

A IMPORTÂNCIA DO ENXOFRE NA AGRICULTURA BRASILEIRA

Silvia Regina Stipp¹
Valter Casarin²

1. INTRODUÇÃO

Estima-se que o enxofre (S) seja o nono elemento mais abundante no planeta. Geralmente, pode ser encontrado como sulfetos, sulfatos e mesmo como S elementar. Depois do oxigênio e do silício, é o constituinte mais abundante dos minerais. Como S livre na natureza, ocorre principalmente em depósitos vulcânicos ou sedimentares. Encontra-se também nos carvões, petróleo e gás natural, sob a forma de compostos orgânicos.

O Brasil consome cerca de 1,6 milhão de toneladas anuais de S elementar, importando 90% desse total devido à pequena produção nacional.

O S é matéria-prima utilizada largamente na agricultura brasileira, que consome 53% da produção, seguida pelas indústrias químicas (47%). O consumo está diretamente relacionado à produção de ácido sulfúrico, que, por sua vez, é destinado em cerca de 70 a 80% para produção de ácido fosfórico e de fertilizantes. Outros importantes setores consumidores são os da produção de pigmentos inorgânicos, papel, celulose, borracha, explosivos e indústria açucareira e cosmética.

2. IMPORTÂNCIA DO ENXOFRE PARA AS PLANTAS

O S é reconhecido, junto com nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K), como um nutriente-chave necessário ao desenvolvimento das culturas.

O elemento participa de numerosos compostos, como aminoácidos e proteínas, coenzimas, sulfolipídeos, flavonóides, lipídeos, glucosinolatos, polissacarídeos, compostos não saturados, sulfóxidos, alcalóides, nucleotídeos, compostos reduzidos, entre outros. Junto com o N, o S está presente em todas as funções e processos que são parte da vida da planta, da absorção iônica aos papéis do RNA e DNA, inclusive controle hormonal para o crescimento e a diferenciação celular. Isto explica a existência de uma relação N/S (12/1 a 15/1) que está associada com o crescimento e a produção da planta. Por exercerem funções similares na planta, a clorose provocada pela falta de N é semelhante à causada pela deficiência de S; a diferença está no fato que a primeira ocorre nas folhas mais velhas e a segunda o faz nas mais novas, consequência da pouca mobilidade do S no floema (Figura 1).

Tanto a colheita (Tabela 1) quanto a qualidade do produto podem ser influenciadas pelo S. Assim, o S aumenta o teor de metionina nas proteínas dos cereais, melhorando sua qualidade nutritiva; aumenta a qualidade da farinha para panificação e o volume do pão; melhora o peso da semente e o índice micronaire (com-



Figura 1. Sintomas de deficiência de nitrogênio (A) e de enxofre (B) em sorgo.

Fonte: COELHO et al. (2002).

Tabela 1. Resposta de culturas brasileiras ao enxofre.

| Cultura | Aumento na produção (%) |
|----------------|-------------------------|
| Algodão | 37 |
| Arroz | 16 |
| Café | 41 |
| Cana-de-açúcar | 11 |
| Citros | 18 |
| Capim colômbio | 21 |
| Colza | 51 |
| Feijão | 28 |
| Milho | 21 |
| Repolho | 9 |
| Soja | 24 |
| Sorgo | 10 |
| Trigo | 26 |

Fonte: MALAVOLTA (1996).

plexo finura + maturidade) do algodão; em uso conjunto com o N, em forrageiras, ajuda a reduzir o teor de nitrato que, quando em excesso, é prejudicial ao animal; é responsável pelo sabor do aspargo e pelo odor da cebola e do alho; torna as hortaliças mais macias, com maior valor comercial; eleva a produção de colmos e o teor de sacarose na cana-de-açúcar (MALAVOLTA e MORAES, 2007).

Abreviações: CTA = capacidade de troca aniônica; DAP = diamônio fosfato, DNA = ácido desoxirribonucléico; MAP = monoamônio fosfato, RNA = ácido ribonucléico; RTA = resina trocadora de ânions.

¹ Engenheira Agrônoma, M.S., IPNI Brasil; e-mail: sstipp@ipni.net

² Engenheiro Agrônomo, Doutor, Diretor-Adjunto do IPNI Brasil; email: vcasarin@ipni.net

A Tabela 2 mostra as exigências comparadas de N, S e dos demais macronutrientes por algumas das principais culturas. De modo geral, pode-se dizer que as exigências de S são semelhantes às de P e de magnésio (Mg), embora em algumas espécies, como algodoeiro e cana-de-açúcar, a exigência de S seja maior que a de P.

O S é importante não somente como nutriente, mas também por seu papel no mecanismo de defesa da planta contra pragas e doenças. As plantas saudáveis contêm grande variedade de metabólitos secundários, muitos dos quais contendo N e S em sua estrutura. Esses compostos estão presentes seja em sua forma ativa biologicamente ou armazenados como precursores inativos, que são convertidos na forma ativa pela ação de enzimas em resposta ao ataque do patógeno ou da praga. Embora o uso do enxofre elementar (S^0) como fungicida seja muito antigo, pouco se sabe a respeito do modo como ele funciona. Recentemente foi demonstrado que a própria planta pode gerar S^0 endógeno como mecanismo de proteção contra o patógeno.

3. DINÂMICA DO ENXOFRE NOS SOLOS AGRICULTÁVEIS

A entrada de S no solo pode ocorrer por intemperismo de minerais sulfatados, águas da chuva e irrigação, deposição atmosférica (poeira), resíduos vegetais e animais, adições de fertilizantes minerais ou orgânicos e pesticidas. Por outro lado, as saídas deste elemento estão relacionadas a exportações pelas culturas, lixiviação, erosão, queimada e emissão de gases sulfurados (Figura 2). A incorporação ao solo de formas gasosas de S, pela deposição atmosférica ou pela dissolução na água da chuva, é variável entre

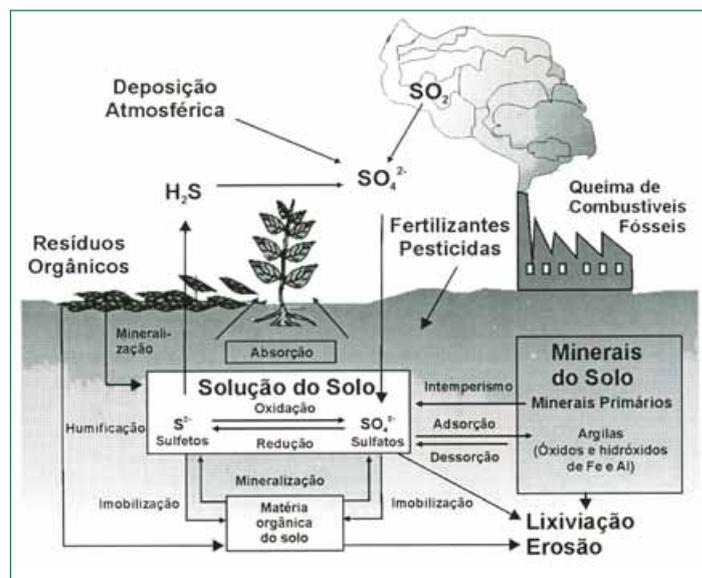


Figura 2. Formas e fluxos de enxofre no sistema solo-planta-atmosfera. Fonte: ALVAREZ V. et al. (2007).

regiões e apresenta maior importância nas proximidades de áreas urbanas e industriais (ALVAREZ V. et al., 2007).

Nos solos tropicais e subtropicais, o S está presente nas formas orgânica e inorgânica, sendo a primeira forma predominante, em geral constituindo mais de 90% do total. Isto é comprovado pelas altas correlações verificadas entre os teores de carbono orgânico ou N total e os teores de S total ou orgânico.

Tabela 2. Exigência de macronutrientes de algumas das principais culturas.

| Cultura | Parte da planta | Quantidade (t) | N P K Ca Mg S | | | | | |
|-----------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------|------|-----|-----|------|------|
| | | | ----- (kg) ----- | | | | | |
| Algodoeiro ² | Raízes | 0,5 (m.s.) ¹ | 6 | 0,2 | 3,0 | 1,0 | 0,7 | 0,8 |
| | Parte aérea vegetativa | 1,7 (m.s.) | 49 | 4 | 39 | 49 | 7 | 22 |
| | Parte aérea reprodutiva | 1,3 | 29 | 4 | 24 | 7 | 5 | 10 |
| Arroz ³ | Raízes | 1 | 20 | 3 | 60 | 4 | 2 | 2 |
| | Colmos | 2 | 15 | 3 | 12 | 12 | 1 | 3 |
| | Folhas | 2 | 15 | 1 | 6 | 2 | 4 | 1 |
| | Casca | 1 | 8 | 2 | 13 | 2 | 1 | 1 |
| | Grãos | 3 | 45 | 8 | 9 | 0,5 | 0,1 | 5 |
| Café ⁴ | Grãos | 0,06 | 1 | 0,06 | 1 | 0,2 | 0,1 | 0,08 |
| | Casca | 0,06 (m.s.) | 0,5 | 0,04 | 1 | 0,1 | 0,4 | 0,05 |
| Cana-de-açúcar ⁵ | Colmos | 100 | 90 | 10 | 65 | 60 | 35 | 25 |
| | Folhas | 25 | 60 | 10 | 90 | 40 | 17 | 20 |
| Laranja ⁶ | Frutos | 1 | 2 | 0,2 | 1,5 | 0,5 | 0,12 | 0,13 |
| Milho ⁷ | Grãos | 5 | 67 | 12 | 15 | 1 | 4 | 5 |
| | Colmo, folhas | 4,5 | 50 | 9 | 55 | 13 | 10 | 7 |
| Pastagens ⁸ | Gramíneas | 1 (m.s.) | 17 | 2 | 21 | 5 | 3 | 1 |
| | Leguminosas | 1 (m.s.) | 32 | 3 | 21 | 13 | 4 | 2 |
| Soja ⁹ | Caule, ramos e folhas | 5,6 (m.s.) | 29 | 2 | 34 | 43 | 20 | 2 |
| | Grãos | 2,4 | 152 | 11 | 43 | 8 | 6 | 4 |
| Trigo ⁷ | Grãos | 3 | 50 | 11 | 12 | 1 | 6 | 3 |
| | Palha | 3,7 | 20 | 9 | 27 | 6 | 3 | 5 |

¹ m.s. = matéria seca.

² MALAVOLTA et al. (1974); ³ MALAVOLTA e FORNASIERI FILHO (1983), FURLANI et al. (1977); ⁴ MALAVOLTA et al. (1963);

⁵ MALAVOLTA (1982); ⁶ BATAGLIA et al. (1977); ⁷ GARMAN (1967); ⁸ GALLO et al. (1974); ⁹ BATAGLIA e MASCARENHAS (1982).

Fonte: adaptada de MALAVOLTA e MORAES (2007).

Os minerais primários, especialmente sulfetos metálicos de Fe, Zn, Cu, Ca e Mg, e o gesso são as fontes originais do S no solo. O intemperismo destas fontes, com a ocorrência de processos físicos, químicos e biológicos, origina outros compostos ou formas de S que são utilizados por outros microrganismos ou plantas.

As transformações de S no solo são controladas por processos bióticos e abióticos. As transformações bióticas estão relacionadas aos processos de mineralização, imobilização, oxi-redução e assimilação de S pela planta, enquanto os processos abióticos ocorrem em função de adsorção, desorção, precipitação e dissolução do S inorgânico. A importância relativa de cada processo depende de fatores como temperatura do solo, pH, umidade, quantidade e tipos de argilominerais, óxidos de ferro e alumínio, conteúdos de carbono e N (NORMAN et al., 2002).

Em condições aeróbicas, o ânion SO_4^{2-} é a forma mineral de S predominantemente encontrada no solo e também a principal forma do elemento absorvida pelas plantas. A população microbiana, ao decompor compostos orgânicos com baixa relação C/S, disponibiliza o SO_4^{2-} por mineralização para a solução do solo. Entretanto, em materiais orgânicos com elevada relação C/S, os decompositores necessitam de uma quantidade maior de S para incorporar em sua biomassa. Dessa forma, o S inorgânico do solo é imobilizado, tornando-se temporariamente indisponível às plantas, semelhantemente ao que ocorre com o N. Em solos mal drenados, com baixa difusão de oxigênio, as formas reduzidas de S são as que predominam, tais como dióxido de S (SO_2), sulfito (SO_3^{2-}), tiosulfato ($\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$), S elementar (S_0) e sulfeto (S^{2-}).

As plantas, embora aptas a absorverem S via foliar, obtêm a maior parte desse elemento via radicular. Grande parte do S encontrado nas células é absorvida da solução do solo como SO_4^{2-} . O S é transportado até o sistema radicular principalmente por fluxo de massa. O ânion SO_4^{2-} na solução do solo também pode ser adsorvido pelos colóides inorgânicos do solo.

Solos argilosos com altos teores de óxidos de ferro apresentam grande capacidade de adsorção de SO_4^{2-} , o que diminui a sua movimentação no perfil do solo. Já em solos arenosos a movimentação do SO_4^{2-} é maior e, com isso, este pode ser perdido por percolação. Além disso, solos arenosos possuem baixos teores de matéria orgânica, conseqüentemente, menores reservas de S orgânico.

Atualmente, o S está se tornando um nutriente limitante na produção das culturas, muito mais do que no passado (SALES, 2007). As razões para esse aumento na necessidade incluem:

- Baixo teor nos solos tropicais, principalmente Oxisolos (Latosolos) e Ultissolos (Podzólicos distróficos);
- Maior produtividade das culturas, que requerem mais S;
- Aumento no uso de adubos concentrados que contém pouco ou nenhum S;
- Redução nas quantidades de S atmosférico providas da chuva, devido ao menor consumo de combustíveis fósseis;
- Redução das reservas de S do solo com as perdas de matéria orgânica devido à mineralização e à erosão;
- Menor consumo de pesticidas com S.

Além disso, o SO_4^{2-} enfrenta três fatores que dificultam a sua permanência na camada superficial do solo, quais sejam:

- Presença de maiores teores de matéria orgânica, que reduzem a adsorção por óxidos e aumentam a carga negativa do solo, portanto repelindo sulfatos;

- Uso da calagem, que aumenta o número de cargas negativas do complexo de troca do solo, o que resulta em maior repulsão dos íons sulfato e seu deslocamento no perfil;
- Os fosfatos aplicados em adubações ocupam preferencialmente as posições de troca que seriam ocupados por sulfatos.

Porém, os menores teores de matéria orgânica a 20-40 cm de profundidade, aliados aos teores de óxidos de ferro encontrados nos Latossolos, podem resultar em predomínio de cargas positivas e favorecer a retenção do ânion sulfato (NOGUEIRA e MELO, 2003).

4. DIAGNÓSTICO DA NECESSIDADE DE ADUBAÇÃO

O sucesso da recomendação de adubação sulfatada depende, principalmente, do diagnóstico da fertilidade do solo e da nutrição da planta que deve ser um processo criterioso, com base nos resultados da análise física e química do solo, para identificar a disponibilidade do nutriente no solo, e da diagnose foliar, que indica a absorção do elemento pela planta.

4.1. Análise de solo

Para determinar corretamente a necessidade de S, deve-se fazer a análise de solo em duas profundidades, 0 a 20 cm e 20 a 40 cm, devido à mobilidade do nutriente no solo e o seu acúmulo em subsuperfície.

Diferentes métodos de extração de S do solo são adotados no Brasil, associados a distintos níveis críticos ou faixas de suficiência, dependendo das formas do elemento avaliadas, da profundidade de amostragem recomendada e da espécie vegetal e das características físico-químicas dos solos com os quais foi realizado o trabalho de correlação e calibração dos métodos de análise do S disponível. A Figura 3 é uma tentativa de calibração de S- SO_4^{2-} no solo com dados da produção no campo. O extrator usado foi o fosfato de cálcio em ácido acético. Os resultados sugerem um nível crítico próximo de 10 mg dm^{-3} de S, isto é, valor acima do qual não haveria resposta à adição de S como adubo. Outros valores tem sido sugeridos no Brasil (MALAVOLTA, 2006).

A Tabela 3 apresenta as diversas interpretações dos resultados de S disponível no solo utilizada por pesquisadores em distintas regiões do país.

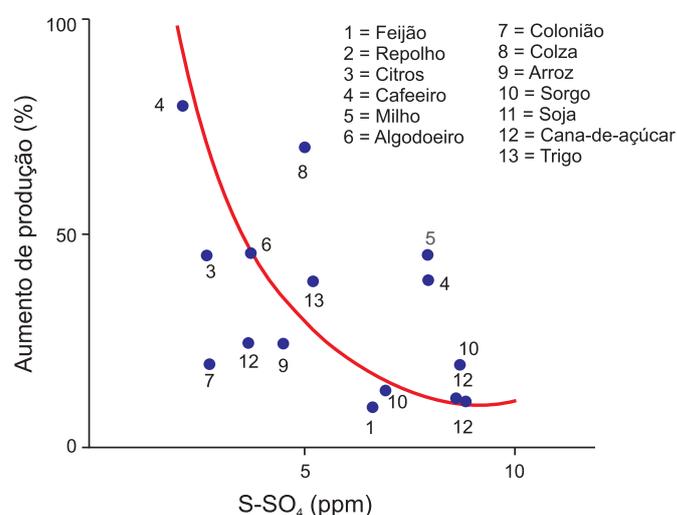


Figura 3. Relação entre aumento na produção devido à adição de enxofre e teor de enxofre disponível no solo. Resultados de 30 ensaios conduzidos em São Paulo, Goiás, Minas Gerais e Paraná.

Fonte: MALAVOLTA (2006).

Tabela 3. Interpretação dos resultados de enxofre disponível do solo.

| Extrator | Disponibilidade de S | | | | Fonte |
|--|----------------------|----------|-----------|--------|------------------------------------|
| | Muito baixa | Baixa | Média | Alta | |
| ----- mg dm ⁻³ ----- | | | | | |
| NH ₄ Oac 0,5 mol L ⁻¹ em HOAc 0,25 mol L ⁻¹ | < 5 | 5,1 a 10 | 10,1 a 15 | > 15 | Vitti (1989) |
| NH ₄ Oac 0,5 mol L ⁻¹ em HOAc 0,25 mol L ⁻¹ | - | < 25,8 | - | > 25,8 | Caires et al. (2002) ^a |
| Ca(H ₂ PO ₄) ₂ 0,01 mol L ⁻¹ | < 2,5 | 2,6 a 5 | 5,1 a 10 | > 10 | Vitti (1989) |
| Ca(H ₂ PO ₄) ₂ 0,01 mol L ⁻¹ | - | < 4 | 5 a 10 | > 10 | Raij et al. (1996) |
| Ca(H ₂ PO ₄) ₂ 0,01 mol L ⁻¹ | - | < 4 | 5 a 9 | > 10 | Rein e Sousa (2004) |
| Ca(H ₂ PO ₄) ₂ 0,01 mol L ⁻¹ | - | < 5 | 5 a 10 | > 10 | Tecnologias... (2004) ^b |
| Ca(H ₂ PO ₄) ₂ 0,01 mol L ⁻¹ | - | < 20 | 20 a 35 | > 35 | Tecnologias... (2004) ^c |
| Ca(H ₂ PO ₄) ₂ 0,01 mol L ⁻¹ | - | < 2 | 2 a 3 | > 3 | Tecnologias... (2004) ^d |
| Ca(H ₂ PO ₄) ₂ 0,01 mol L ⁻¹ | - | < 6 | 6 a 9 | > 9 | Tecnologias... (2004) ^e |
| Ca(H ₂ PO ₄) ₂ 500 mg L ⁻¹ de P | - | < 2 | 2 a 5 | > 5 | CQFS-RS/SC (1994) |

^a Nível crítico estabelecido para a cultura de trigo.

^{b,c} Valores indicam, respectivamente, faixas de teores de S nas profundidades de 0 a 20 cm e 20 a 40 cm, em solos com > 40% de argila.

^{d,e} Valores indicam, respectivamente, faixas de teores de S nas profundidades de 0 a 20 cm e 20 a 40 cm, em solos com < 40% de argila.

Fonte: ALVARES V. et al. (2007).

Segundo Alvarez V. et al. (2007), em geral, a quantidade requerida de S pelas plantas aproxima-se da exigência nutricional em P, podendo, em algumas culturas, até superá-la; entretanto, na adubação com P e com S, para se obter uma adequada disponibilidade dos nutrientes para as plantas, deve-se aplicar doses maiores de P do que de S, especialmente em solos argilosos, pois estes tendem a apresentar maior capacidade de adsorção de P do que de S.

De acordo com Alvarez V. et al. (1999), a interpretação do teor de S disponível para culturas de ciclo curto é feita considerando-se as classes de fertilidade estabelecidas de acordo com a concentração de P remanescente. Para a fase de implantação de culturas perenes, é necessário que a fertilidade do solo no local do transplante ou semeadura seja maior. Assim, os teores de nutrientes devem ser maiores do que aqueles citados na Tabela 3 em pelo menos três vezes. Por outro lado, a fertilidade média para manutenção de povoamentos florestais deve ser 0,6 vez aqueles valores; para outras culturas perenes, 0,8 vez e, para hortaliças, duas vezes.

4.2. Diagnose foliar

A folha é, como regra geral, o órgão que melhor indica o estado nutricional da planta e permite avaliar, de forma indireta, a fertilidade do solo e a eventual necessidade de adubo. A folha usada para a diagnose, bem como a faixa de teores foliares considerada adequada, varia de acordo com a espécie vegetal e com diversos fatores, a saber: época e procedimento de coleta de amostras, potencial produtivo da lavoura e eficiência varietal. Informações sobre a amostragem para diagnose do estado nutricional das principais culturas podem ser encontradas, entre outros, em Mills e Jones Junior (1996), Malavolta et al. (1997) e Raij et al. (1996).

Na Tabela 4 são encontrados valores de níveis críticos de S, bem como de outros macronutrientes, para as principais culturas.

Atualmente, a utilização do sistema integrado de diagnose e recomendação (DRIS) tem se mostrado eficiente para a avaliação do estado nutricional da planta. Os métodos diagnósticos bioquímicos ainda são pouco utilizados pelos produtores, sendo às vezes adotados em trabalhos de pesquisa específicos.

5. FONTES DE ENXOFRE

Os fertilizantes sulfatados podem ser simples ou compostos, com teores variáveis de S.

Tabela 4. Níveis de macronutrientes nas folhas das principais culturas brasileiras.

| Cultura | N | P | K | Ca | Mg | S |
|----------------------|-------|---------|-------|---------|---------|---------|
| | | | | | | |
| Algodoeiro | 45-50 | 2,5-4,0 | 21-24 | 30-35 | 4-5 | 5-6 |
| Amendoim | 40 | 2 | 15 | 20 | 3 | 2,5 |
| Arroz | 26-42 | 2,5-4,8 | 15-40 | 2,5-4,0 | 1,7-3,0 | 2,6 |
| Batatinha | 30 | 3,5 | 50 | 20 | 7,5 | 3,5 |
| Cacaueiro | 20 | 2 | 20 | 4 | 4 | 3 |
| Cafeeiro | | | | | | |
| Arabica | 26-31 | 1,5-1,9 | 19-24 | 15-18 | 3,6-4,0 | 2,1-2,4 |
| Conilon ¹ | 30-32 | 1,2-1,4 | 18-20 | 15-18 | 3,0-3,5 | 1,5-2,0 |
| Cana-de-açúcar | 19-21 | 2,0-2,4 | 11-13 | 8-10 | 2-3 | 2-3 |
| Eucalipto | 21-23 | 1,3-1,4 | 9-10 | 5-6 | 2,5-3,0 | 1,5-2,5 |
| Feijão | 52-54 | 4-6 | 15-35 | 15-25 | 4-8 | 5-10 |
| Fumo | 35-40 | 2-3 | 40-50 | 15-20 | 4-8 | 4-6 |
| Gramíneas forrag. | 11-18 | 0,6-1,2 | 11-18 | 2-4 | 1,2-2,3 | 1,1-1,8 |
| Laranjeira | 24-26 | 1,2-1,7 | 10-14 | 35-40 | 2-3 | 2,0-2,5 |
| Leguminosas forrag. | 26-35 | 4-15 | 27-50 | 21-37 | 4-7 | 1-4 |
| Mamoneira | 40-50 | 3-4 | 30-40 | 15-25 | 2,5-3,5 | 3,4 |
| Mandioca | 51-58 | 3-5 | 13-20 | 7,5-8,5 | 2,9-3,1 | 2,6-3,0 |
| Milho | 28-35 | 2,5-4,0 | 17-30 | 21-50 | 2,1-4,0 | 1,0-2,4 |
| Soja | 55-58 | 4-5 | 22-25 | 9-10 | 3,5-4,0 | 2,5-3,0 |
| Pinus | 12-13 | 1,4-1,6 | 10-11 | 3-5 | 1,5-2,0 | 1,4-1,6 |
| Tomateiro | 27 | 5 | 29 | 12 | 4 | 3 |
| Trigo | 30-33 | 2-3 | 25-35 | 14 | 4 | 4 |

¹ Dados do Eng. Agr. J. Sebastião de Oliveira (1994) relativos a 750 lavouras, com média de 60 sacas ha⁻¹.

Fonte: MALAVOLTA (2006).

5.1. Fertilizantes simples

As fontes mais comuns de fertilizantes sulfatados simples têm o elemento na forma de sulfato: sulfato de amônio, superfosfato simples, gesso (natural ou agrícola), sulfato de potássio e diversas combinações, especialmente de fertilizantes nitrogenados (uréia, nitrato de amônio) com fertilizantes contendo sulfato (Tabela 5).

O sulfato de amônio é uma boa opção para adição de S nas fertilizações do solo. O S contido neste fertilizante está prontamente disponível para as plantas, pois encontra-se na forma de sulfato (SO_4^{2-}). Para as culturas que demandam adubação nitrogenada em cobertura, o sulfato de amônio oferece algumas vantagens, sendo um produto que perde pouco N por volatilização, além de excelente garantia de S.

O superfosfato simples é um produto de alta solubilidade em água e alta eficiência agrônômica. Uma grande vantagem do superfosfato simples é a presença de Ca e S na forma de sulfato de cálcio (gesso), o que possibilita, ao longo do tempo, a melhoria das condições subsuperficiais do solo. Isso porque contribui para a redução do alumínio (Al) tóxico e proporciona condições favoráveis para o enraizamento das plantas. Práticas de calagem e utilização de superfosfato simples como fonte de P e S tem sido considerada uma excelente forma de adubação para diversas culturas (OLIVEIRA, 2007).

O gesso é um sal neutro e, como tal, não afeta diretamente a reação do solo em termos de pH. Tem como função diminuir a saturação por Al e aumentar os teores de Ca e S em profundidade. A

solubilidade do gesso, que é dependente da sua granulometria, é um fator de suma importância quando empregado como fonte de Ca e de S para as plantas. Mesmo sendo considerada uma fonte alternativa de S para as culturas, a aplicação de gesso, entretanto, deve ser feita com cautela, sempre associada com doses elevadas de calcário, para não provocar desequilíbrio de bases na camada arável, por perdas de Mg e K (QUAGGIO et al., 1982).

O S elementar é uma fonte bastante usada em alguns países e recentemente tem despertado interesse no Brasil. Este se destaca dos sais de sulfato por ter baixa solubilidade e por conter alta concentração de S (> 85%), comparada com 12% do superfosfato simples e 24% do sulfato de amônio. O S elementar não é prontamente disponível e sua utilização pelas plantas depende de sua oxidação a sulfato, realizada principalmente por microrganismos do solo. Além da alta concentração, o atrativo do S elementar é seu custo relativamente baixo, permitindo formulações com altos teores de N, P, ou K (CANTARELLA et al., 2007).

O sulfato de potássio é um fertilizante necessário ao bom rendimento de culturas sensíveis ao cloro e para as culturas exigentes em S e K, particularmente fumo, chá e café. Dentre os fertilizantes potássicos, o sulfato de potássio tem o menor índice de salinidade. Assim, entre outros usos, é recomendado para os sistemas hidropônicos em casa de vegetação e em condições de solos naturalmente salinos.

O sulfato de potássio e magnésio é indicado, também, para plantas sensíveis ao cloro e que requerem altas doses de fertilizantes, bem como para culturas que demandam altas quantidades de K e Mg. Sua rápida solubilização o torna vantajoso para todas as culturas, notadamente as de ciclo curto, e em áreas com limitação de chuva e irrigação.

Tabela 5. Fontes de fertilizantes contendo enxofre.

| Material fertilizante | Fórmula química | Teor de S (%) |
|---|--|---------------|
| Fontes comuns | | |
| Sulfato de amônio (PS _{20°C} = 75,4) | (NH ₄) ₂ SO ₄ | 24 |
| Superfosfato simples | Ca(H ₂ PO ₄) ₂ + 2CaSO ₄ .2H ₂ O | 12 |
| Gesso agrícola | CaSO ₄ .2H ₂ O | 15 - 18 |
| Enxofre elementar | S | > 85 |
| Sulfato de potássio | K ₂ SO ₄ | 18 |
| Sulfato de potássio e magnésio | K ₂ SO ₄ .2MgSO ₄ | 22 |
| Sulfato de magnésio (epsomita) | MgSO ₄ .7H ₂ O | 13 |
| Tiosulfato de amônio | (NH ₄) ₂ S ₂ O ₃ .5H ₂ O | 26 |
| Polissulfeto de amônio | (NH ₄) ₂ S _x | 40 |
| Kieserita | MgSO ₄ .H ₂ O | 20 |
| Outras fontes | | |
| Sulfonitrato de amônio ¹ | | 6 |
| Nitrosulfato de amônio ² | | 15 |
| Uréia + sulfato de amônio ³ | | 12 |
| Uréia revestida com S elementar | | 10 - 30 |
| Sulfuran ⁴ | | 4 |
| Fosfossulfato de amônio ⁵ | | 14 - 20 |
| Resíduos orgânicos de indústria | | |
| Ajifer | | 3 |
| Vinhaça | | 0,13 |

¹ Mistura de 75% de nitrato de amônio + 50% de sulfato de amônio.

² Mistura de 50% de nitrato de amônio + 50% de sulfato de amônio.

³ Mistura de 50% de uréia + 50% de sulfato de amônio.

⁴ Mistura de uran + sulfato de amônio.

⁵ Mistura de amônia anidra e ácido fosfórico e sulfúrico, devendo conter no mínimo 13% de N, 20% de P₂O₅ e 12% de S.

Fonte: Modificada de VITTI et al. (2007).

5.2. Fertilizantes compostos

Nos fertilizantes NPK, o teor de S varia, geralmente, entre 1% e 10%. Nestes fertilizantes, quanto menor for a concentração de N, P e K, maior a possibilidade de aumento do teor de S na fórmula. Por exemplo, uma fórmula 02-20-20, sem carga (enchimento), tem ao redor de 5% de S. Já uma fórmula 05-25-25 terá uma concentração de S ao redor de 1%. Isto ocorre devido à composição destes produtos: fertilizantes com baixa concentração de NPK tendem a conter, em grandes quantidades, como fonte de P, o superfosfato simples, o que aumenta o teor de S. Fórmulas mais concentradas em NPK tendem a conter como fontes de P o monoamônio fosfato (MAP), o diamônio fosfato (DAP) e o superfosfato triplo, que têm baixas concentrações de S. Porém, a utilização de fórmulas com menor concentração em NPK, que têm maiores teores de S, indicadas para solos deficientes do nutriente, acarreta aumento de custo para o produtor, já que este transporta, armazena e aplica produtos com menor concentração de NPK.

Uma alternativa para a continuidade do uso de fórmulas de alta concentração em NPK é o fornecimento do S na forma elementar. O uso do S elementar requer que o produto apresente partículas de dimensões finas para aumentar a eficiência de ação dos microrganismos do solo. Partículas bastante finas de S elementar têm sido usadas mistura-

das ou recobrando fertilizantes. A eficiência agrônômica de tais fertilizantes é tanto maior quanto mais expostas à ação dos microrganismos estiverem as partículas de S. Para isso, o modo como o S elementar é veiculado pode ser importante. Observou-se, por exemplo, que quando o S apenas revestiu as partículas de superfosfato triplo, sua eficiência foi menor do que a observada com a incorporação do elemento ao adubo (HOROWITZ, 2003).

Poucas pesquisas sobre o uso do S elementar têm sido realizadas no Brasil. Embora novas pesquisas sobre o tema sejam necessárias, existe grande expectativa para a fabricação de fertilizantes granulados que contenham S elementar, possibilitando a obtenção de fórmulas com altas concentrações em NPK e em S.

6. RECOMENDAÇÃO DE ADUBAÇÃO SULFATADA

De acordo com Osorio Filho (2006), a recomendação de fertilizantes sulfatados apresenta grande complexidade em função dos inúmeros fatores que controlam a dinâmica do S no solo. Alguns fatores que influem na resposta são: contribuição das chuvas e das irrigações como veículo de deposição do S atmosférico, ciclagem do S através de plantas de cobertura com sistema radicular bem desenvolvido e fluxo ascendente de sulfato em períodos de balanço hídrico negativo.

As recomendações de adubação devem considerar vários fatores regionais, específicos para a cultura a ser instalada, nível de produtividade esperada, grau de tecnificação do produtor, qualidade dos fertilizantes e aspectos sócioeconômicos. Assim, por exemplo, para feijoeiro, as recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo levam em consideração a meta de produtividade esperada e a época de semeadura (Rajj et al., 1996). Já para Minas Gerais, as recomendações de adubação são feitas considerando teores dos nutrientes no solo e os níveis de tecnologia adotados, correspondentes às produtividades esperadas (CFSEMG, 1999).

Nas recomendações típicas de S as doses variam de 20 a 40 kg ha⁻¹, como sugerem Vitti et al. (1988), mas podem chegar a 50 kg ha⁻¹, dependendo da cultura, do manejo e do teor do elemento no solo.

Para cana-de-açúcar, por exemplo, Vitti et al. (1992) concluíram que doses de 30 kg ha⁻¹ de S para a cana-planta e de 15 kg ha⁻¹ de S para soqueiras foram suficientes para alcançar a produção máxima de colmos, usando sulfato de amônio, gesso ou sulfato duplo de magnésio e potássio. Por outro lado, Demattê (2005), em revisão sobre adubação da cana-de-açúcar, mencionou que 60 kg ha⁻¹ de S são suficientes para todo o ciclo da cultura.

Em solos de cerrado, Rein e Sousa (2004) recomendam para culturas anuais, perenes na fase de produção, ou pastagens adubadas anualmente, doses de 30 e 15 kg ha⁻¹ de S em solos de baixa e média disponibilidade de S (na camada de 0-40 cm), respectivamente, ou uma aplicação única de pelo menos 100 kg ha⁻¹ de S para suprir as culturas neste nutriente por vários anos. No plantio de culturas perenes, ou no estabelecimento de pastagens consorciadas, em solos com baixa disponibilidade do nutriente, sugere-se a aplicação de, no mínimo, 50 kg ha⁻¹ de S.

A aplicação de S na semeadura pode dispensar a cobertura, e a disponibilização do S às culturas pode ocorrer pela ciclagem, via matéria orgânica, ou pela capacidade de troca aniônica (CTA) do solo, ou pelo uso de formas menos solúveis, como gesso agrícola.

6.1. Formas de aplicação

O S pode ser aplicado em faixas ou a lanço, ou por meio do sistema de irrigação (sulco e aspersão).

Vitti e Heirinchs (2007) sugerem vários manejos, de acordo com as diferentes fontes de fertilizantes sulfatados disponíveis no mercado:

6.1.1. Aplicação em pré-plantio (área total)

- Gesso agrícola
- Fosfato reativo + superfosfato simples
- Óxido de cálcio e óxido de magnésio + gesso agrícola.

6.2.2. Aplicação no sulco de plantio

• Fontes nitrogenadas: sulfato de amônio, misturas de fertilizantes nitrogenados.

Quanto às doses, ficam as seguintes sugestões:

- Culturas anuais: 30 kg ha⁻¹ S.
- Culturas perenes: 30 a 40 kg ha⁻¹ S.
- Cana-de-açúcar: 50 kg ha⁻¹ S por corte.
- Pastagens: 20 a 30 kg ha⁻¹ S.
- Hortaliças: 40 a 50 kg ha⁻¹ S.
- Reflorestamento: 30 kg ha⁻¹ S.

Essas doses se referem à aplicação localizada das fontes. Quando a aplicação é realizada em área total, deve-se utilizar aproximadamente o dobro da dose de S, verificando-se, também, o seu efeito residual.

6.2. Gessagem

O uso eficiente do gesso agrícola em regiões de subsolos ácidos requer uma correta diagnose baseada em critérios químicos que levem às recomendações seguras das doses a serem aplicadas.

Diversos trabalhos recomendam a amostragem da camada de 30 a 50 cm para a determinação da dose adequada de gesso agrícola. Os critérios, nesses casos, se aproximam bastante daqueles sugeridos por Lopes (1986): teores de Ca < 0,4 cmol_c dm⁻³ e/ou de Al > 0,5 cmol_c dm⁻³ e/ou saturação por Al da CTC efetiva (valor m) > 30%.

Quanto às dosagens, sugere-se, para os solos de cerrado, o uso da seguinte expressão simplificada (SOUSA et al., 1992):

Necessidade de gesso (kg ha⁻¹) = 50 x % de argila

Esta expressão é válida para culturas anuais, considerando-se a camada de 20 a 60 cm como suficiente para a atividade do sistema radicular. Para culturas perenes, a camada considerada seria de 20 a 80 cm, sendo a dose acima multiplicada por 1,5.

O ponto relevante a ser considerado quanto à avaliação da melhor dose a ser utilizada é o monitoramento das análises de solo em profundidade, para que se possa avaliar a redistribuição de cálcio no perfil do solo.

7. OUTRAS CONSIDERAÇÕES IMPORTANTES

Para aumentar a eficiência do uso de fertilizantes contendo S na agricultura brasileira, Lopes e Guilherme (2000) recomendam levar em conta os seguintes aspectos:

a) **Análise de solos.** Embora a grande maioria dos trabalhos de calibração envolvendo métodos de extração de S tenham sido desenvolvidos em casa de vegetação, um nível crítico em torno de 10 mg dm⁻³ de S-SO₄²⁻, extraído com Ca (H₂PO₄)₂·2H₂O – 500 mg L⁻¹ de P, parece ser uma aproximação razoável. O que é relevante em relação à análise de solos é que a avaliação deste parâmetro não deve se restringir apenas à camada superficial (0 a 20 cm). Face à movimentação do S para as camadas subsuperficiais, as camadas de 20 a 40 cm e 40 a 60 cm também devem ser amostradas e submetidas a determinações de S-SO₄²⁻.

b) **Textura e matéria orgânica.** Solos arenosos e com baixos teores de matéria orgânica são os mais prováveis de apresentar deficiências de S. Esta predisposição é ainda mais acentuada em áreas sujeitas a queimadas anuais, como a região dos cerrados brasileiros com pastagens nativas.

c) **Necessidades das culturas.** Embora haja variação da necessidade de S entre as várias culturas, as leguminosas produtoras de grãos alimentícios (feijão, soja, ervilhas), as plantas produtoras de sementes oleaginosas e as crucíferas são as mais exigentes.

d) **Teor de S na água de irrigação.** Em certas condições de agricultura intensiva sob irrigação, a contribuição do teor de S na água pode atingir níveis elevados. O conhecimento desse teor e a possível contribuição para manter níveis adequados no solos devem ser levados em consideração.

e) **Relação N:S.** A existência de uma relação N:S aproximadamente rígida nas proteínas leva à necessidade de um adequado balanço na nutrição das plantas quanto a estes elementos. Níveis adequados de adubação nitrogenada, sob baixos teores de S no solo, podem levar ao acúmulo de formas não protéicas de N, resultando em ineficiente utilização dos fertilizantes nitrogenados e baixa qualidade dos produtos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Há pouco mais de 50 anos o S deixou de ser o elemento esquecido no Brasil. Tornou-se conhecida a necessidade das principais culturas e foram identificados os sintomas de carência. Multiplicaram-se os resultados e observações práticas mostrando o efeito no aumento de produção devido à sua presença nas formulações. As análises de solo demonstraram e demonstram que níveis baixos de S são frequentes em solos brasileiros (Malavolta, comunicação pessoal). Porém, freqüentemente a adubação com S é negligenciada, em relação à preocupação com o N e o P.

Programas de adubação que visam altas produtividades devem considerar, além das necessidades de S da cultura, a reciclagem dos resíduos orgânicos. Deve-se observar que a disponibilidade de S, a curto prazo, está ligada principalmente à quantidade e ao tipo de resíduos culturais, os quais dependem do sistema de sucessão/rotação de culturas empregado, enquanto, a longo prazo, a disponibilidade de S está mais relacionada ao sistema de preparo do solo.

Outro ponto importante a considerar é a necessidade de ampliar a base de conhecimentos sobre o uso do gesso como fonte de S. Isso contribuirá para o aproveitamento, de forma técnica e econômica, das milhões de toneladas de gesso agrícola acumuladas, decorrentes da fabricação do ácido fosfórico, o que ainda constitui um grande desafio.

REFERÊNCIAS

ALVAREZ V., V. H.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; CANTARUTTI, R. B.; LOPES, A. S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (Eds.). **Recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais – 5ª aproximação.** Viçosa, 1999. p. 25-32.

ALVAREZ V., V. H.; ROSCOE, R.; KURIHARA, C. H.; PEREIRA, N. de F. Enxofre. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; BARROS, N. F. de; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Eds.). **Fertilidade do solo.** Viçosa: SBCS, 2007. p. 595-644.

CAIRES, E. F.; FELDHAUS, I. C.; BARTH, G.; GARBUIO, F. J. Lime and gypsum application on the wheat crop. **Sciencia Agricola**, v. 59, p. 357-364, 2002.

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. (Eds.). **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira.** Piracicaba: IPNI, 2007. p. 355-412.

CFSEMG. COMISSÃO DE FERTILIDADE DE SOLOS DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **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. 359 p.

COELHO, A. M.; WAQUIL, J. M.; KARAM, D.; CASELA, C. R.; RIBAS, P. M. Seja o doutor do seu sorgo. **Informações Agronômicas**, n. 100, 2002. (Arquivo do Agrônomo, 14)

CQFS-RS/SC. Comissão de Química e Fertilidade do Solo. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina.** Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004. 400 p.

DEMATTÊ, J. L. I. Cultura da cana-de-açúcar – recuperação e manutenção da fertilidade dos solos. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 111, Setembro 2005. 24 p. (POTAFOS. Encarte técnico).

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

LOPES, A. S. Calagem e gesso agrícola. In: ENCONTRO TÉCNICO SOBRE GESSO AGRÍCOLA. Belo Horizonte: [s.n.], 1986.

LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G. **Uso eficiente de fertilizantes e corretivos agrícolas: aspectos agronômicos.** 3ª edição revisada e atualizada. São Paulo: ANDA, 2000. 72 p. (ANDA, Boletim Técnico, 4)

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas.** São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 2006. 638 p.

MALAVOLTA, E. **Nutri-Fatos: informação agronômica sobre nutrientes para as culturas.** Piracicaba: POTAFOS, 1996. p. 11-12. (Arquivo do agrônomo, n.10)

MALAVOLTA, E.; MORAES, M. F. Fundamentos do nitrogênio e do enxofre na nutrição mineral das plantas cultivadas. In: YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S.; VITTI, G. C. (Eds.). **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira.** Piracicaba: IPNI, 2007. p. 189-249.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações.** 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.

MILLS, H. A.; JONES JUNIOR, J. B. **Plant analysis handbook II.** Athens: Micromacro Publishing, 1996. 422 p.

NOGUEIRA, M. A.; MELO, W. J. Enxofre disponível para a soja e atividade da arilsulfase em solo tratado com gesso agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 655-663, 2003.

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.

OLIVEIRA, M. A. de. **A importância do enxofre para as culturas.** Boletim Informativo, Serrana Fertilizantes, jun/jul 2007.

OSORIO FILHO, B. D. **Dinâmica de enxofre no sistema solo e resposta das culturas à adubação sulfatada.** 75 p. 2006. Tese (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, RS, 2006.

QUAGGIO, J. A.; DECHEN, A. R.; RAIJ, B. van. Efeitos da aplicação de calcário e gesso sobre a produção de amendoim e lixiviação de bases no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 6, p. 189-194, 1982.

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

REIN, T. A.; SOUSA, D. M. G. Adubação com enxofre. In: SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (Eds.). **Cerrado: correção do solo e adubação.** 2 ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2004. p. 227-244.

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

SOUSA, D. M. G. de, REIN, T. A.; LOBATO, E.; RITCHEY, K. D. Sugestões para diagnose e recomendação de gesso em solos de cerrado. In: SEMINÁRIO SOBRE O USO DE GESSO NA AGRICULTURA, 2., Uberaba, 1992. São Paulo: IBRAFOS, 1992. p. 139-158.

TECNOLOGIAS de produção de soja – região central do Brasil – 2005. Londrina: Embrapa Soja; Embrapa Cerrados; Embrapa Agropecuária Oeste; Fundação Meridional, 2004. 239 p. (Sistema de Produção. Embrapa Soja, 6)

VITTI, G. C. **Avaliação e interpretação do enxofre no solo e na planta.** Jaboticabal: FUNEP, 1989. 37 p.

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. (Eds.). **Nitrogênio e enxofre na agricultura brasileira.** Piracicaba: IPNI, 2007. p. 109-160.

VITTI, G. C.; MALAVOLTA, E.; FERREIRA, M. E. Respostas de culturas anuais e perenes à aplicação de enxofre. In: BORKERT, C. M.; LANTMANN, A. F. (Ed.). **Enxofre e micronutrientes na agricultura brasileira.** Londrina: EMBRAPA/CNPSo/IAPAR/SBCS, 1988. p. 61-85.

VITTI, G. C.; MAZZA, J. A.; PEREIRA, H. S.; DEMATTÊ, J. L. I. Resultados experimentais do uso de gesso na agricultura – cana-de-açúcar. In: SEMINÁRIO SOBRE O USO DO GESSO NA AGRICULTURA, 2., 1992, Uberaba. **Anais...** Uberaba: Instituto Brasileiro do Fosfato, 1992. p. 191-224.