tabela 5.** Níveis adequados de S foliar.

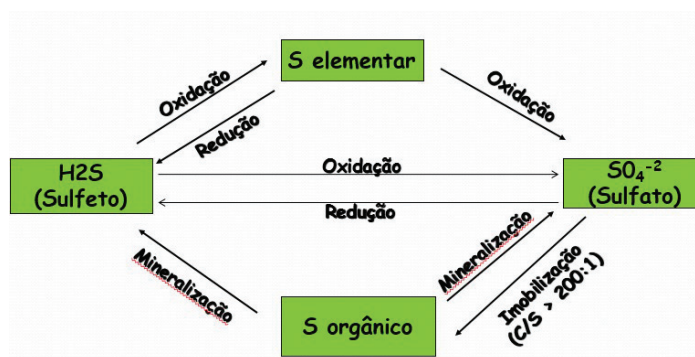
Cultura	S (g kg <sup>-1</sup> )
Soja	2,1 - 4,0
Milho	1,5 - 2,1
Algodão	4,0 - 6,0
Feijão	2,0 - 3,0
Cana-de-açúcar	3,0 - 5,0
Café	1,5 - 2,0
Citros	2,0 - 3,0

Fonte: Raij et al. (1997).

Em solos mal drenados, como os de várzea, predomina a forma menos oxidada de S, o sulfeto – gás altamente volátil e de odor desagradável. A redução do sulfato ocorre principalmente em condições de anaerobiose e na presença de substâncias doadoras de elétrons como, por exemplo, a matéria orgânica. O agente de tal reação é a bactéria anaeróbia *Desulfovibrio desulfuricans*.

Em solos bem drenados e oxigenados predomina a forma mais oxidada, o sulfato – fonte primordial de S para as plantas. Pode ser encontrado na solução do solo, adsorvido a partículas de argila ou em complexos organominerais. Os agentes responsáveis pelas reações de oxidação são os *Thiobacillus* (MALAVOLTA, 1976).

A Figura 6 apresenta o ciclo simplificado do S no solo.



**Figura 6.** Ciclo simplificado do S no solo.



**Tabela 9.** Classificação dos teores de enxofre no solo de acordo com dois extratores: acetato neutro de amônio e fosfato monocálcico.

Classes	S (mg dm <sup>-3</sup> )	
	NH <sub>4</sub> OAc.HOAc.	Ca(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> - 500 ppm P
Muito baixo	0,0 - 5,0	0,0 - 2,5
Baixo	5,1 - 10,0	2,5 - 5,0
Médio	10,1 - <b>15,0*</b>	5,1 - <b>10,0*</b>
Adequado	> 15,0	> 10,0

\* Nível crítico.

Fonte: Vitti (1989).

Além desses fatores, existem outros que também colaboram para a deficiência de S nos solos:

- Uso de variedades mais produtivas, como soja RR, milho Bt, algodão e cana-de-açúcar, por exemplo, as quais extraem e exportam maiores quantidades de S.
- Diminuição na utilização de pesticidas com S.
- Diminuição no consumo de combustíveis fósseis, os quais promovem a emissão de SO<sub>2</sub>, que pode ser absorvido diretamente pelas folhas ou levado pela chuva ao solo, formando íon sulfato, que é absorvido pelas raízes.
- Utilização de práticas culturais, como calagem e fosfatagem. A calagem aumenta a CTC efetiva do solo (carga negativa), o que também aumenta a lixiviação do SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> no solo. A adubação fosfatada, por sua vez, aumenta a desorção e a lixiviação do SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, pois o fósforo fixado nas camadas superficiais do solo promove a lixiviação do S (Tabela 10 e Tabela 11).

**Tabela 10.** Quantidade de sulfato adsorvido e desorvido nos horizontes Ap e B2 de um Oxissol.

Horizonte	S-SO <sub>4</sub> adsorvido	Quantidade desorvida	% Desorvido
	----- (ppm) -----		
Ap	114	107	97
B2	179	82	46

Fonte: Adaptada de Kamprath e Till (1983).

**Tabela 11.** Efeito do fosfato na desorção do sulfato.

Fosfato adicionado	S-SO <sub>4</sub> adsorvido
----- (meq 100g <sup>-1</sup> ) -----	
0	2,9
0,12	1,7
0,24	0,6
0,36	0

Fonte: Adaptada de Kamprath e Till (1983).

## 4. MANEJO DA ADUBAÇÃO SULFATADA

A adubação sulfatada pode ser realizada utilizando-se tanto fontes tradicionais de S, comumente empregadas na agricultura há décadas, como fontes mais modernas, principalmente as obtidas a partir do S elementar.

### 4.1. Fertilizantes tradicionais

As fontes tradicionais para o fornecimento de S às culturas estão apresentadas na Tabela 12.

**Tabela 12.** Fontes tradicionais para o fornecimento de enxofre.

Material fertilizante	Fórmula química	Teor de S (%)
Sulfato de amônio	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	24
Superfosfato simples	Ca(H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> + 2CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	12
Gesso natural ou agrícola	CaSO <sub>4</sub> .2H <sub>2</sub> O	15-18
Sulfato de potássio	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	18
Sulfato de potássio e magnésio	K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> .2MgSO <sub>4</sub>	22
Sulfato de magnésio	MgSO <sub>4</sub> .7H <sub>2</sub> O	13
Tiosulfato de amônio	(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .5H <sub>2</sub> O	26
Polissulfato	K <sub>2</sub> Ca <sub>2</sub> Mg(SO <sub>4</sub> ) <sub>4</sub>	19
Kieserita	MgSO <sub>4</sub> .H <sub>2</sub> O	20

Fonte: Modificada de Vitti et al. (2006).

Dentre as fontes tradicionais, as mais utilizadas são o sulfato de amônio, o superfosfato simples e o gesso agrícola, junto a outras fontes alternativas, citadas na Tabela 13.

**Tabela 13.** Fontes alternativas para o fornecimento de enxofre.

Fertilizante	% enxofre	Densidade
Sulfonitrato de amônio <sup>1</sup>	6	-
Nitrosulfato de amônio <sup>2</sup>	12	-
Ureia + sulfato de amônio <sup>3</sup>	12	-
Sulfuran <sup>4</sup>	4	1,26
Fosfosulfato de amônio	14-20	-
Resíduos orgânicos		
Subproduto da produção de aminoácidos	3	1,16
Vinhaça	0,13	1,01

<sup>1</sup> Mistura de 75% de nitrato de amônio + 25% de sulfato de amônio (30% de N).

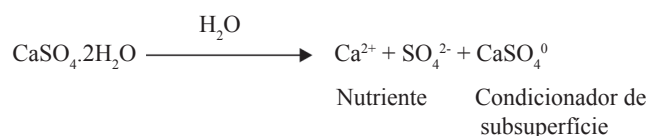
<sup>2</sup> Mistura de 50% de nitrato de amônio + 50% de sulfato de amônio (27% de N).

<sup>3</sup> Mistura de 50% de ureia + 50% de sulfato de amônio (32% de N).

<sup>4</sup> Mistura de 50% urânio + 50% de sulfato de amônio.

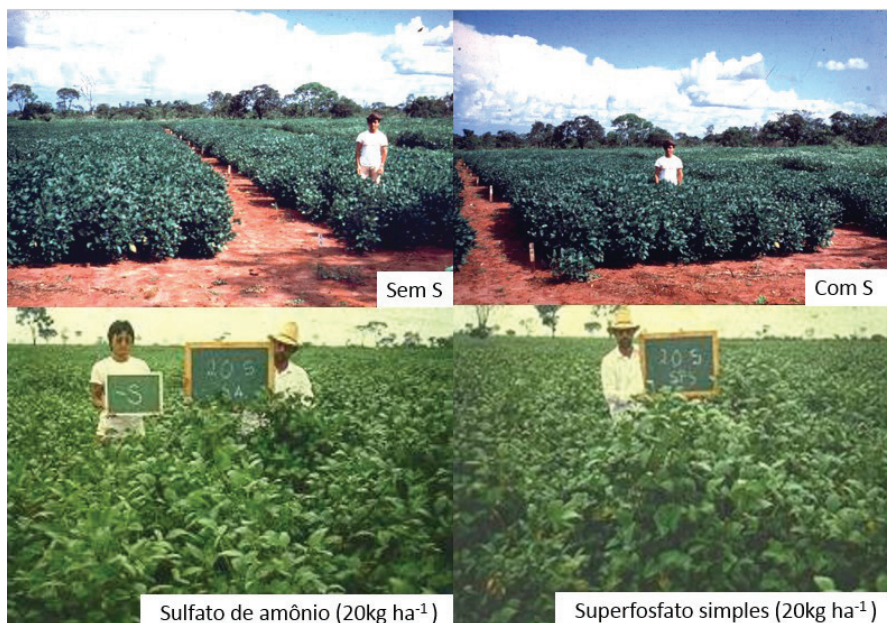
Fonte: Adaptada de Vitti e Heirinchs (2007).

Destacam-se também, como fontes tradicionais de S, o gesso natural (gipsita, contendo cerca de 15% de S) e o gesso agrícola, quando utilizado como condicionador de subsuperfície, bem como a vinhaça e o Ajifer na cultura da cana-de-açúcar. Com relação ao gesso agrícola e ao superfosfato simples, os mesmos apresentam a vantagem de ter o sulfato ligado ao cálcio, o que facilita a mobilidade no perfil do solo, como mostra a equação simplificada:



Vitti et al. (2008) estudaram a aplicação de sulfato de amônio, superfosfato simples e sulfato de potássio e magnésio, na dose de 20 kg ha<sup>-1</sup> S, na cultura da soja cultivada em solo de cerrado, no município de Conceição das Alagoas, MG e observaram que as três fontes utilizadas foram eficientes em suprir S para a cultura (Figura 7).

Broch (sd) verificou que o uso de gesso agrícola como fonte de enxofre na cultura de trigo refletiu em efeito positivo no cultivo posterior de soja (Figura 8).



**Figura 7.** Experimento realizado em Conceição das Alagoas, MG, com diferentes fontes de enxofre.

Fonte: Vitti et al. (2008).



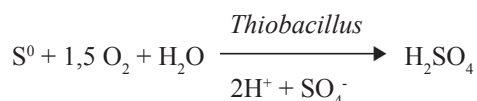
**Figura 8.** Aplicação de gesso agrícola em trigo e efeito na cultura da soja em sucessão. À esquerda, com adição de S.

Fonte: Broch, D. Fundação MS.

#### 4.2. Fertilizantes com enxofre elementar

A incorporação de S elementar (90% S) aos fertilizantes minerais é uma alternativa que vem sendo adotada atualmente como forma de diminuir os custos de produção, transporte, estocagem e aplicação, além de outras vantagens, mostradas na Figura 9. Esta estratégia está se tornando atrativa especialmente em condições de aumento do preço do gesso agrícola, assim como em regiões onde o custo de transporte do gesso agrícola torna-se muito alto devido à distância do local de produção, como ocorre em boa parte da região dos Cerrados.

Entretanto, deve-se observar que o S na forma elementar não pode ser absorvido diretamente pelas plantas, precisando, primeiro, ser oxidado para ser convertido em sulfato, conforme a reação:



Observa-se que a oxidação do S elementar gera acidez (íons  $H^+$ ) no solo. Esse fato foi comprovado em experimento de Ferreira et al. (1977) em dois solos, um Latossolo Roxo (LR), com pH inicial de 6,4, e um Latossolo Vermelho-Escuro (LEa) de textura arenosa, com pH inicial de 5,7. Aos 50 dias de incubação foi observada correlação linear negativa entre pH e quantidade de S adsorvido ao solo.

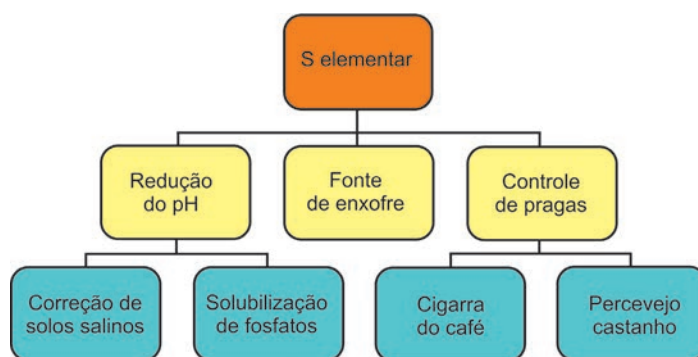
A oxidação ocorre por meio de reações catalisadas por enzimas (arilsulfatases e rodanases) produzidas por microrganismos de solos, como as bactérias do gênero *Thiobacillus*, consideradas de maior importância, além de vários outros microrganismos heterotróficos (bactérias e fungos). A Tabela 14 apresenta a atividade das enzimas arilsulfatases e rodanases em diversos tipos de vegetação. Nota-se que a atividade das enzimas aumenta de acordo com o aumento dos teores de carbono orgânico, S total e S orgânico.

Os diversos tipos de microrganismos envolvidos na oxidação do S elementar no solo podem ser observados na Tabela 15. Solos de pastagem, eucalipto e de florestas isolada e integrada estimulam o crescimento da população de bactérias autotróficas oxidantes de S elementar e florestas integradas estimulam o crescimento de bactérias heterotróficas oxidantes de  $S_2O_3^{2-}$ .

Portanto, esse é um processo biológico que depende de várias condições ambientais propícias para que se obtenha maior eficiência na adubação. A oxidação do S elementar em sulfato é influenciada por diversos fatores, os quais estão apresentados na Figura 10.

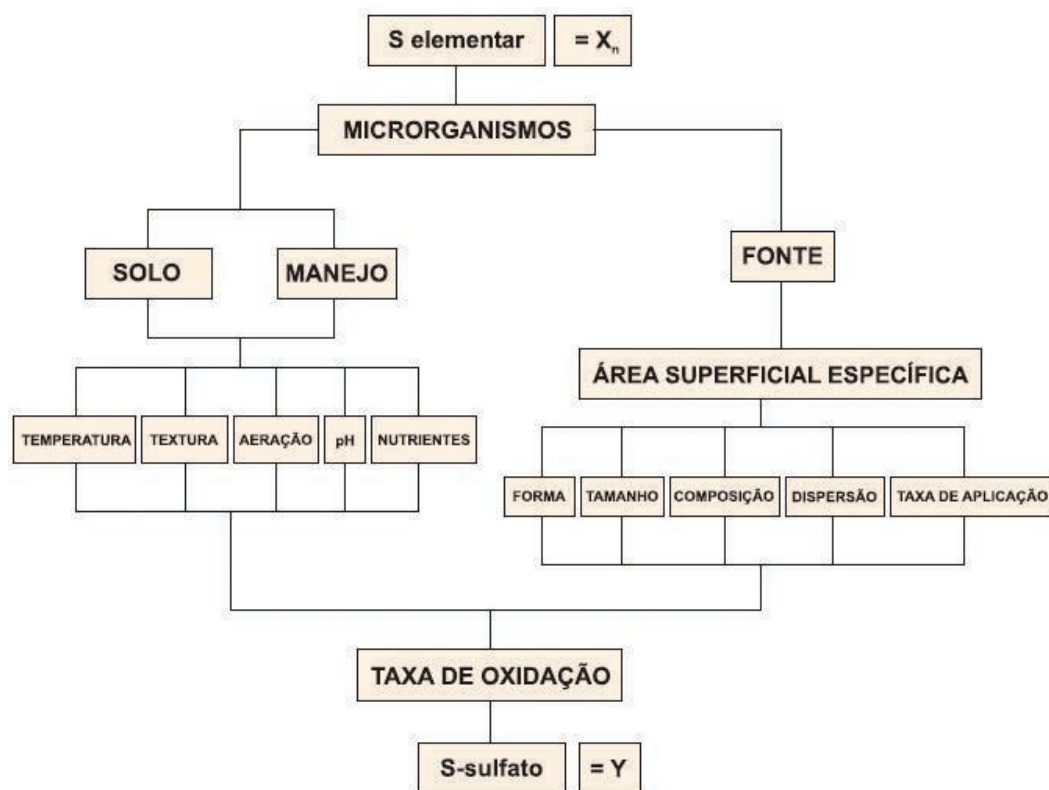
Além da presença da população microbiológica desejável, são importantes as condições de:

- Temperatura. Embora a temperatura ótima para a oxidação ainda não esteja bem definida, estudos publicados por diversos autores demonstram que as maiores taxas ocorrem entre 30 °C e 40 °C. Em temperaturas inferiores a 5 °C, a oxidação torna-se nula ou inexpressiva, conforme mostra a Figura 11.
- Umidade e aeração. As taxas máximas de oxidação ocorrem ao redor da capacidade de campo. Em condições de baixa umidade no solo a oxidação é limitada por insuficiência de água para a atividade microbiana, ao passo que em solos com alto teor de umidade ela é limitada pela aeração inadequada.
- Textura do solo e matéria orgânica. Quanto maior o teor de argila e matéria orgânica no solo, maior a tendência de oxidação.



**Figura 9.** Usos de enxofre elementar.





**Figura 10.** Diagrama das relações variáveis ( $X_n$ ) e dependente ( $Y$ ) correlatas que afetam a oxidação do S-elementar a S-sulfato. **Fonte:** Horowitz (2003).

**Tabela 14.** Atividade das enzimas arilsulfatases e rodanasas em diferentes tipos de vegetação.

Vegetação	Arilsulfatase ( $\mu\text{g p-nitrofenol g}^{-1}$ solo seco $\text{h}^{-1}$ )	Rodanase ( $\text{nmoles de SCN}^{-} \text{g}^{-1}$ solo seco $\text{h}^{-1}$ )
Floresta isolada	22,93 b <sup>1</sup>	679,89 b
Floresta integrada	37,02 a	1.682,98 a
Milho	0,15 d	270,27 c
Eucalipto	15,74 c	154,24 c
Pastagem	13,83 c	1.747,07 a
CV (%)	15,09	10,89

<sup>1</sup> Em cada coluna, médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si em 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

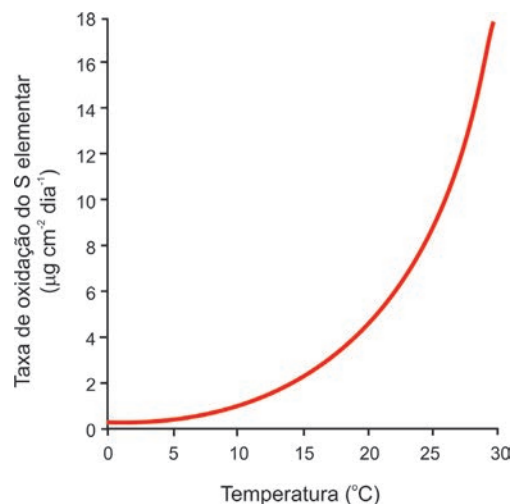
**Fonte:** Pinto e Nahas (2002).

**Tabela 15.** Oxidação autotrófica e heterotrófica em diferentes tipos de vegetação.

Vegetação	Bactéria total ( $\times 10^8$ )	Oxidação autotrófica $\text{S}^0$ ( $\times 10^5$ )	Oxidação heterotrófica $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ ( $\times 10^5$ )
Floresta isolada	5,6 b	32,3 ab	12,8 b
Floresta integrada	28,7 ab	57,5 ab	68,8 a
Milho	194,9 ab	5,6 b	13,4 b
Eucalipto	19,2 ab	59,9 a	13,8 b
Pastagem	77,5 ab	88,9 a	13,2 b
CV (%)	6,41	5,9	5,1

<sup>1</sup> Em cada coluna, as médias seguidas pela mesma letra não diferem em 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

**Fonte:** Pinto e Nahas (2002).

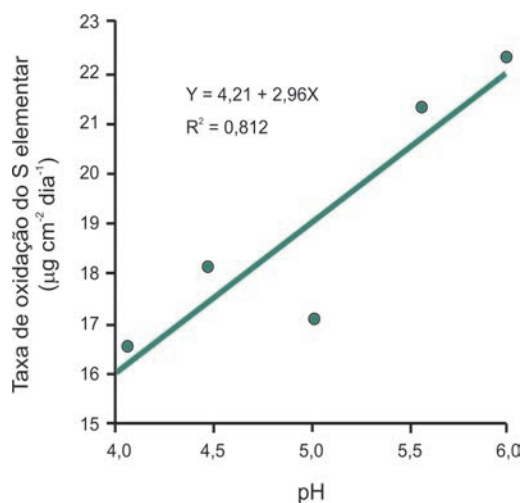


**Figura 11.** Relação entre taxa de oxidação do S elementar e temperatura. **Fonte:** Adaptada de Janzen e Bettany (1987).

Porém, o efeito positivo depende mais do teor de matéria orgânica do que da textura, o que pode ser atribuído ao seu uso como fonte de energia para a população de microrganismos.

- Valores de pH. Em solos tropicais, a taxa de oxidação do S elementar aumenta à medida que aumenta o pH do solo, conforme mostra a Figura 12 (HOROWITZ, 2003). Nos solos ácidos, a velocidade de oxidação é maior nos solos com pH próximo a 6,0, comparada aos menores valores de pH. A Tabela 16 mostra a faixa adequada de pH para a oxidação do S elementar pelos microrganismos. A Tabela 17 apresenta a oxidação diária de S realizada por microrganismos heterotróficos.

- Presença de outros nutrientes. A oxidação do S tende a ser mais rápida em solos mais férteis, devido à maior manutenção da população microbiana.



**Figura 12.** Relação entre pH e taxa de oxidação de S em Latossolo Vermelho, após 90 dias de incubação com S elementar.

Fonte: Horowitz (2003).

**Tabela 16.** Formas de bactérias quimioautotróficas do gênero *Thiobacillus* e faixa adequada de pH.

Tipo	pH
<i>Thiobacillus thiooxidans</i>	2,0 a 5,0
<i>Thiobacillus ferrooxidans</i>	-
<i>Thiobacillus neapolitanus</i>	7,0
<i>Thiobacillus denitrificans</i>	-
<i>Thiobacillus thioparus</i>	7,0

Fonte: Horowitz (2003).

**Tabela 17.** Oxidações diárias de S por microrganismos.

Organismo	País	mg S <sup>0</sup> cm <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup>
<i>Thiobacillus</i>	Austrália	50
Heterotróficos	Canadá	5

Fonte: Watkinson (1989); Janzen e Bettany (1987).

- Granulometria das partículas do adubo. Reduzindo-se o tamanho das partículas do S-elementar adicionado ao solo ocorre aumento acentuado na taxa de oxidação devido ao aumento da área superficial das partículas, o que favorece o contato com os microrganismos oxidantes. De maneira geral, considera-se que, para rápida oxidação do S elementar a ser aplicado, as partículas deste fertilizante devem ser de tamanho inferior a 0,15 mm.

#### 4.2.1. Fatores que afetam a eficiência de fontes com enxofre elementar

- Área da superfície específica do adubo. A oxidação do S elementar é função direta da superfície da partícula diretamente exposta à atividade microbiana, conforme apresentado por FOX et al. (1964) por meio da seguinte equação:

$$S = 6 / \rho d$$

em que:

S = superfície específica (cm<sup>2</sup> g<sup>-1</sup>)

d = diâmetro (cm)

ρ = densidade (g cm<sup>-3</sup>)

Assim, adubos com formas pastilhadas são mais eficientes do que os que apresentam formas esféricas ou em blocos por apresentarem maior superfície específica (WATKINSON, 1993).

- Tamanho da partícula do adubo. Quanto menor o tamanho da partícula do adubo, maior é a taxa de oxidação do S (WAIN-GHRIGHT, 1984). Na Tabela 18, na Tabela 19 e na Tabela 20 são apresentadas as taxas de oxidação do S em função do tamanho das partículas obtidas por diferentes pesquisadores.

**Tabela 18.** Taxa de oxidação diária do S elementar em função do tamanho da partícula.

Tamanho da partícula	Taxa de oxidação do S elementar
(mm)	(Mg S <sup>0</sup> cm <sup>-2</sup> dia <sup>-1</sup> )
< 0,048	21,3
< 0,125	3,7

Fonte: Donald e Chapman (1998).

**Tabela 19.** Taxa de oxidação anual do S elementar em função do tamanho da partícula.

Tamanho da partícula (mm)	Oxidação
< 0,15	90% (1 ano)
0,25 a 0,50	3 anos
1,00 a 2,00	Longo período

Fonte: Boswell (1997).

**Tabela 20.** Taxa de oxidação do S elementar após 340 dias em função do tamanho da partícula.

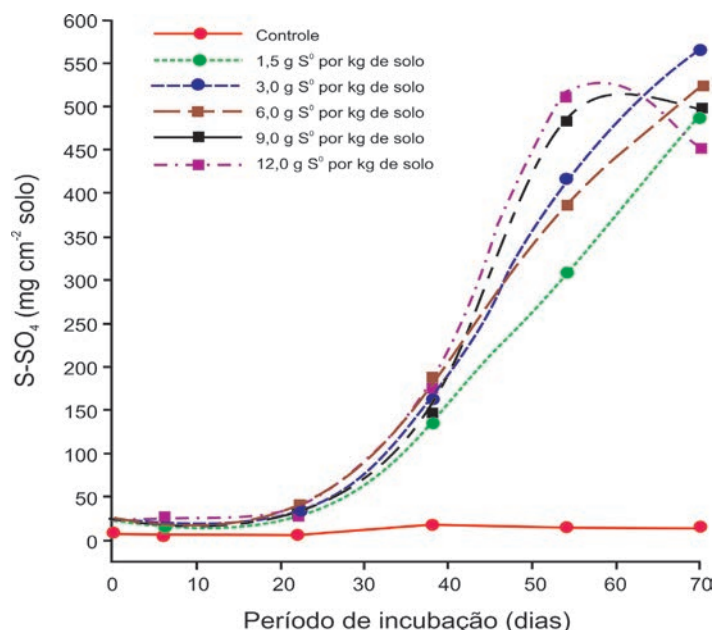
Tamanho da partícula	Oxidação
(mm)	(340 dias)
< 0,15	90% oxidado
> 0,15	24 a 55% oxidado

Fonte: Lee et al. (1988).

Trabalhos desenvolvidos em solos de Cerrado mostraram que o S elementar aplicado em solos com partículas menores que 0,50 mm apresentou eficiência agrônômica similar à do gesso agrícola. Entretanto, essa fonte não foi eficiente no primeiro ano de cultivo do milho (EMBRAPA, 1997).

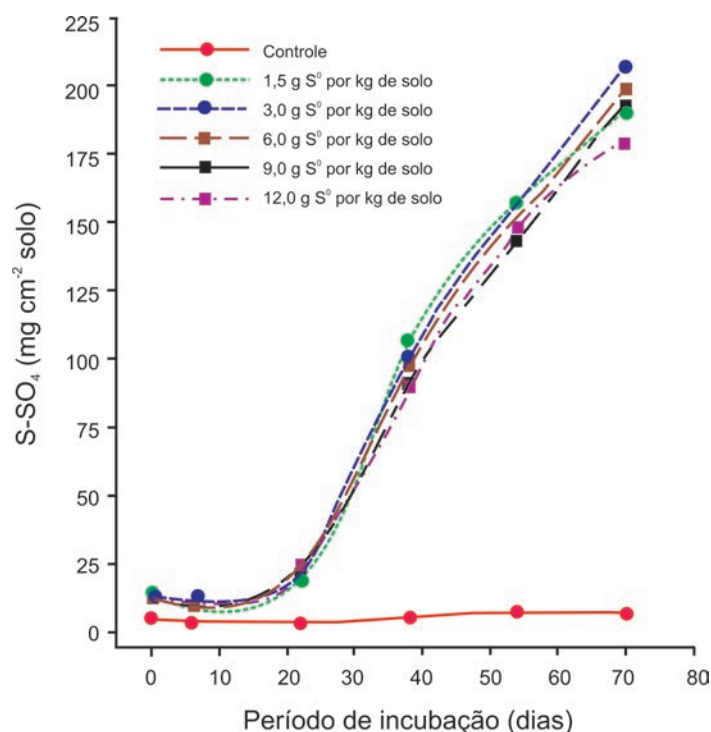
- Dose de aplicação do adubo. A taxa de oxidação do S elementar varia de acordo com a dose de aplicação do adubo. Em pesquisa de Janzen e Bettany (1987), a maior taxa de oxidação ocorreu com a aplicação de doses entre 0 e 4.000 mg kg<sup>-1</sup> de S para partículas de tamanho entre 0,106 e 0,150 mm, enquanto para partículas < 0,053 mm a taxa de oxidação ocorreu com doses de até 400 mg kg<sup>-1</sup> de S.

Horowitz e Meurer (2006), utilizando doses de S elementar de 0, 1,5, 3, 6, 9 e 12 g kg<sup>-1</sup> em Argissolo e Latossolo (Ultissolo e Oxissolo, respectivamente), observaram oxidação máxima com até 3 g kg<sup>-1</sup> de S<sup>0</sup> no solo, ocorrida aos 70 dias de incubação (Figura 13 e Figura 14). Observou-se também que o processo de oxidação iniciou aos 20 dias e se completou aproximadamente aos 70 dias. Entretanto, o processo foi maior no Argissolo (pH 6,4) do que no Oxissolo (pH 4,2), com valores de 56 mg dm<sup>-3</sup> de S-SO<sub>4</sub> e 207 mg dm<sup>-3</sup> de S-SO<sub>4</sub>, respectivamente, mostrando a ocorrência de maior oxidação em solos com pH mais elevado.



**Figura 13.** Teor de S-sulfato no Argissolo em função dos períodos de incubação para doses de S-elementar adicionadas ao solo.

Fonte: Horowitz e Meurer (2006).



**Figura 14.** Teor de S-sulfato no Latossolo em função dos períodos de incubação para doses de S-elementar adicionadas ao solo.

Fonte: Horowitz e Meurer (2006).

- Dispersão do S elementar no solo. A inadequada dispersão das partículas de S reduz a taxa de oxidação do S. A dispersão decresce até a dose de 1 g de S elementar para 50 g de solo em decorrência de dois motivos: (a) acúmulo excessivo de produtos de oxidação (tóxicos e ácidos) e (b) caráter hidrofóbico das partículas.

A potencialização da oxidação do S elementar pode ser obtida de várias formas, como: aplicação de uma quantidade mínima de S elementar ao solo (1 cg em 1.000 cg de solo); incorporação do adubo ao solo; aplicação do adubo em área total ao invés da aplicação localizada e correção prévia do solo com calcário, visando aumentar a taxa de oxidação do S elementar.

## 4.2.2. Formas de aplicação do enxofre elementar

Uma metodologia desenvolvida no Canadá, e que atualmente é a forma mais comum e eficiente de aplicação dos produtos com S elementar, é a utilização da bentonita, uma argila expansiva que é fundida às partículas finas do S elementar com a finalidade de obter um fertilizante granulado e facilitar a aplicação do produto (BOSWELL et al., 1988).

O objetivo desse processo industrial é que, com a umidade do solo, os grânulos de S elementar com bentonita se desintegram, expondo a grande área superficial das partículas finas à atividade microbiana, já que a bentonita, sendo uma argila expansiva, em contato com a umidade do solo tem seu volume aumentado em torno de 20 vezes, conforme descrito por Tisdale et al. (1993).

As alternativas para o uso de S elementar no solo são: S pastilhado; S incorporado em grânulos fosfatados e S revestindo ureia, fosfato monoamônio (MAP) e superfosfato triplo (TSP).

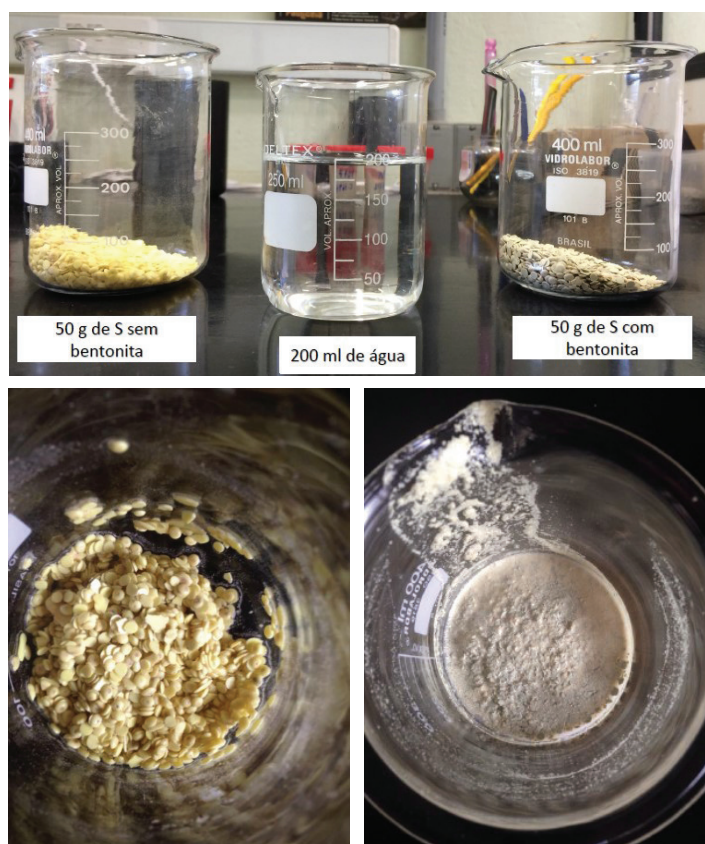
### 4.2.2.1. Enxofre pastilhado

Trabalhos desenvolvidos no Canadá, Austrália e Nova Zelândia demonstraram a possibilidade de utilização segura do S elementar puro ou incorporado a fertilizantes.

Considerando a comercialização de diferentes fontes de S elementar pastilhado no mercado brasileiro nos últimos anos, é necessário desenvolver uma metodologia adequada para avaliar a taxa de oxidação do S dessas fontes, uma vez que isso afetará o sucesso ou não do uso do produto pelos agricultores. Tem-se observado no mercado a presença de S elementar pastilhado com ou sem a adição de argilas expansivas, o que tem ocasionado preocupações a respeito da eficiência da conversão do S elementar a sulfato em condições de campo. Isso ocorre devido às várias origens (países) do S elementar pastilhado que está sendo comercializado no Brasil, especialmente nos últimos anos.

Apesar de não existir metodologia padronizada para esta finalidade, o Grupo de Apoio à Pesquisa e Extensão (GAPE), na ESALQ, tem realizado testes preliminares para verificar a capacidade de dissolução em água de fontes comerciais de S elementar disponíveis no Brasil. Considerando que é necessário o contato entre o S elementar e as partículas de solo para que a oxidação microbiana seja efetiva, é evidente que os produtos pastilhados que apresentem maior capacidade de dissolução terão maior taxa de oxidação em nossos solos. Testes preliminares têm demonstrado diferença expressiva da capacidade de dissolução em água do S elementar pastilhado, sem e com bentonita, no processo de produção após permanência em água durante 24 h (Figura 15). Este teste simples pode ser realizado pelos agricultores antes da aquisição dos produtos à base de S elementar.

A legislação brasileira, por meio da instrução normativa nº5 de 23/02/2007, regulamenta as garantias mínimas de utilização simples com S elementar, conforme apresentado na Tabela 21. Entretanto, para cumprir essa legislação é necessário o uso de S elementar na forma de pó, tornando-se grande problema na utilização do produto por diversas razões, como: segregação do produto se o mesmo entrar em misturas com outras fontes granuladas; dificuldade de aplicação localizada, por falta de mecanismos aplicadores eficientes para adubação com fertilizantes na forma de pó; e riscos para operadores nas aplicações do produto a lançar em superfície, pois o contato do S elementar com a pele acarreta rápidas reações de oxidação, causando irritações e queimaduras. Por isso, até poucos anos atrás, a utilização do S elementar nas adubações era irrisória no Brasil.



**Figura 15.** Enxofre elementar pastilhado sem (à esquerda) ou com (à direita) adição de bentonita (50 g em 200 ml de água deionizada) após repouso durante 24 horas.

Fonte: GAPE, 2015 (dados não publicados).

Damato et al. (2008) avaliaram a taxa de oxidação do S elementar pastilhado com bentonita em comparação ao produto convencional na forma de pó, em três tipos de solo brasileiros, e concluíram que ambas as formas físicas do produto foram similares e de mesma eficácia no aumento do teor de sulfato nos solos (Figura 16).

#### 4.2.2.2. Enxofre incorporado em grânulos fosfatados

O processo de enriquecimento de fertilizantes fosfatados com S consiste na mistura de sulfato e de S elementar no processo de granulação, aumentando o conteúdo de S no adubo, porém sem diminuir o conteúdo de P (Figura 17). Desta forma, o N e o  $P_2O_5$  são liberados mais rapidamente e o S mais lentamente. O pH do solo decresce em torno do grânulo, aumentando a solubilidade do  $P_2O_5$  em solos neutros e alcalinos. Pode-se encontrar produtos no mercado com os três nutrientes em um único grânulo, metade do S na forma de sulfato e outra metade na forma elementar, como a fórmula 13-33-00 + 15% de S.

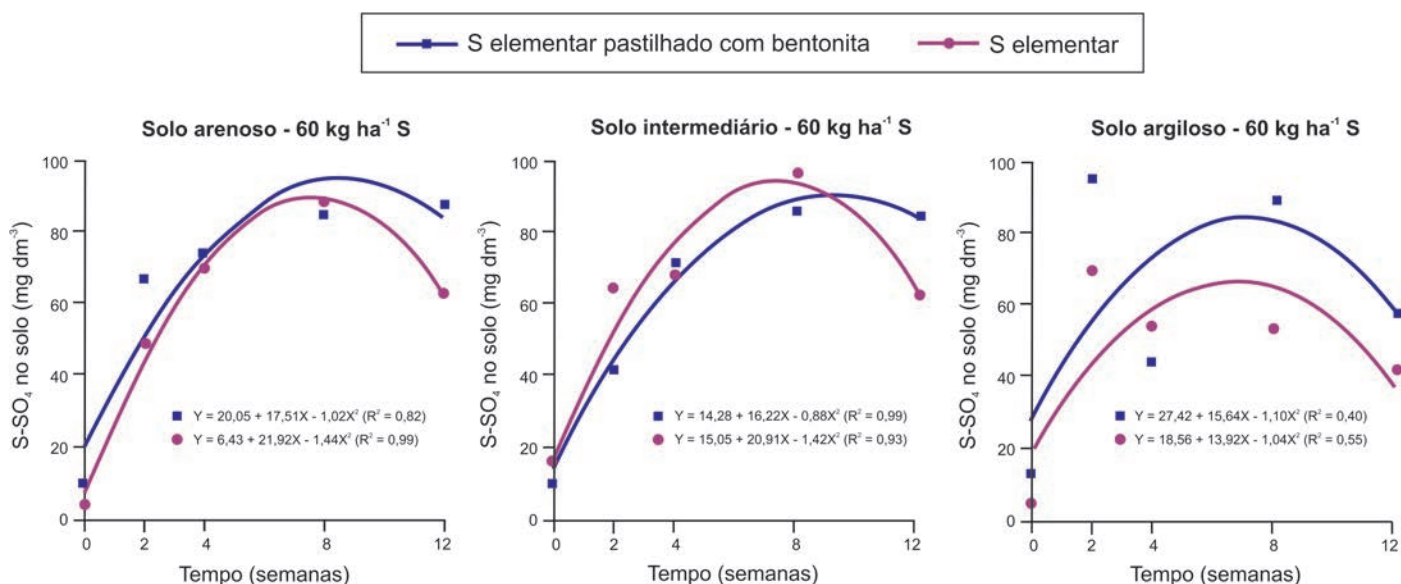
A incorporação de sulfato e de S elementar ao fertilizante por meio de formas sólidas fundidas pode resultar em produto com partículas com granulometria de 5 a 200 micrometros de S elementar, combinadas com MAP, DAP ou TSP e misturas NPK (trituração úmida contendo aditivos). No caso do TSP, o produto final apresenta 12% de S micronizado, similar ao conteúdo de S no superfosfato simples, porém com 2 a 2,5 vezes mais  $P_2O_5$  (Figura 18).

#### 4.2.2.3. Enxofre revestindo ureia, MAP e TSP

Esse processo envolve a aspersão do S elementar em pó, a  $102^\circ C$ , sobre os grânulos de ureia, MAP ou TSP visando a fusão do S elementar e o recobrimento dos grânulos (Figura 19). O resultado desse processo está apresentado na Tabela 22.

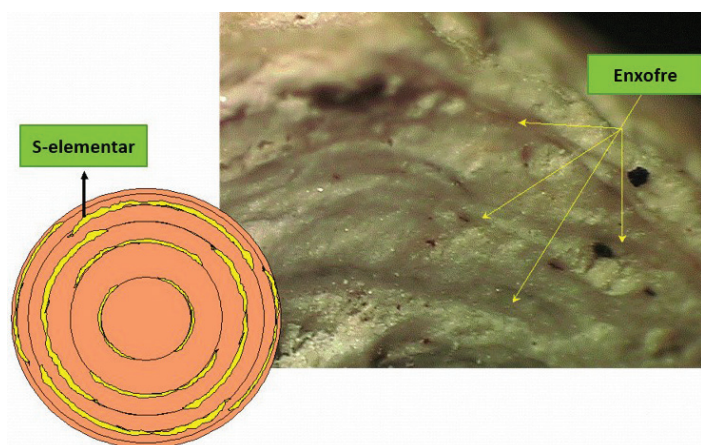
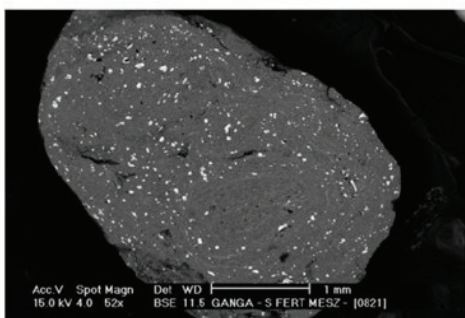
**Tabela 21.** Legislação brasileira referente ao uso de S-elementar.

Nutriente	Garantia mínima	Forma	Especificação granulométrica	Origem
Enxofre	95% S	Determinado como enxofre total	Pó	Extração de depósitos naturais de enxofre ou da rocha pirita, subproduto de gás natural, gás de refinaria e fundição do carvão. Podem ser obtidos também do sulfato de cálcio ou da anidrita.

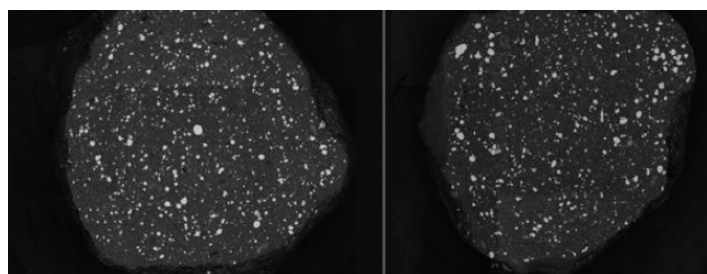


**Figura 16.** Fontes e doses de S-elementar aplicados em solos de textura arenosa, intermediária e argilosa.

Fonte: Damato et al. (2008).



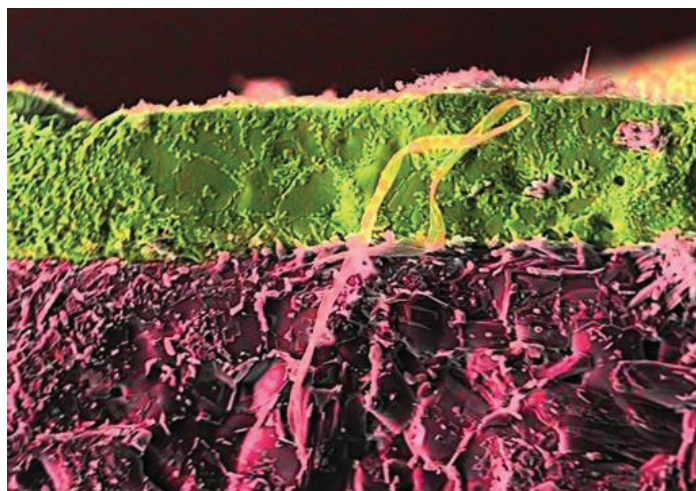
**Figura 17.** Tecnologia de incorporação de enxofre elementar em fertilizantes fosfatados.  
**Fonte:** Mosaic Fertilizantes.



**Figura 18.** Tecnologia de incorporação de sulfato e de S elementar em MAP granulado resultando na formulação 11-40-0 12 S (70% de S elementar e 30% de S sulfato).  
**Fonte:** Shell.

#### 4. CONCLUSÃO

A deficiência de S em diversas culturas agrícolas no Brasil é uma realidade atualmente. A deficiência nas lavouras, além de afetar negativamente a produtividade, diminui a qualidade do produto colhido.



**Figura 19.** Eletromicrografia de varredura da ureia (em cor rosa) revestida com 16% enxofre elementar (em cor verde).  
**Fonte:** Souza (2015).

**Tabela 22.** Fontes de N e P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> recobertas com S elementar.

Fertilizante	N (%)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (%)	S (%)
Ureia	37	-	16
MAP	9	43	16
TSP	-	37	16

**Fonte:** Fertilizantes Heringer.

A utilização de fertilizantes simples mais concentrados, como ureia, nitrato de amônio, superfosfato triplo, MAP e DAP tem diminuído a adição de S por meio de fertilizantes simples. O gesso agrícola tem sido utilizado em larga escala na agricultura brasileira como condicionador de solo e como fonte de S. Entretanto, as questões logísticas e o aumento recente nos preços do gesso agrícola tem tornado necessário desenvolver fontes não convencionais de S para as culturas. Nesse sentido, produtos a partir de S elementar tem sido desenvolvidos, tanto para aplicação isolada em área total quanto para mistura em formulações NPK, ou ainda como revestimento de fertilizantes fosfatados.

Diferentemente do gesso agrícola, do sulfato de amônio e do superfosfato simples, nos quais o S encontra-se na forma de sulfato (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) prontamente disponível para as plantas, fontes a partir de S elementar (S<sup>0</sup>) precisam sofrer oxidação microbiana para transformar o S elementar em sulfato e ser efetivamente aproveitado pelas plantas.

Em solos tropicais, os fatores climáticos não limitam a oxidação do S elementar, porém, quando no uso dessa fonte é essencial observar a qualidade da mesma, principalmente quanto à granulometria, grau de dispersão, tamanho e forma das partículas e qualidade de aplicação. Portanto, considerando que diversas fontes de S elementar têm surgido no mercado brasileiro recentemente, os agricultores tem que estar atentos a estes fatores para que seu uso promova os efeitos desejados em sua lavoura.

#### 5. REFERÊNCIAS

BOSWELL, C. C. Dryland lucerne responses to elemental sulphur of different particle sizes applied at different rates and frequencies in North Otago, New Zealand. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, Wellington, v. 40, p. 283-295, 1997.

- 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**, Wageningen, v. 15, p. 33-46, 1988.
- DAMATO, H.; MORAES, M. F.; CABRAL, C. P.; LAVRES JUNIOR, J.; MALAVOLTA, E.; ABREU JUNIOR, C. H. Oxidação do enxofre elementar do Sulfurgran em três solos do Estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - AGROPECUÁRIA, 16., 2008, Piracicaba, SP. **Anais...** Piracicaba, SP: EDUSP, 2008. v. 1. p. 1.
- DONALD, D.; CHAPMAN, S. J. Use of powdered elemental sulphur as a sulphur source for grass and clover. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Madison, v. 29, n. 9 -10, p. 1315-1328, 1998.
- EMBRAPA. Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados. Efeito da granulometria na eficiência agrônômica de fontes de enxofre em solo de Cerrado. Planaltina, DF: EMBRAPA/CPAC; Porto Alegre: Aduos Trevo, 1997. n. p. Relatório Final elaborado em 12/97.
- FERREIRA, M. E.; VITTI, G. C.; PERECIM, D.; CASTELLANE, P. D. Uso do enxofre elementar na acidificação de solos. **Revista Científica**, Jaboticabal, v. 5, n. 3, p. 287-295, 1977.
- FOX, R. L.; ATEALP, H. M.; KAMPBELL, D. H.; RHOADES, H. F. Factors influencing the availability of sulfur fertilizers to alfafa and corn. **Soil Science Society Proceedings**, Madison, v. 28, p. 406-408, 1964.
- HOROWITZ, N. **Oxidação e eficiência agrônômica do enxofre elementar em solos do Brasil**. 2003. 109 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- HOROWITZ, N.; MEURER, E. J. Oxidação do enxofre elementar em solos tropicais. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 3, p. 822-828, 2006.
- JANZEN, H. H.; BETTANY, J. R. Measurement of sulfur oxidation in soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 134, n. 6, p. 444-452, 1987.
- KAMPRATH, E. J.; TILL, A. R. Sulfur cycling in the tropics. In: BLAIR, G. J.; TILL, A. R. (Ed.). **Sulfur in S.E. Asian and S. Pacif Agriculture**. Indonesia: Univ. New England, 1938. p. 1-14.
- LEE, A.; BOSWELL, C.C.; WATKINSON, J. H. Effect of particle size on the oxidation of elemental sulphur, thiobacili numbers, soil sulfate and its availability to pasture. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, Wellington, v. 13, p. 179-186, 1988.
- LEFROY, R. D. B.; MAMARIL, C. P.; BLAIR, G. J.; GONZALES, P. B. Sulfur cycling in rice wetlands. In: HOWARTH, R. W.; STEWART, J. W. B.; IVANOV, M. V. (Ed.). **Sulfur cycling on the continents: Wetlands, terrestrial ecosystems and associated water bodies**. New York: John Wiley & Sons, 1992. p. 279-299.
- LOTT, W. L.; McLUNG, A. C.; MEDCALF, J. C. **Deficiência de enxofre no cafeeiro**. New York: IBEC Research Institute, 1960. 19 p. (IBEC. Boletim Técnico, 32)
- MALAVOLTA, E. **Manual de química agrícola: Nutrição de plantas e fertilidade do solo**. 1. ed. São Paulo: Editora Agrônômica Ceres, 1976. 528 p.
- MALAVOLTA, E. **Potássio, magnésio e enxofre nos solos e culturas brasileiras**. Piracicaba: Instituto Internacional da Potassa, 1982. 92 p. (Boletim Técnico, 4)
- RAIJ, B. V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. **Recomendação de adubação e calagem para solos do estado de São Paulo**. 2. ed. rev. atual. Campinas: Instituto Agrônômico/Fundação IAC, 1997. 285 p. (Boletim Técnico, 100)
- ROSOLEM, C. A.; ZANCANARO, L.; TESSARO, L. C. Nitrogênio e enxofre na cultura do algodoeiro. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S.; VITTI, G. C. **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2007. p. 322-347.
- OLIVEIRA, M. V.; TRIVELIN, P. C. O.; PENATTI, C. P.; PICCOLLO, M. C. Decomposição e liberação de nutrientes da palhada de cana-de-açúcar em campo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 12, p. 2359-2362, 1999.
- PINTO, C. R. O.; NAHAS, E. Atividade e população microbiana envolvida nas transformações do enxofre em solos com diferentes vegetações Jaboticabal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 12, p. 1751-1756, 2002.
- SOUZA, T. L. de. **Eficiência agrônômica de fertilizantes nitrogenados, emissão de CO<sub>2</sub> e volatilização de NH<sub>3</sub> na cultura do milho**. 2015. 98 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2015.
- TISDALE, S. L.; NELSON, W. L.; BEATON, J. D.; HAVLIN, J. L. Soil and fertilizer sulphur, calcium and magnesium. In: **Soil fertility and fertilizers**. 5. ed. New York: MacMillan, 1993. p. 266-303.
- THE SULPHUR INSTITUTE. **Sulphur: Do Canada's crops get enough?** Washington, 1987. Snp. (Folheto)
- VILELA, H. Gesso e fosfato natural na recuperação de pastagens. In: ENCONTRO TÉCNICO SOBRE GESSO AGRÍCOLA. **Anais...** Belo Horizonte: Petrobras, 1986.
- VITTI, G. C. O enxofre do solo. In: BULL, L. T.; ROSOLEM, C. A. (Ed.). **Interpretação de análise química de solo e planta para fins de adubação**. Botucatu: Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais, 1989. p. 129-175.
- VITTI, G. C.; HEIRINCHS, R. Formas tradicionais e alternativas de obtenção e utilização do nitrogênio e do enxofre: uma visão holística In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S.; VITTI, G. C. **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2007. p. 110- 160.
- VITTI, G. C.; LIMA, E.; CICARONE, F. Cálcio, magnésio e enxofre. In: FERNANDES, M. S. (Org.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 300-322.
- VITTI, G. C.; LUZ, P. H. C.; MALAVOLTA, E.; DIAS, A. S.; SERRANO, C. G. E. **Uso do gesso em sistemas de produção agrícola**. Piracicaba: GAPE, 2008. 104 p.
- WAINWHIGHT, M. Sulfur oxidation in soils. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 37, p. 346-396, 1984.
- WATKINSON, J. H. Measurement of oxidation rate of elemental sulfur in soil. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v. 27, p. 365-375, 1989.
- WATKINSON, J. H.; BLAIR, G. J. Modeling the oxidation of elemental sulfur in soils. **Fertilizers Reseach**, Netherlands, v. 35, p. 115-126, 1993.