

Resposta de culturas à aplicação de enxofre e a teores de sulfato num solo de textura arenosa sob plantio direto

Crop responses for sulphur application and sulfate levels in a sandy soil under no-tillage

Danilo dos Santos Rheinheimer¹ Jimmy Walter Rasche Alvarez² Benjamin Dias Osorio Filho³
Leandro Souza da Silva¹ Edson Campanhola Bortoluzzi⁴

RESUMO

A quantidade total de enxofre é menor em solos com baixos teores de argila e matéria orgânica e a disponibilidade de sulfato da camada superficial do solo às plantas é diminuída pela aplicação de calcário e de fertilizantes fosfatados em superfície no plantio direto. O objetivo do presente trabalho foi avaliar a resposta de algumas culturas à aplicação de enxofre e os teores de sulfato num solo com textura superficial arenosa sob plantio direto. Um experimento em esquema de subparcelas em blocos ao acaso e com quatro repetições foi instalado a campo sobre um Argissolo Vermelho distrófico arênico. Nas parcelas principais, foram adicionadas quatro doses de SO_4^{2-} (0, 15, 30 e 60kg ha⁻¹). As subparcelas constituíram-se de duas rotações de culturas: uma com nabo/ milho+crotalária/ trigo e outra com soja/ canola/ milho+mucuna. Cada subparcela foi dividida em duas, sendo que, numa delas, não foi adicionado SO_4^{2-} e na outra se adicionou o equivalente a 1/3 das doses iniciais, antes do segundo cultivo. Avaliaram-se os teores de SO_4^{2-} em amostras de solo coletadas em diferentes camadas e a produção de matéria seca e de grãos e o teor de enxofre no tecido. As maiores doses de SO_4^{2-} aplicadas propiciaram pequenos incrementos nos seus teores na camada 0-60cm. Somente as culturas do nabo forrageiro e milho, quando sob irrigação, responderam à aplicação de SO_4^{2-} .

Palavras-chave: produtividade, migração de sulfato, rotação de culturas, reposição de enxofre.

ABSTRACT

The total sulfur amount is lower in soils with low contents of clay and organic matter, and the applications of

limestone and fosfate fertilizers on the surface in no-tillage have reduced the sulfur disponibility through plants on the superficial layer of the soil. This study was carried out to evaluate the sulphate dynamic and the crop responses to S- SO_4^{2-} application. The experiment was carried out at field using a sandy surface soil (Typic Hapludult), and was a trifactorial with complete randomized blocks and four replications. Four S- SO_4^{2-} levels (0, 15, 20 and 60kg ha⁻¹) were applied at the principal plots; two crop rotations at the sub-plots (rapeseed/maize-crotalaria/wheat and soybean/canola/maize-mucuna beans); and the immediate and residual effect was studied at the sub subplot. Soil samples were collected before and after every crop and analyzed for S- SO_4^{2-} . The dry matter and crops yield and S- SO_4^{2-} absorbed by plants were also evaluated. The results showed that rapeseed and maize responded to sulfur application. Soybean, canola and wheat do not respond to sulfur application.

Key words: yields, sulphate leaching, crop rotation, sulphur reposition.

INTRODUÇÃO

Nos solos, o enxofre se encontra nas formas orgânica e inorgânica, sendo essa a predominante, podendo representar mais de 90% do total (NASCIMENTO & MORELLI, 1980). As reservas de enxofre orgânico nos solos sem a interferência do homem dependem basicamente dos teores e tipos de argilominerais e óxidos, os quais protegem a matéria orgânica ao ataque microbiano,

¹Engenheiro Agrônomo, Doutor em Ciência do Solo, Professor Adjunto, Departamento de Solos, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), 97105-900, Santa Maria, RS, Brasil. Pesquisador do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). E-mail: danilo@ccr.ufsm.br. Autor para correspondência.

²Engenheiro Agrônomo, Mestre em Ciência do Solo, Professor na Universidade Nacional de Asunción, Paraguai.

³Engenheiro Agrônomo, Mestrando em Ciência do Solo, Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, UFSM, Brasil.

⁴Engenheiro Agrônomo, Doutor em Ciência do Solo, Bolsista Recém-Doutor CNPq, Brasil.

e das condições ambientais que aceleram ou retardam a atividade biológica. A disponibilidade do enxofre orgânico às plantas depende da sua transformação a formas inorgânicas, quase que exclusivamente na forma de sulfato (SO_4^{2-}) (COSTA, 1980), o qual é retido pelos grupos funcionais dos colóides inorgânicos do solo. Assim, a quantidade de SO_4^{2-} disponível às plantas depende da quantidade de grupos funcionais com capacidade de adsorvê-lo. Os óxidos de ferro, em especial a goethita e ferrihidrita, e as arestas quebradas dos argilominerais 1:1 são os principais fornecedores de OH^- monocoordenados capazes de serem trocados pelo SO_4^{2-} . A adsorção e a desorção de SO_4^{2-} nos grupos funcionais dos colóides inorgânicos são dependentes do pH do solo (CHAO et al., 1962), uma vez que, quando esses estão protonados, o processo de troca de ligante é favorecido pelo enfraquecimento da ligação do oxigênio ao metal. A energia de ligação do SO_4^{2-} aos grupos funcionais é fraca comparativamente àquela do fosfato, sendo que é facilmente deslocado por outros ânions. Desse modo, tanto a quantidade total de enxofre quanto a capacidade de adsorção do SO_4^{2-} são menores em solos com baixos teores de argila e sua retenção é ainda diminuída pela aplicação de calcário e de fosfato. Assim, há um deslocamento desse íon às camadas mais profundas, onde pode ser adsorvido por causa dos maiores teores de argila e menores teores de matéria orgânica e valores de pH.

As plantas apresentam diferentes habilidades em absorver, translocar e utilizar o enxofre e, por isso exigem diferentes teores de SO_4^{2-} disponível no solo. Algumas plantas, como aquelas das famílias das leguminosas, brássicas e liliáceas só expressam seu potencial genético em termos de produtividade e qualidade quando a disponibilidade desse nutriente for alta, sendo então estabelecido um teor crítico de 10mg dm^{-3} , enquanto que para as demais espécies esse valor baixa para 5mg dm^{-3} , extraídos pelo $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 500m l^{-1} de fósforo ($0,008\text{mol l}^{-1}$) (CQFS-RS/SC, 2004). Considerando esses valores referenciais para a camada superficial do solo, aproximadamente 50% da área total dos solos tropicais e sub-tropicais da América podem ser considerados deficientes de enxofre. No levantamento da disponibilidade de SO_4^{2-} realizado por BISSANI (1985) com amostras de solos nativos do Rio Grande do Sul, apenas 8,2% delas possuíam teores inferiores a 5mg dm^{-3} . No entanto, no levantamento feito por ALVAREZ (2004), com mais de 90 mil amostras de solos cultivados do mesmo

Estado, constatou-se que existem 12,3% das amostras com teores menores do que 5mg dm^{-3} e, quando divididas por regiões agroecológicas, algumas chegam a ter mais de 15% das amostras nestas condições. Neste mesmo levantamento, ao se utilizar o índice de 10mg dm^{-3} para culturas mais exigentes, chega-se a 49% das amostras do RS com teores abaixo dessa referência. Os maiores percentuais de solos com baixos teores de SO_4^{2-} estão localizados nas regiões com solos mais frágeis e manejados inadequadamente, cujos teores de matéria orgânica são muito baixos.

A definição dos níveis de suficiência (5 ou 10mg dm^{-3}) foi feita com poucos experimentos, em apenas algumas regiões do Estado, no sistema de cultivo convencional e com tetos de produtividades não muito elevados, inclusive, alguns em casa de vegetação (GOEPFERT & KUSSOW, 1971; ANGHINONI et al., 1976; COSTA, 1980; NASCIMENTO & MORELLI, 1980; WOLFFENBÜTTEL & TEDESCO, 1981; BISSANI, 1985). Esses estudos mostraram que as culturas cultivadas em solos com baixos teores de matéria orgânica e, de argila apresentam maiores probabilidades de resposta à aplicação de fertilizantes sulfatados.

A alta rentabilidade do cultivo da soja obtida nos últimos anos, aliada ao desenvolvimento de rotação de culturas em plantio direto, tem viabilizado economicamente o cultivo de solos com menores teores de argila e matéria orgânica. Sanando-se os problemas de acidez e de disponibilidade de alguns nutrientes, é possível ocupar os solos frágeis da metade Sul do Estado, proporcionando bons rendimentos em anos de precipitação pluvial adequada. Embora o plantio direto seja adotado pela ampla maioria dos produtores do sistema de produção de grãos de sequeiro, especialmente nas médias e grandes propriedades e em algumas pequenas propriedades, a recuperação nos teores médios de matéria orgânica tem se mostrada lenta (MIELNICZUK et al., 2000). Isso decorre porque o manejo do sistema não é feito de modo adequado, não seguindo as recomendações básicas do plantio direto, quer pela falta de planejamento paisagístico-ambiental, quer pela não adoção de práticas simples como em sistema de rotação de culturas, a correção da acidez e de fósforo em profundidade.

Dessa forma, tanto os solos que apresentam baixos teores de argila, especialmente baixos teores de óxidos, como aqueles com baixos teores de matéria orgânica, podem apresentar baixa

disponibilidade de enxofre e por conseqüência limitar a produtividade das culturas. Aliado a isso, a realização da calagem e da adubação com fosfatos solúveis na camada superficial facilita a migração do SO_4^{2-} às camadas subsuperficiais, que por limitações físicas e químicas pode não ser acessado pelo sistema radicular. Nesse contexto, o objetivo é de avaliar a resposta de algumas culturas à aplicação de enxofre e os teores de sulfato num solo de textura superficial arenosa sob plantio direto.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado, no inverno de 2001 no campo experimental do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria, em um Argissolo Vermelho distrófico arênico cultivado desde 1994 em plantio direto. O solo coletado na camada 0-10cm apresentou 120, 203 e 640g kg^{-1} de argila, silte e areia, respectivamente e 8,1g kg^{-1} de carbono orgânico total, pH em água de 5,9 e 3,6 e 1,7cmol_c kg^{-1} de cálcio e magnésio trocáveis e 4,5mg kg^{-1} de sulfato.

Na instalação do experimento, aplicou-se calcário na dose equivalente para elevar o pH em água do solo a 5,5 (1,6 t ha^{-1} de calcário dolomítico 100% de PRNT), seguido de escarificação até a profundidade de 30 cm. Os tratamentos foram dispostos em blocos ao acaso, em parcelas subdivididas com quatro repetições. Na parcela principal, no primeiro cultivo, foram adicionadas quatro doses de SO_4^{2-} (0, 15, 30 e 60kg ha^{-1}), na forma de superfosfato simples, sendo a diferença entre a dose de fósforo necessária suplementada com superfosfato triplo. A parcela principal foi dividida em duas subparcelas, onde se utilizaram as rotações de culturas: nabo forrageiro / milho + crotalaria / trigo e soja / canola / milho + mucuna. A partir do segundo cultivo, cada subparcela foi subdividida em duas subsubparcelas. Na primeira delas, não foi reposto o SO_4^{2-} no segundo cultivo, enquanto na segunda subsubparcela foi adicionado o equivalente a um terço da dose do tratamento inicial (0, 5, 10 e 20kg ha^{-1}) antes do segundo cultivo. Em ambas subsubparcelas, o terceiro cultivo foi feito sem adição de enxofre. Após a abertura do sulco com enxada, o fertilizante sulfatado foi aplicado manualmente na linha de semeadura. A semeadura das espécies também foi feita manualmente.

Os cultivos foram conduzidos sob irrigação (pivô central) e de acordo com suas respectivas recomendações técnicas, inclusive para semeadura, adubação e controle de pragas, doenças

e presença de plantas daninhas. Avaliaram-se o rendimento de grãos das culturas comerciais e de matéria seca das plantas de cobertura do solo. As culturas da crotalaria juncea e da mucuna cinza foram semeadas nas entrelinhas do milho quando da sua maturação fisiológica e não foram feitas avaliações de produtividade de matéria seca. A avaliação da matéria seca foi feita no pleno florescimento das plantas, amostrando-se dois pontos de 1m² por parcela. O rendimento de grãos foi estimado pela colheita de 4m² por unidade experimental. O material colhido foi seco em estufa a 60°C, pesado e moído. No tecido, foi determinado o teor de S total após digestão nitro-perclórica (TABATABAI & BREMNER, 1970).

Antes da instalação do experimento e após cada cultivo foram coletadas amostras de solo nas camadas 0-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50 e 50-60 cm, abrindo-se uma trincheira por unidade experimental. Nessas amostras, foram analisadas os teores de SO_4^{2-} após extração com $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 0,008mol l^{-1} .

Os rendimentos de matéria seca e de grãos, o teor de S nos grãos, as quantidades de S recicladas e exportado e os teores de SO_4^{2-} no solo foram submetidos à análise de variância. Quando o efeito dos tratamentos foi significativo ao nível de 5%, as médias daqueles qualitativos foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% e daqueles quantitativos foram ajustadas equações de regressão.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Teor de sulfato no perfil do solo

Os teores de SO_4^{2-} no solo, antes da aplicação dos tratamentos, estavam abaixo do nível de suficiência para as culturas menos exigentes (<5mg dm^{-3}) (Tabela 1), pois se trata de um solo com baixo teor de argila e que tinha sido cultivado por muito tempo com intenso revolvimento do solo, diminuindo drasticamente o teor de matéria orgânica e, conseqüentemente, o estoque de enxofre orgânico. A acidez do solo foi neutralizada pela aplicação de calcário, o que diminui a capacidade de adsorção de sulfato. Também o solo apresenta um horizonte E espesso o que facilita a drenagem horizontal subsuperficial e a saída desse nutriente do perfil do solo. Os valores foram muito semelhantes para todas as camadas analisadas da camada 0-50cm, com leve diminuição na camada 50-60cm.

Os teores de SO_4^{2-} no solo após o primeiro cultivo (média para as duas culturas - nabo

Tabela 1 - Teores de sulfato em diferentes camadas de solo decorrentes da aplicação de sulfato num Argissolo de textura superficial arenosa sob plantio direto. Médias de duas rotações de culturas e quatro repetições.

Cultivo /camada	Dose de sulfato, kg ha ⁻¹			
	0	15	30	60
	Teor de sulfato no solo, mg dm ⁻³			
Após 1º cultivo				
0-10	4,8	6,2	6,0	4,7
10-20	3,6	4,3	5,0	4,5
20-30	3,5	5,6	6,4	6,1
30-40	3,7	5,4	4,9	6,6
40-50	3,5	4,4	4,9	5,9
50-60	2,6	4,5	3,6	7,5
Média (0-60)	3,6	5,1	5,1	5,9
Após 3º cultivo residual				
0-10	5,0	6,0	6,0	5,7
10-20	3,2	4,4	5,1	5,5
20-30	3,7	7,0	7,6	8,3
30-40	3,8	7,7	7,5	9,0
40-50	3,6	6,8	6,4	6,6
50-60	4,0	7,3	5,1	4,6
Média (0-60)	3,9	6,5	6,3	6,6
Após 3º cultivo reaplicação de 1/3				
0-10	4,1	5,6	6,4	7,2
10-20	3,8	3,6	6,4	6,0
20-30	3,4	5,2	7,0	7,0
30-40	4,2	4,8	6,4	7,4
40-50	3,3	6,3	6,2	6,3
50-60	1,6	6,4	5,8	6,3
Média (0-60)	3,4	5,3	6,4	6,7

forrageiro e soja) para as doses intermediárias (15 e 30kg ha⁻¹) se mantiveram acima do nível de suficiência para as culturas pouco exigentes (5mg dm⁻³ de SO₄⁻²) até a profundidade de 30 cm. A aplicação de 60kg ha⁻¹ de sulfato incrementou os teores SO₄⁻² no solo das camadas abaixo dos 20cm (Tabela 1). Isso evidencia a baixa capacidade natural de adsorção do solo (baixos teores de argila e óxidos), o que é diminuída pela ação antrópica, especialmente pela aplicação do corretivo de acidez e adubos fosfatados na camada superficial do solo. Adicionalmente, a suplementação do déficit hídrico com irrigação pode ter favorecido a migração de sulfato no perfil do solo. Assim, mesmo com a maior dose, não foi possível atingir o nível de suficiência na camada superficial para culturas exigentes (10mg dm⁻³), como é o caso do nabo forrageiro. Os teores de SO₄⁻² no solo, média para a camada 0-60cm, aumentaram de 3,6 para 5,1, 5,1 e 5,9mg dm⁻³ com a aplicação de 15, 30 e 60kg ha⁻¹, respectivamente. No

presente solo, não haviam impedimentos físicos e químicos ao desenvolvimento radicular até o topo do horizonte Bt, sendo, portanto, o sulfato de todo o perfil do solo passível de ser absorvido. Porém, quando os solos não são bem manejados, apresentando pouco teor de matéria orgânica, camadas compactadas e toxidez de alumínio em subsuperfície, muito do sulfato não será acessível ao sistema radicular e, pode, inclusive haver deficiência às culturas mais exigentes (CHAO et al., 1962).

Após três cultivos, mas com aplicação de sulfato apenas no primeiro cultivo, os teores de SO₄⁻² no solo das camadas superficiais (0-10 e 10-20cm) mantiveram-se acima dos 5mg dm⁻³ (Tabela 1). No entanto, os maiores valores foram observados na camada 20-50cm, uma vez que essa apresenta teores de carbono orgânico total (4,4, 3,9 e 3,6g kg⁻¹ para as camadas 20-30, 30-40 e 40-50cm, respectivamente) e valores de pH (5,2, 5,0 e 5,0, para as referidas camadas) mais baixos comparativamente as camadas superficiais (8,1 e 5,4g kg⁻¹ de carbono orgânico total e pH em água de 5,9 e 5,4 para as camadas 0-10 e 10-20). Embora se tenha feito dois cultivos (milho-trigo e canola-milho) sem reaplicação de sulfato, os teores no solo se mantiveram muito semelhantes àqueles obtidos após o primeiro cultivo e levemente superiores à testemunha. Os teores de SO₄⁻² no solo, média para a camada 0-60cm, aumentaram de 3,9 para 6,5, 6,3 e 6,6mg dm⁻³ com a aplicação de 15, 30 e 60kg ha⁻¹, respectivamente. Após três cultivos, com reaplicação de um terço da dose inicial no segundo cultivo, os teores de SO₄⁻² no solo das camadas superficiais (0-10 e 10-20cm) mantiveram-se acima dos 5mg dm⁻³ e levemente superiores aos tratamentos residuais de apenas uma aplicação (Tabela 1). Novamente, os maiores valores foram observados na camada 20-50cm, mas já com aumento, inclusive, na camada 50-60cm. No entanto, os teores de sulfato nunca chegaram aos 10mg dm⁻³, considerados suficientes para culturas exigentes (CQFS-RS/SC, 2004). Os teores de SO₄⁻² no solo, média para a camada 0-60cm, aumentaram de 3,4 para 5,3, 6,4 e 6,7mg dm⁻³ com a aplicação de 15, 30 e 60kg ha⁻¹, respectivamente. Isso indica que a quantidade de sulfato aplicado foi pequena, mesmo que à capacidade de adsorção do solo seja baixa. O sulfato deve ter sido adsorvido a grupos funcionais com energia suficientemente alta para retardar a migração no perfil. Também, a entrada de enxofre atmosférico e a deposição dos resíduos superficiais devem ter contribuído para a manutenção dos teores superficiais. Assim, há necessidade de mensuração

das entradas e saídas desse nutriente no solo para que o balanço do enxofre no solo possa ser corretamente quantificado.

A aplicação de enxofre ao solo via adubo fosfatado, nitrogenado ou formulações permite a elevação dos teores de sulfato do solo, uma vez que a concentração desse elemento é baixa. Assim, não é possível estabelecer uma relação direta entre os teores de sulfato extraído por qualquer método e a produtividade das culturas. A aplicação de gesso agrícola é a forma mais barata e eficiente para se elevar os teores de sulfato no solo, pois as doses recomendadas são bem mais elevadas comparativamente à aplicação de fertilizantes. SOUZA (2004) estabelece que, para solos do cerrado, a quantidade de gesso agrícola a ser aplicado para culturas anuais é de 50 vezes o teor de argila. No solo do presente estudo, seriam necessários 650kg ha⁻¹ de gesso agrícola, o que introduziria no solo 97,5kg ha⁻¹ de enxofre, ou 292,5kg ha⁻¹ de sulfato.

Produtividade das culturas e absorção de enxofre

A produtividade de matéria seca da parte aérea da cultura do nabo forrageiro foi aumentada pela aplicação de sulfato (Tabela 2). Apesar do ajuste

matemático em relação à dose (matéria seca = 1916,79 + 34,35 dose - 0,37 dose², - R² = 0,90) ter sido significativo (p < 5%), cuja produtividade máxima de 2714,4kg ha⁻¹ seria obtida com a dose de 46,5kg ha⁻¹ de sulfato, fica evidente que a aplicação de 15kg ha⁻¹ já foi suficiente para se obter um rendimento satisfatório (Tabela 2). Deve-se considerar que, nos tratamentos com aplicação de sulfato, o crescimento do nabo forrageiro foi mais rápido na fase inicial. Isso é de extrema importância para a proteção do solo e a reciclagem dos nutrientes deixados pelas culturas anteriores. Também, em decorrência do auto-sombreamento, observou-se grande queda de folhas antes da colheita nos tratamentos com adição de sulfato.

Além de ter aumentado a produtividade de massa seca, a aplicação de sulfato proporcionou incrementos nos teores de enxofre no tecido da cultura. Os teores passaram de 38g kg⁻¹ na testemunha para 48g kg⁻¹, 52g kg⁻¹ e 50g kg⁻¹ quando aplicada às doses de 15, 30 e 60kg ha⁻¹ de sulfato, respectivamente (Tabela 3), podendo ser expresso pela equação: teor de S no tecido = 0,381 + 0,007 dose + 0,00009 dose², R² = 0,99. A quantidade de enxofre reciclado pela parte aérea do nabo forrageiro aumentou de 7,2kg ha⁻¹ na testemunha para 11,9, 12,9 e 13,4kg ha⁻¹ com a aplicação

Tabela 2 - Rendimento de matéria seca de nabo forrageiro e grãos de milho, soja, canola e trigo decorrentes da aplicação de sulfato num Argissolo de textura superficial arenosa sob plantio direto.

Cultivo	Cultura	Dose de sulfato, kg ha ⁻¹							
		0		15		30		60	
Mg ha ⁻¹									
Primeira rotação									
1°	Nabo	1.863*	2.495		2.505		2.665		
			0**	+5	0	+10	0	+20	
2°	Milho	8.279*	8.911	10.320	9.097	10.345	9.621	10.443	
			0	+0	0	+0	0	+0	
3°	Trigo	2.297 ^{ns}	2.538	2.571	2.586	2.259	2.558	2.427	
Segunda rotação									
1°	Soja	3.257 ^{ns}	3.001		3.095		3.290		
			0	+5	0	+10	0	+20	
2°	Canola	1.188 ^{ns}	1.248	1.522	1.200	1.249	1.377	1.422	
			0	+0	0	+0	0	+0	
3°	Milho	4.749 ^{ns}	4.591	5.051	4.412	4.773	4.642	4.529	

ns e * = As doses de sulfato não afetaram a produtividade das culturas ou foram significativos no nível de 5%.

** = reaplicação de sulfato nas subparcelas (0 e 1/3 da dose aplicado na parcela).

de 15, 30 e 60kg ha⁻¹ de sulfato, podendo ser expressa pela equação: S reciclado = 7,436 + 0,298 dose – 0,0033 dose², R² = 0,99. Esta cultura se mostra muito importante para a reciclagem de sulfato, pois apresenta sistema radicular profundo e com alta capacidade de absorção de enxofre (JANZEN & BETTANY, 1984).

O rendimento de grãos do milho (segundo cultivo) aumentou com a aplicação de sulfato, especialmente quando foi reaplicado um terço da dose (Tabela 2). O rendimento de grãos da testemunha foi alto (8.280 kg ha⁻¹) e o aumento no rendimento em função das doses de S ajustou-se a uma equação matemática de segundo grau (rendimento = 8.468,4 + 61,399 dose – 0,574 dose², R² = 0,75). De acordo com o modelo, o rendimento máximo (10.110kg ha⁻¹) seria obtido com a aplicação de 53,5kg ha⁻¹ de sulfato. As produtividades médias de grãos de milho foram superiores com a reaplicação de um terço da dose inicial em relação à não reaplicação. A reaplicação proporcionou aumentos de 1.409, 1.248 e 882kg ha⁻¹ de milho (Tabela 2),

representando 15,8, 13,7 e 8,5% respectivamente. Os teores e a exportação de enxofre pelos grãos de milho não diferiram estatisticamente entre os tratamentos. Os teores de enxofre nos grãos variaram de 1,2 a 1,7g kg⁻¹. As quantidades de enxofre exportado pelos grãos variaram de 11,5 a 17,5kg ha⁻¹ (Tabela 3).

A obtenção de altos rendimentos das culturas só é possível quando todos os fatores de produção são manejados corretamente. No sul do Brasil, como em grande parte do território brasileiro, a produtividade das culturas é constantemente limitada pela falta de água. A utilização de irrigação para culturas como o milho tem permitido obter produtividades superiores a doze toneladas por hectares. Nesses casos, a deficiência de sulfato no solo pode ser um fator limitante e a sua adição pode ser uma forma eficiente de aumentar a produtividade, especialmente se houver alguma limitação física ou química do solo ao desenvolvimento radicular em profundidade. A disponibilidade de sulfato, também, pode ser o fator limitante para altas

Tabela 3 - Teor de enxofre no tecido ou no grão e reciclagem ou exportação de enxofre pelas culturas de soja, canola, milho, nabo forrageiro e trigo decorrentes da aplicação de sulfato num Argissolo de textura superficial arenosa sob plantio direto

Cultivo	Cultura	Dose de sulfato, kg ha ⁻¹							
		0	15		30		60		
Primeira rotação									
1°	Nabo								
	g kg ⁻¹	3,8*	4,8		5,0		5,2		
	kg ha ⁻¹	7,2*	11,9		12,9		13,4		
2°	Milho		0**	+5	0	+10	0	+20	
	g kg ⁻¹	1,4 ^{ns}	1,7	1,7	1,7	1,6	1,2	1,3	
	kg ha ⁻¹	12,0 ^{ns}	15,1	17,5	15,5	16,5	11,5	13,6	
3°	Trigo		0	+0	0	+0	0	+0	
	g kg ⁻¹	1,4 ^{ns}	1,6	1,6	1,5	1,7	1,6	1,4	
	kg ha ⁻¹	3,2 ^{ns}	3,9	4,0	4,0	3,7	4,0	3,3	
Segunda rotação									
1°	Soja								
	g kg ⁻¹	3,8*	3,9		4,3		4,7		
	kg ha ⁻¹	12,8 ^{ns}	11,8		14,6		14,4		
2°	Canola		0	+5	0	+10	0	+20	
	g kg ⁻¹	4,1 ^{ns}	4,2	4,5	4,5	4,6	4,5	4,9	
	kg ha ⁻¹	5,7 ^{ns}	5,4	8,0	5,0	5,5	6,0	6,8	
3°	Milho		0	+0	0	+0	0	+0	
	g kg ⁻¹	1,7 ^{ns}	1,6	1,3	1,5	1,6	1,9	1,7	
	kg ha ⁻¹	8,4 ^{ns}	8,2	6,6	6,8	7,6	9,3	8,1	

ns e * = As doses de sulfato não afetaram a produtividade das culturas ou foram significativos no nível de 5%.

** = reaplicação de sulfato nas subsubparcelas (0 e 1/3 da dose aplicado na parcela).

produtividades de outras culturas, como observado para a cultura do feijoeiro (FOLTRAN et al., 2004).

O rendimento de grãos, o teor e o acúmulo de enxofre nos grãos de trigo não aumentaram com o residual da aplicação de sulfato em primeiro cultivo e nem com a reaplicação de um terço da dose inicial no segundo cultivo. O rendimento médio da cultura do trigo foi de 2.441 kg ha⁻¹, cujo valor médio de enxofre nos grãos foi de 1,5 g kg⁻¹ e exportando apenas 3,7 kg ha⁻¹ (Tabelas 2 e 3).

Neste sistema de rotação de culturas (nabo forrageiro / milho + crotalária júncea / trigo), não houve relação entre a produtividade das culturas e os teores de SO₄⁻² no solo. Cabe salientar que o nível crítico de 10 mg dm⁻³ foi definido para o cultivo convencional na camada de 0-20cm e tem sido utilizado no plantio direto, cuja amostragem recomendada é na profundidade de 0-10cm (CQFS-RS/SC, 2004). Apenas para as culturas do nabo forrageiro e milho houve uma tendência de correlação positiva entre a produtividade e o teor de SO₄⁻² médio da camada 0-60cm. Também, a separação teórica de culturas com maior ou menor probabilidade de resposta à aplicação de sulfato não se confirmou no campo. Fatores como teto de produtividade, volumes de solos explorados e entrada de enxofre atmosférico podem alterar a resposta das culturas à aplicação de fertilizantes sulfatados. Isso dificulta o estabelecimento de um nível de suficiência de SO₄⁻² no solo confiável, quer pelos problemas de camada de solo amostrada, quer por falta de experimentos de calibração ou por desconsiderar a dinâmica do enxofre no solo.

A produtividade média de grãos de soja (primeiro cultivo) foi de 3.161 kg ha⁻¹ e não foi afetada pela aplicação de sulfato (Tabela 2). Similarmente, a concentração de enxofre nos grãos e a quantidade desse nutriente exportado não foram afetadas pela aplicação de sulfato (Tabela 3). A ausência de resposta da soja em rendimento de grãos pode ter sido ocasionada pelas boas condições gerais do solo para o desenvolvimento do sistema radicular (SOUZA, 2004). Houve um grande desenvolvimento radicular em profundidade, atingindo inclusive o topo do horizonte Bt (60cm). Adicionalmente, como os cultivos foram todos em plantio direto desde 1994, com acúmulo de matéria orgânica na camada superficial e a escarificação aliada à correção da acidez, pode ter favorecido a liberação de enxofre orgânico nos primeiros cultivos. Embora com tetos de produtividade bem mais baixos e no sistema de cultivo convencional, alguns experimentos

desenvolvidos na década de 70 também não obtiveram respostas da soja à adubação sulfatada (ANGHINONI et al., 1976; BEN et al., 1977).

O rendimento de grãos de canola (segundo cultivo) na testemunha foi de 1.180 kg ha⁻¹, não diferindo estatisticamente até o nível de 10% de significância daquele obtido sem a reaplicação de sulfato (1.275 kg ha⁻¹) ou com a reaplicação de um terço da dose inicial (1.398 kg ha⁻¹) (Tabela 2), em parte pode ser explicada pela grande variação entre os blocos (coeficiente de variação de 27,1%). Os teores de enxofre nos grãos de canola foram de 4,1, 4,4 e 4,6 g kg⁻¹ na testemunha, com e sem reaplicação de sulfato, respectivamente, e as quantidades de enxofre exportado foram de 5,7, 5,5 e 6,8 kg ha⁻¹, respectivamente (Tabela 3). O trabalho desenvolvido por JACKSON (2000) evidenciou alta resposta da canola à aplicação de baixas doses de enxofre.

A produtividade de grãos de milho (terceiro cultivo) foi baixa, comparativamente ao milho cultivado no ano anterior, em decorrência da estiagem que ocorreu no período de enchimento de grãos, momento em que a água da barragem utilizada para irrigação via pivô central não foi suficiente para atender a demanda da área experimental. A produtividade média foi de 4.678 kg ha⁻¹, sem efeito da aplicação de enxofre. Essa produtividade média representa menos da metade daquela obtida no ano anterior (9.574 kg ha⁻¹), limitando a probabilidade de resposta a todos os nutrientes. Desse modo, mesmo em solos com baixos teores de argila e, conseqüentemente, de matéria orgânica, não há necessidade de aplicação de fertilizantes sulfatados para tetos de produtividade da ordem de até 80 sacos de milho por hectare.

A utilização de solos com baixos teores de argila para a produção de grãos pode requerer a suplementação de outros nutrientes além do N, P e K, como é o caso do enxofre. No entanto, o mais importante é manejar o solo corretamente para que não haja restrições ao crescimento radicular em profundidade (RITCHEY et al., 1980; SOUZA, 2004). Um bom crescimento radicular permite a utilização da água disponível no perfil do solo e a reciclagem dos nutrientes com maior facilidade de movimentação, como é o caso do sulfato. Nesses casos, as doses de sulfato devem ser pequenas para evitar as perdas por lixiviação. Desse modo, fica difícil estabelecer a probabilidade de resposta das culturas por meio de diagnóstico da camada 0-10cm, como tem sido usado para o plantio direto. No caso do enxofre, o diagnóstico das condições físicas e químicas das camadas mais profundas pode ser mais importante do que o teor de sulfato da camada superficial.

CONCLUSÕES

Os teores de sulfato da camada superficial do solo (0-10cm) não chegam ao nível de suficiência das culturas exigentes, mesmo com a aplicação de 60kg ha⁻¹. A produtividade máxima de matéria seca de nabo forrageiro e de grãos de milho sob irrigação é obtida com a aplicação de 46,42 e 53,48kg de SO₄⁻² ha⁻¹, respectivamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVAREZ, J.W.R. **Disponibilidade e resposta de culturas ao enxofre em solos do Rio Grande do Sul**. 2004. 84f. Dissertação (Mestrado Ciências do Solo) – Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria.
- ANGHINONI, I. et al. Respostas da cultura da soja à aplicação de boro, zinco e enxofre. **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v.12, p.189-99, 1976.
- BEN, J.R. et al. Necessidade de aplicar enxofre e micronutrientes (Zn, B, Cu e Mo) para a cultura da soja em um Latosol roxo distrófico, Florianópolis, SC. In: REUNIÃO ANUAL CONJUNTA DA SOJA – RS/SC, 5., Pelotas, 1977. **Anais...** Florianópolis : EMPASC, 1977. p.1-6.
- BISSANI, C.A. **Disponibilidade de S para as plantas em solos do Rio Grande do Sul**. 1985. 198f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) – Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- CHAO, T.T. et al. Soil constituents and properties in the absorption of sulfate ions. **Soil Science**, Oxford, v.94, p.276-286, 1962.
- 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.
- COSTA, C.A.S. **Mineralização do S orgânico e adsorção de sulfato em solos**. 1980. 65f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) – Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- FOLTRAN, R., et al. Resposta do feijoeiro ao enxofre em sistema plantio direto, Lages, SC, 2004. In: FERTBIO, 2004, Lages, SC. **Anais...** Lages : SBCS, 2004. CD.
- GOEPFERT, C.F.; KUSSOW, W.F. A necessidade de aplicar S e microelementos em oito solos do Rio Grande do Sul. **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v.7, p.149-156, 1971.
- JACKSON, G.D. Effects of nitrogen and sulphur on canola yield and nutrient uptake. **Agronomy Journal**, Madison, v.2, p.644-656, 2000.
- JANZEN, H.H.; BETTANY, J.R. Sulphur nutrition of rapessed: I. Influence of fertilizer nitrogen and sulphur rates. **Journal of American Society of Agronomy**, Madison, v.48, p.100-107, 1984.
- MIELNICZUK, J. et al. Interações fertilidade e conservação do solo, Santa Maria, RS, 2002. In: FERTBIO, 2002, Santa Maria, RS. **Anais...** Santa Maria : SBCS, 2002. CD.
- NASCIMENTO, J.A.L.; MORELLI, M. Enxofre em solos do Rio Grande do Sul. I. Formas no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.4, p.131-135, 1980.
- RITCHEY, K.D. et al. Calcium leaching to increase rooting depth in a Brazilian savannah oxisol. **Agronomy Journal**, Madison, v.72, p.40-44, 1980.
- SOUZA, D.M.G. Resposta das culturas à adição de gesso agrícola, Lages, SC, 2004. In: FERTBIO, 2004, Lages, SC. **Anais...** Lages : SBCS, 2004. CD.
- TABATABAI, M.A.; BREMNER, J.M. An alkaline oxidation method for determination of total sulphur in soils. **Soil Science Society American Proceeding**, Madison, v.34, p.62-65, 1970.
- WOLFFENBÜTTEL, R.; TEDESCO, M.J. Disponibilidade de S para alfafa em oito solos do Rio Grande do Sul e sua relação com parâmetro do solo. **Agronomia Sulriograndense**, Porto Alegre, v.17, p.357-376, 1981.