

FLUTUAÇÃO DOS TEORES DE SULFATO NA SOLUÇÃO DO SOLO EM CULTIVOS DE FEIJOEIRO E DE CANOLA

FLUCTUATION OF SULPHATE LEVELS IN THE SOIL SOLUTION DURING BEAN AND CANOLA CULTIVATIONS

Benjamin Dias Osório Filho¹, Danilo dos Santos Rheinheimer², Grazielle Feltrin Dias³, João Kaminski², Leandro Souza Silva², Gustavo Brunetto⁴, Carlos Alberto Casali⁵

RESUMO

A disponibilidade de enxofre (S) às plantas no solo, em geral, é medida pela extração química do sulfato da solução do solo e daquele adsorvido fracamente aos colóides do solo, considerados como S disponível. Entretanto, nem sempre ocorre boa correlação entre o S disponível no solo e a quantidade de S absorvida pelas plantas. Este trabalho teve por objetivo avaliar a flutuação do teor de sulfato na solução do solo durante o ciclo do feijoeiro e da canola submetidos à aplicação de S e relacioná-lo com a disponibilidade estimada pelo método padrão adotado nos Estados do RS e SC. O experimento foi instalado em um Argissolo Vermelho distrófico arênico sob sistema plantio direto, cujos tratamentos foram 0, 15, 30 e 60kg ha⁻¹ de S-SO₄⁻², aplicado antes de cada cultivo (parcela principal) e duas rotações de culturas nas subparcelas (aveia preta/feijão/trigo e aveia preta/soja/canola), em delineamento experimental de blocos ao acaso com quatro repetições. Nos cultivos do feijoeiro e da canola foram realizadas extrações da solução do solo com lisímetros de sucção instalados em duas profundidades (20 e 60 cm). Após cada cultivo foi coletado solo para a determinação da disponibilidade de S-SO₄⁻² pelo método de Ca(H₂PO₄)₂ 500mg L⁻¹. A aplicação de fertilizante sulfatado manteve os teores de sulfato na solução do solo a 20cm maiores que os teores da testemunha durante a maior parte do ciclo das culturas. O extrator fosfato de cálcio não foi sensível em detectar as flutuações do S-SO₄⁻² decorrentes da adição de enxofre.

Palavras-chave: enxofre, adubação sulfatada, disponibilidade, solução do solo

ABSTRACT

The sulphur (S) availability in soil is measured by sulphate chemical extractors from soil solution and the sulphur weakly adsorbed to soil colloids. However, not always a good correlation between S extracted and S absorbed by plants is obtained. The experiment was carried to evaluate the sulphate (SO₄⁻²) in the soil solution during culture cycles in soil with application of S and to relate with the standard method used in the Rio Grande do Sul and Santa Catarina States. The

experiment was installed in a Typic Hapludult with four S rates (0, 15, 20 and 60kg ha⁻¹), applied before each culture, and two cultural rotations, in sub-plots, in no-tillage system. In the bean and canola cultures, extractions of soil solution were performed with suction lysimeters, installed in two depths in each plot and SO₄⁻² analysis. After each cultivation, soil was collected and the S availability was analyzed by Ca(H₂PO₄)₂ 500mg L⁻¹. Application of S maintained the sulphate concentration in the soil solution of 20cm depth higher than treatment control, during the cycle of the cultures. The extractor Ca(H₂PO₄)₂ was not sensitive in detecting drauges on sulphate concentration in the superficial layers of the soil.

Key words: sulphur, fertilization sulphated, availability, soil solution

INTRODUÇÃO

A disponibilidade do enxofre (S) às plantas, normalmente, é estimada pela correlação entre um valor extraído do nutriente do solo e a resposta de culturas em produção. Em geral, três formas de enxofre podem ser removidas do solo, em função dos três diferentes grupos de extratores utilizados. Os extratores do primeiro grupo, representados por CaCl₂ e NaCl, LiCl, HCl e água fria, extraem S da solução do solo na forma de SO₄⁻². Já os do segundo e terceiro grupos, entre os quais se encontram Ca(H₂PO₄)₂, NH₄OAc + HOAc e NH₄OAc, estimam também o SO₄⁻² adsorvido aos colóides do solo e parte do S orgânico.

Nos Estados do Rio Grande do Sul (RS) e de Santa Catarina (SC), a Comissão de Química e Fertilidade do Solo (CQFS-RS/SC, 2004) estabeleceu, como método padrão, a extração do S com solução de Ca(H₂PO₄)₂, contendo 500mg L⁻¹ de P, seguida da digestão do extrato com ácido perclórico e da determinação de sulfato por turbidimetria com cloreto de bário. Os valores obtidos são interpretados como baixo (≤2mg dm⁻³), médio (2,1 a 5,0mg dm⁻³) e alto (>5mg dm⁻³), sendo considerado para as culturas das famílias das leguminosas, brassicáceas e liliáceas, o teor de 10mg dm⁻³, como limite entre as classe média e alta. Entretanto, em solos arenosos da Região Sul do Brasil, com teores de S abaixo da menor classe de interpretação, muitas culturas não respondem à aplicação do nutriente (ALVAREZ, 2004; OSÓRIO FILHO,

¹ Eng. Agr., Mestre em Ciência do Solo, Prof. Assist. da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS). E-mail: agronomiabf@hotmail.com.

² Eng. Agr., Doutor em Ciência do Solo, Professor do Depto. de Solos da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), CEP 97.105-900, Santa Maria, RS, Pesq. do CNPq. E-mail: Danilo@ccr.ufsm.br.

³ Eng. Agr. E-mail: grazielle_f_dias@hotmail.com.

⁴ Eng. Agr., Mestre em Ciência do Solo, Professor Substituto do Depto. de Solos, Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo (UFSM). E-mail: brunetto.gustavo@gmail.com

⁵ Eng. Agr., Mestrando do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo (UFSM). E-mail: betocasali@yahoo.com.br.

(Recebido para publicação em 28/03/2008, aprovado em 18/08/2009)

2006). Entre as razões estão o aporte de S atmosférico ao solo, ciclagem pelas plantas de cobertura, fluxo ascendente no perfil do solo em períodos de balanço hídrico negativo e a absorção pelas plantas de formas de S não medidas pelos métodos de extração utilizados (RHEINHEIMER *et al.*, 2005; OSÓRIO FILHO *et al.*, 2007). Assim, o acompanhamento da flutuação dos teores de sulfato na solução do solo decorrente da aplicação de S pode melhorar a estimativa de sua disponibilidade às plantas.

O objetivo do presente trabalho foi avaliar a flutuação dos teores de sulfato na solução do solo durante o ciclo de feijoeiro e de canola submetidos à aplicação de S e relacioná-los com a disponibilidade estimada pelo método padrão adotado nos Estados do RS e de SC.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi instalado em 2002 em área experimental do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). O solo, classificado como um Argissolo Vermelho distrófico arênico (SANTOS *et al.*, 2006), foi cultivado sob sistema convencional até 1994, adotando-se, a partir de então, o sistema plantio direto. Em 2002, foi aplicado calcário para elevar o pH a 5,5 (1,6t ha⁻¹ de calcário dolomítico PRNT 100%), seguido de uma escarificação até a profundidade de 30cm.

No período de julho de 2002 a dezembro de 2003, utilizou duas sucessões culturais de três cultivos [nabo forrageiro (*Raphanus sativus*)/milho (*Zea mays*)/trigo (*Triticum aestivum* L.) e aveia preta (*Avena strigosa* Schreb)/soja (*Glycine max*)/canola (*Brassica napus*)] (ALVAREZ, 2004). Em cada subparcela, no primeiro cultivo foram aplicados 0, 15, 30 e 60kg ha⁻¹ de S na forma de sulfato (S-SO₄⁻²), utilizando-se combinações de superfosfato simples e superfosfato triplo, a fim de manter a dose fixa de fósforo, e variar a dose de enxofre. No segundo cultivo foi aplicado um terço da dose inicial e no terceiro, não se aplicou S. Em maio de 2004, estabeleceram-se duas novas sucessões de culturas. As culturas utilizadas foram: aveia preta/feijoeiro (*Phaseolus vulgaris*)/trigo e aveia preta/soja/canola. Os tratamentos constaram da aplicação de S antes da implantação das culturas, com exceção da aveia preta. Durante o experimento, as culturas receberam a aplicação de fungicidas, inseticidas, herbicidas e, com exceção da soja, adubação nitrogenada, conforme recomendações de CQFS-RS/SC (2004). O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso com quatro repetições, sendo cada parcela de 9,5m x 11m dividida ao meio para compor as subparcelas, onde foram cultivadas duas sucessões de culturas.

Nos cultivos do feijoeiro e da canola, foi instalado no solo um lisímetro de sucção a 20 e a 60 cm de profundidade no centro de cada subparcela. Durante o cultivo do feijoeiro foram realizadas quatro coletas de solução do solo: 5 dias antes da semeadura e aos 40, 69 e 102 dias após a semeadura. No cultivo da canola, foram realizadas seis coletas de solução do solo: 11 dias antes da semeadura e aos 15, 28, 69, 124 e 144 dias após a semeadura. Em cada coleta, aplicou-se tensão aos lisímetros, com uma bomba de vácuo, provocando a entrada da solução do solo em seu interior, até o equilíbrio das pressões internas e externas. Em seguida, com a mesma bomba de vácuo, a solução foi retirada do interior de cada lisímetro, armazenada em frascos "snap-cap", e analisada quanto ao teor de sulfato, por turbidimetria (TEDESCO *et al.*, 1995).

Por ocasião da colheita de grãos das culturas, coletaram-se amostras de solo das camadas de 0-10cm, 20-

30cm e 50-60cm, utilizando-se pá de corte. O solo foi seco em estufa com ar forçado a 40°C, moído, passado em peneira com abertura de malha 2,0mm e submetido à extração de S-SO₄⁻² com Ca(H₂PO₄)₂, como descrito por Tabatabai & Bremner (1970), e em seguida, o extrato foi submetido à digestão nitro-perclórica, determinando-se o sulfato por turbidimetria (TEDESCO *et al.*, 1995).

Os resultados do teor de sulfato na solução do solo e no solo, em cada cultivo, foram submetidos à análise de variância ao nível de 5%. Para os teores de sulfato na solução do solo, quando houve significância, ajustaram-se regressões polinomiais em função do tempo decorrido após a aplicação de enxofre. Além disso, em cada época de coleta de solo, quando significativo, ajustaram-se equações em função das doses de S aplicadas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao longo do ciclo do feijoeiro, os teores de SO₄⁻² na solução do solo na profundidade de 20cm (Figura 1a) variaram com as doses de enxofre aplicadas por ocasião da semeadura. Antes da implantação da cultura, nessa profundidade, os teores de SO₄⁻² foram menores que 10mg L⁻¹, variando de 3,0mg L⁻¹ na testemunha, para 9,0mg L⁻¹, na maior dose (60kg S-SO₄⁻² ha⁻¹). Essa diferença se deve ao residual do nutriente no solo derivado das aplicações de S em cultivos anteriores (ALVAREZ, 2004; OSÓRIO FILHO, 2006). Após a aplicação de S-SO₄⁻² na semeadura do feijoeiro, os teores do ânion na solução aumentaram proporcionalmente às doses. Na testemunha, os teores de SO₄⁻² na solução do solo não ultrapassaram 10mg L⁻¹ e não variaram com o tempo de amostragem. As regressões polinomiais, aos quais estes dados foram ajustados (Tabela 1), mostram que os teores máximos de SO₄⁻² na solução foram de 25,4; 32,3 e 36,7 mg L⁻¹, para as doses de 15, 30 e 60kg ha⁻¹ de S-SO₄⁻², atingidos aos 56, 46 e 53 dias após a semeadura, respectivamente. Após esse período, que coincidiu com a fase reprodutiva do feijoeiro, os teores de SO₄⁻² na solução do solo diminuíram, seja por absorção pelas plantas, visto tratar-se de uma fase de elevada síntese protéica, seja pelo transporte de SO₄⁻² para as camadas mais profundas do solo. Cabe ressaltar que, na profundidade de 60cm, os teores de SO₄⁻² na solução do solo durante o ciclo do feijoeiro não ultrapassaram 8,0mg L⁻¹ (Figura 1a) e não se alteraram em função do tempo transcorrido após a aplicação de sulfato ao solo.

Na cultura da canola, os teores de SO₄⁻² na solução do solo na profundidade de 20cm (Figura 1b) foram menores que os observados para a cultura do feijoeiro na mesma profundidade. Isto provavelmente ocorreu porque a canola foi cultivada no inverno, período de maior precipitação pluviométrica e de menor taxa evapotranspiratória, resultando em fluxo de água descendente no perfil e no transporte dos íons sulfato dissolvidos na solução do solo para camadas mais profundas do solo. Para as quatro doses de S-SO₄⁻² aplicadas, os picos máximos de SO₄⁻² ajustados variaram de 1,6mg L⁻¹ a 17,2mg L⁻¹ e ocorreram nas quatro primeiras semanas de crescimento da canola; logo após, os valores diminuíram. Isto se deve à elevada exigência em S por brassicáceas, como a canola (MILLÉO & DONI FILHO, 2001), sendo as fases de floração e de formação de siliquis e de grãos, as de maior demanda do nutriente. Assim, em todo o ciclo da cultura, a absorção de S ocorreu em taxas elevadas, reduzindo o teor de sulfato na solução do solo. Também a diminuição do teor de SO₄⁻² na profundidade de 20cm, a partir do primeiro mês de cultivo da canola esteve associado ao fluxo descendente do S-

SO_4^{-2} no perfil do solo em função da infiltração da água da chuva.

Após o cultivo da canola, os teores de S-SO_4^{-2} extraído por $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$, em todas as doses e profundidades, tenderam a ser menores que o nível crítico (10mg dm^{-3}) estabelecido para culturas exigentes em S (Tabela 2). O S-SO_4^{-2} da solução do solo pode ser oriundo daquele adsorvido eletrostaticamente (MARSH *et al.*, 1987) ou covalentemente (ZHANG & YU, 1997)

aos grupos funcionais do solo. Porém, também pode ser tamponado pelo S oriundo da decomposição de material orgânico. Especialmente em solos arenosos, esta última forma de reposição do S da solução do solo apresenta considerável contribuição. Desse modo, o extrator fosfato, utilizado convencionalmente na análise do solo, não os detectará, uma vez que, ele considera a adsorção-dessorção como o principal controlador da disponibilidade do elemento para as plantas.

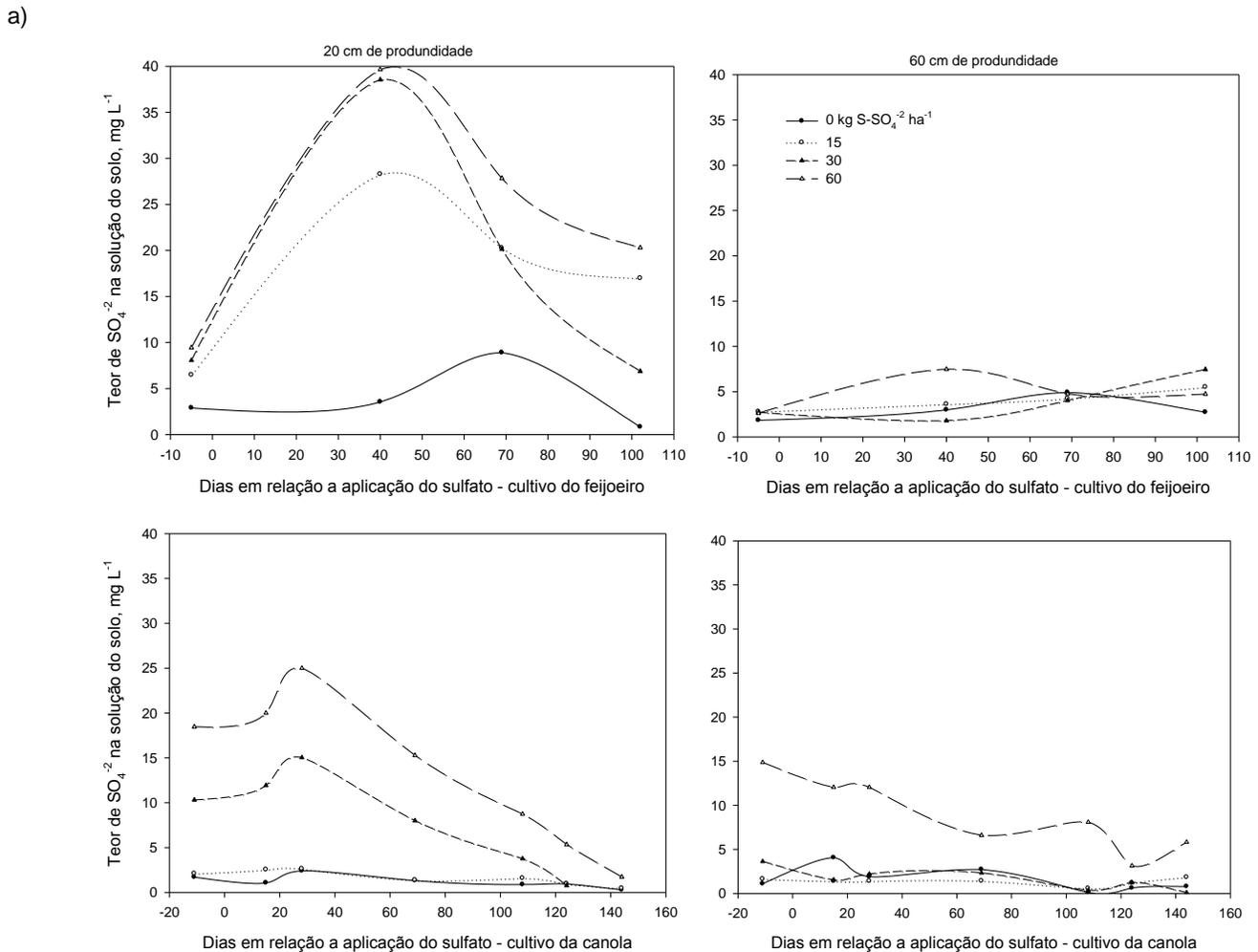


Figura 1 - Teores de SO_4^{-2} na solução do solo durante o cultivo do feijoeiro (a) e da canola (b) nas profundidades de 20 e 60cm.

O S extraído com fosfato de cálcio na camada de 0-10cm, depois do cultivo do feijoeiro aumentou de forma linear com as doses aplicadas, mas variou, apenas, de 5,0 a $8,5\text{mg dm}^{-3}$ (Tabela 2), sendo, portanto, inferiores ao nível crítico (CQFS - RS/SC, 2004) estabelecido para as culturas mais exigentes em S (10mg dm^{-3}). Nas demais camadas amostradas (20-30cm e 50-60cm), o teor de SO_4^{-2} não variou com a dose aplicada de enxofre. Isto se deve à baixa capacidade de retenção de S pela fase sólida do solo, tanto que na camada de 50-60cm, possivelmente onde situa-se o horizonte B textural, o teor de SO_4^{-2} disponível ultrapassou os 10mg dm^{-3} na dose de 60kg ha^{-1} de S. O transporte descendente de S-SO_4^{-2} no perfil do solo ocorre porque normalmente, na superfície, os teores de colóides inorgânicos são baixos, principalmente os óxidos metálicos, o pH do solo é elevado e há maior competição pelos fosfatos e substâncias orgânicas. Assim, aplicações

elevadas de enxofre no solo favorecem a movimentação do elemento no perfil, diminuindo sua absorção pelas raízes das plantas, como relatado por Anderson *et al.* (2006).

A análise de SO_4^{-2} na solução do solo mostrou-se sensível às flutuações da disponibilidade de S promovidas pela adubação sulfatada (Tabela 1), ao contrário da utilização do fosfato de cálcio para determinação do enxofre disponível para as plantas (Tabela 2). Estes resultados indicam que o método da avaliação do S na solução do solo *in situ* reflete melhor a dinâmica do S no solo, mas não se apresenta como uma alternativa de prática de utilização. Por outro lado, a ineficiência do método de extração por fosfato de cálcio salienta a necessidade de mais estudos, para a inclusão de um outro extrator mais adequado, especialmente para solos arenosos.

Tabela 1 - Parâmetros das regressões polinomiais ajustadas entre o teor de SO_4^{-2} da solução do solo nas profundidades de 20 e 60cm e os dias após a sua aplicação nas culturas do feijoeiro e da canola

Dose	Parâmetros de regressão				Teor máximo	Tempo para obter o teor máximo
	b_0	b_1x	$b_{11}x^2$	R^2		
kg ha^{-1} de S- SO_4^{-2}					mg L^{-1}	Dias após aplicação
					Profundidade de 20cm, feijoeiro	
0 ^{ns}						
15	10,22	0,5451	-0,0048	0,84	25,58	56
30	13,81	0,8083	-0,0088	0,84	32,32	46
60	14,74	0,7834	-0,0073	0,85	35,66	53
					Profundidade de 60cm, feijoeiro	
0	2,01	0,0671	-0,0006	0,67	4,02	60
15 ^{ns}						
30	2,40	-0,0463	0,0009	0,99	1,83	24
60	3,48	0,1070	-0,0010	0,65	6,42	55
					Profundidade de 20cm, canola	
0	1,66	0,0033	-0,0001	0,61	1,63	19
15	2,33	0,0009	-0,0001	0,84	2,33	5
30	11,81	0,0461	-0,0011	0,91	12,30	21
60	20,50	0,0033	-0,0012	0,93	13,96	21
					Profundidade de 60cm, canola	
0 ^{ns}						
15 ^{ns}						
30 ^{ns}						
60 ^{ns}	13,30	-0,064		0,83	-	-

^{ns}: Não significativas a 5% de probabilidade.

Tabela 2 - Teor de S- SO_4^{-2} disponível em três camadas de um solo Argissolo Vermelho distrófico arênico em função de doses de SO_4^{-2} , após os cultivos de feijoeiro e de canola

Dose	Camada, cm		
	0-10	20-30	50-60
kg ha^{-1} de S- SO_4^{-2}			
		mg dm^{-3}	
		Após feijoeiro	
0	5,0 ¹	6,4 ^{ns}	6,6 ^{ns}
15	5,6	6,8	9,9
30	5,4	5,6	4,2
60	8,5	9,4	7,7
Média	6,1	7,1	7,1
CV, %	25,37	36,22	36,76
		Após canola	
0	4,4 ^{ns}	3,0 ^{ns}	2,8 ²
15	7,8	6,3	5,1
30	8,1	6,7	5,8
60	6,5	8,6	10,3
Média	6,7	6,1	6,0
CV, %	25,39	38,24	38,25

(1) Teor no solo = $4,6475 + 0,0563*(\text{dose})$, ($R^2 = 0,85$); (2) Teor no solo = $2,9809 + 0,0985*(\text{dose}) + 0,000362*(\text{dose})^2$ ($R^2 = 0,98$); ^{ns}: Não significativa a 5% de probabilidade.

CONCLUSÃO

A aplicação de fertilizante sulfatado manteve os teores de sulfato na solução do solo a 20cm maiores que a testemunha durante a maior parte do ciclo das culturas.

O extrator fosfato de cálcio não foi sensível em detectar as flutuações do $S-SO_4^{2-}$ no solo decorrentes da adição de enxofre.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVAREZ, J.W R. **Disponibilidade e resposta de culturas ao enxofre em solos do Rio Grande do Sul**. Santa Maria, 2004. 84f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria.

ANDERSON, G.C.; FILLERY, I.R.P.; RIPPER, F.H; LEACH, B.J. Sulfur mineralization in a coarse-texture soil after different sulfate fertilization histories, and yield responses of wheat and lupin. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.44, n.2, p.165-174, 2006.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC. **Manual de adubação e calagem para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 10ed., Porto Alegre: SBCS – Núcleo Regional Sul, 2004, 400p.

EMBRAPA - Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos**. 2.ed., Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2006, 306p.

MARSH, K.B; TILLMAN, R.W; SYERS, J.K. Charge relationships of sulfate sorption by soils. **Soil Science Society American Journal**, v.51, n.2, p.318-323, 1987.

MILLEO, M.V.R; DONI FILHO, L. Marcha de absorção de enxofre por plantas de canola. **Scientia Agrária**, Curitiba, v.2, p.25-30, 2001.

OSÓRIO FILHO, B.D. **Dinâmica de enxofre no sistema solo e resposta das culturas à adubação sulfatada**. Santa Maria, 2006. 76f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria.

OSÓRIO FILHO, B.D.; RHEINHEIMER, D.S. *et al.* Deposição do enxofre atmosférico no solo pelas precipitações pluviais e respostas de culturas à adubação sulfatada em sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.37, n.3, p.712-719, 2007.

RHEINHEIMER, D.S. *et al.* Resposta de culturas à aplicação de enxofre e a teores de sulfato num solo de textura arenosa sob plantio direto. **Ciência Rural**, vol.35, n.3, p.562-569, 2005.

TABATABAI, M.A; BREMNER, J.M. An alkaline oxidation method for determination of total sulphur in soils. **Soil Science Society American Proceeding**, v.34, p.62-65, 1970.

TEDESCO, M.J. *et al.* **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2.ed., Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995, 174p. (Boletim Técnico, 5).

ZHANG, G.Y; YU, T.R. Coordination Adsorption of anions. In: YU, T.R. **Chemistry of variable charge soils**. New York, Oxford University Press, 1997, p.175-218.