

ENXOFRE NA ÁGUA DE IRRIGAÇÃO E NA SOLUÇÃO DO SOLO E RENDIMENTO DE ARROZ EM FUNÇÃO DA ADUBAÇÃO SULFATADA

SULPHUR IN IRRIGATION WATERS AND IN SOIL SOLUTION AND RICE YIELD AS AFFECTED BY SULPHATE FERTILIZATION

Felipe de Campos Carmona¹; Ibanor Anghinoni²; Edward Pulver³; Thiago Barros⁴; Thiago Isquierdo Fraga⁵ & João Guilherme Dal Belo Leite⁶.

RESUMO

As lavouras de arroz da Depressão Central do Rio Grande do Sul (DC-RS) são irrigadas, em sua maioria, por rios e barragens. O conteúdo de enxofre nesses mananciais pode, eventualmente, suprir a demanda da cultura que, em solos deficientes desse nutriente, pode apresentar queda de rendimento. Na safra 2005/06 foram conduzidos experimentos em seis locais da DC-RS, com o objetivo de mensurar o aporte de sulfato ($S-SO_4^{2-}$) proveniente de rios e de barragens para o arroz irrigado; acompanhar a variação do teor de $S-SO_4^{2-}$ na solução do solo; e verificar a resposta do arroz à adubação com esse nutriente. O teor de $S-SO_4^{2-}$ na água de irrigação foi, em média, superior nos rios, em comparação à água das barragens, entretanto, não foram suficientes para suprir a demanda para alta produtividade da cultura. Os teores de $S-SO_4^{2-}$ na solução do solo relacionaram-se com as doses desse elemento aplicadas e decresceram com o desenvolvimento do cultivo. A resposta do arroz ocorreu predominantemente com a adição de 20 kg ha⁻¹ de enxofre em solos com teores disponíveis de até 6,6 mg dm⁻³ desse nutriente.

Palavras chave: rios, barragens, dinâmica do sulfato, teor na planta.

ABSTRACT

Rice fields of the central depression region of the Rio Grande do Sul State (DC-RS), Brazil, are irrigated, in its majority, by rivers and dams. The sulphur content of these sources can, eventually, supply the demands of rice, which, in deficient soils, can present yield falling. In the 2005/06 growing season, a study was carried out in six sites of the DC-RS, to measure the sulphate content ($S-SO_4^{2-}$) in four rivers and two dams in flooded rice fields; to follow the variation on the sulphate content in the soil solution grown with rice; and to verify the response of rice to different rates added as sulphate fertilizer. The amount of $S-SO_4^{2-}$ in the irrigation water was, on average, higher in rivers than dams. However, it was not enough to supply the rice demands for high yields. The $S-SO_4^{2-}$ contents in the soil solution were related with the applied sulphur rates, and decreased with the development of the plants. Flooded rice answered to the addition of 20 kg ha⁻¹ of $S-SO_4^{2-}$ in soils with sulphur contents of up to 6,6 mg dm⁻³.

Key words: rivers, dams, sulphate dynamics, plant content.

INTRODUÇÃO

O cultivo do arroz irrigado é uma das principais atividades econômicas na Depressão Central do Rio Grande do Sul (DC-RS). Nessa região, a área plantada é de cerca de 158.000 há⁻¹ e a produtividade média foi de

6,4 Mg ha⁻¹ na safra 2005/06 (IRGA, 2006), sendo que o potencial de rendimento da maioria dos cultivares disponíveis atualmente é superior a 10 Mg ha⁻¹. Segundo diagnósticos realizados em programas de transferência de tecnologia para o arroz irrigado (PULVER & CARMONA, 2004; MENEZES et al., 2004), a principal lacuna para obtenção de rendimentos elevados no Estado está relacionada à falta de adoção da tecnologia existente (SOSBAI, 2007), especialmente a fertilização, que é realizada em doses menores do que a demanda da cultura. Além disso, na maior parte das lavouras de arroz irrigado, não é praticada a rotação de culturas, nem mesmo pousio, o que contribui para o estado de esgotamento físico e nutricional de grande parte dos solos dessa região, que têm origem, em sua maioria, de sedimentos arenosos. Nesse contexto, sintomas característicos de deficiência de enxofre foram verificados nas plantas cultivadas nesses solos quando manejadas para alta produtividade (CARMONA et al., 2008).

A maior parte dos estudos visando avaliar a resposta do arroz irrigado à adição de S tem sido realizada em países asiáticos, como Bangladesh, onde a identificação de deficiência de S nessa cultura ocorreu em 1978, com a aplicação de 20 kg ha⁻¹ de $S-SO_4^{2-}$ resultando num acréscimo em produtividade entre 0,5 e 1,0 Mg ha⁻¹ (BEATON & WHITE, 1997). Na Indonésia, o incremento no rendimento de grãos à adição desse nutriente chegou a 278 % sendo, porém, de 18,6 % na média de 18 locais (BLAIR et al., 1979). Na Índia, a dose de 20 kg ha⁻¹ de $S-SO_4^{2-}$, além de prevenir o amarelecimento das folhas no início do crescimento das plantas, promoveu, independentemente da fonte sulfatada, um incremento entre 20,1 e 30,4 % na produtividade de arroz (MANDAL et al., 1997).

Além do enxofre nativo do solo e do adicionado via fertilizante, a água da chuva e da irrigação, a atmosfera, os esterco e os pesticidas podem suprir esse nutriente às plantas. Os rios e as barragens são os principais mananciais hídricos utilizados para a irrigação de lavouras de arroz no RS. Há, no entanto, uma carência de informações sobre o teor desse nutriente nesses mananciais e a sua possível contribuição à cultura. Isto não ocorre em outras partes no mundo, como nos EUA, cuja contribuição desses mananciais foi dimensionada há mais tempo (JORDAN & ENSMINGER, 1958; DOW, 1976). Em recente trabalho (OSÓRIO FILHO, 2006) realizado em Santa Maria foi verificado o aporte atmosférico médio de 0,8 kg ha⁻¹ mês⁻¹ de $S-SO_4^{2-}$, ou 3,2 kg ha⁻¹ de $S-SO_4^{2-}$ durante os 120 dias que contemplam o ciclo de cultivares precoces, uma contribuição baixa, considerando-se a necessidade de 20 kg ha⁻¹ de $S-SO_4^{2-}$.

Em ambiente alagado, o $S-SO_4^{2-}$ existente no solo e o adicionado pelas diferentes fontes pode tomar diversos caminhos, como ser absorvido pelas raízes das plantas, imobilizado pela matéria orgânica na fina camada oxidada na superfície do solo, adsorvido nos sítios de troca aniônica, removido por lixiviação ou água drenada, ou reduzido a sulfeto (LEFROY et al., 2005). Para estes autores, mais importante que o teor de S na água

¹ Eng. Agrônomo, Doutorando do Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). *Autor para correspondência: Av. Protásio Alves, 4403/303, Porto Alegre-RS, CEP: 91310-002. E-mail: felipecamposcarmona@hotmail.com

² Professor Adjunto do Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, UFRGS. Bolsista CNPq. E-mail: ibanghi@ufrgs.br

³ Biólogo, PhD, Consultor do Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). E-mail: edwardpulver@yahoo.com

⁴ Eng. Agrônomo. E-mail: thiagopoabr@hotmail.com

⁵ Estudante de Graduação, Faculdade de Agronomia, UFRGS. E-mail: isquierdofraga@yahoo.com.br

⁶ Eng. Agrônomo, Mestrando do Programa de Pós-graduação em Agronegócios. Cepan/UFRGS. E-mail: dalbeloleite@yahoo.com.br

(Recebido para Publicação em 12/03/2008, Aprovado em 29/07/2008)

de irrigação dos arrozais, é a capacidade de adsorção do solo ao qual está sendo aportada essa água e o tempo de permanência na lavoura. As características do solo determinam a intensidade das modificações na solução, entretanto, a presença de plantas ocasionará alterações no processo, pela absorção de nutrientes e pelo fluxo de oxigênio nos aerênquimas e pela precipitação do Fe^{3+} nas raízes. Sendo assim, é de se esperar que os teores de $S-SO_4^{2-}$ no solo diminuam ao longo do desenvolvimento da cultura. As perdas de $S-SO_4^{2-}$ por redução, todavia, não ocorrem instantaneamente, uma vez que, após o início do alagamento, os microorganismos anaeróbios agem, preferencialmente, sobre compostos mais oxidados, como o nitrato e os óxidos de manganês e ferro (SOUSA et al., 2002).

Objetivou-se avaliar os aportes de $S-SO_4^{2-}$ pela água de rios e barragens utilizadas para a irrigação de lavouras de arroz; verificar as alterações desse nutriente na solução do solo ao longo do ciclo da cultura e avaliar a resposta do arroz a adubação sulfatada em diferentes locais da Depressão Central do RS.

MATERIAL E MÉTODOS

Seis experimentos foram conduzidos na safra 2005/06 em cinco propriedades rurais da Depressão Central do Rio Grande do Sul e um na Sub-Estação Experimental do IRGA, na barragem do Capané, em

Cachoeira do Sul. Os ensaios foram desenvolvidos nos municípios de: Restinga Seca (quatro locais), Cachoeira do Sul (um local) e Minas do Leão (um local). Alguns dos atributos químicos e o teor de argila dos solos, após a adubação de base, estão apresentados na Tabela 1 e ordenados de forma crescente de acordo com o teor de $S-SO_4^{2-}$ no solo. As áreas experimentais de Restinga Seca constituíram-se de Gleissolos Háplicos, enquanto que a de Minas do Leão e de Cachoeira do Sul, de Planossolos Hidromórficos (PINTO et al., 2004).

Utilizou-se o cultivar IRGA 422 CL. Todas as lavouras foram semeadas dentro da época considerada ideal para cultivares de ciclo precoce, ou seja, até 10 de novembro (MARIOT et al., 2005). A densidade de semeadura utilizada foi de 80 kg ha^{-1} , sendo que as sementes receberam tratamento com inseticida à base de fipronil, para prevenir a infestação de *Oryzophagus oryzae*, a bicheira-da-raiz. As plantas invasoras foram controladas pela aplicação do herbicida Only®, na dose de 1 L ha^{-1} , no estágio de desenvolvimento V3-V4 (três a quatro folhas totalmente desenvolvidas), segundo escala de COUNCE et al. (2000).

A adubação de base foi realizada conforme análise prévia do solo visando à obtenção de altas produtividades de arroz e constou da adição de $50 \text{ kg ha}^{-1} P_2O_5$ e 10 kg ha^{-1} de N, via MAP, na linha de semeadura e 80 a 120 kg ha^{-1} de K_2O a lanço, na forma de KCl, em função do teor de K disponível do solo.

Tabela 1 – Atributos químicos e teor de argila dos solos utilizados após a adubação de base

Locais	pH água (1:1)	Argila	MOS	P ⁽¹⁾ disp.	K ⁽¹⁾ disp.	S- SO ₄ ⁽²⁾ disp.	Cátions trocáveis ⁽³⁾			
							Ca	Mg	Al	
	g dm ⁻³mg dm ⁻³cmol _c dm ⁻³			
Restinga Seca I	4,7	100	13	18	88	2,0	0,6	0,4	3,1	
Minas do Leão	4,4	100	11	6	89	6,4	1	0,7	2,8	
Restinga Seca II	4,9	90	9	9	50	6,6	1,9	1	1,4	
Restinga Seca III	4,7	90	8	7	68	13,4	1,6	1,1	2,4	
Cachoeira do Sul	4,5	230	14	4	72	15,6	2,4	2,7	3,6	
Restinga Seca IV	4,3	290	32	4	97	16,5	4,3	1,6	8,7	

⁽¹⁾ Mehlich I; ⁽²⁾ Extrator $Ca(H_2PO_4)_2$, 500 mg L^{-1} de P; ⁽³⁾ Extrator KCl 1 mol L^{-1} .

Os tratamentos foram aplicados no estágio de desenvolvimento V3 – V4 do arroz irrigado e constaram da aplicação em cobertura de 0, 10, 20, 40 e 80 kg ha^{-1} de $S-SO_4^{2-}$, na forma de sulfato de amônio. Para completar a dose de 150 kg ha^{-1} de N nos tratamentos, foi aplicada uréia concomitantemente ao sulfato de amônio. Essa dose de N foi para garantir a expressão do potencial produtivo da cultura nas condições experimentais.

As parcelas tiveram a dimensão de 75 m^2 ($10 \times 7,5 \text{ m}$), delimitadas em blocos ao acaso, com espaçamento de 3 m entre parcelas, com quatro repetições. A entrada d'água ocorreu, no máximo, oito horas após a aplicação dos tratamentos mantendo-se uma lâmina de 5 a 10 cm até a fase de maturação fisiológica do cultivo.

A coleta de amostras da água de irrigação das áreas ocorreu em quatro momentos: imediatamente após a entrada d'água nos quadros; aos 14 dias após o início da irrigação (DAI), aos 28 DAI e na diferenciação do primórdio floral (DPF). A coleta foi efetuada no ponto de entrada mais próximo do local de implantação dos experimentos que estavam sendo conduzidos. A irrigação das áreas experimentais provenientes dos mananciais foi efetuada sem passar por outros quadros da lavoura comercial evitando, assim, a possível contaminação por enxofre de áreas que eventualmente tivessem sido adubadas com alguma fonte de S. Foram coletados 2,0 L de água em garrafas PET, que eram imediatamente resfriadas no campo e, após, congeladas, até o momento da análise do

teor de $S-SO_4^{2-}$. Depois de descongeladas, as amostras foram homogeneizadas e subdivididas em triplicata.

Os mananciais hídricos utilizados para captação de água foram os seguintes: barragem (Cachoeira do Sul e Minas do Leão), Rio Vacacaí Mirim (Restinga Seca I), Rio Vacacaí (Restinga Seca II e III) e Rio Jacuí (Restinga Seca IV).

Em Restinga Seca II, cujo teor de $S-SO_4^{2-}$ no solo foi de $6,6 \text{ mg dm}^{-3}$ (Tabela 1) foram instalados coletores de solução do solo nas parcelas que receberam a aplicação de 0, 20 e 40 kg ha^{-1} de $S-SO_4^{2-}$. O coletor de solução do solo consistiu-se de um tubo de PVC que serviu como suporte; uma mangueira plástica introduzida dentro do tubo suporte em uma das extremidades e conectada ao tubo coletor, que foi revestido por uma tela de nylon nas duas extremidades, sendo posicionado a 5 cm de profundidade no solo, como descrito em BOHNEN et al. (2005). As coletas foram realizadas em três momentos: aos 14 DAI, aos 28 DAI e na DPF, utilizando-se seringas de 60 ml, com volume coletado de aproximadamente 30 ml em cada parcela. As amostras foram imediatamente resfriadas e, após, congeladas até o momento da análise do teor de $S-SO_4^{2-}$ (TEDESCO et al., 1995). Adicionalmente foram feitas, também, coletas de plantas para a determinação do teor de S na parte aérea S absorvido pelas plantas em três períodos de desenvolvimento do cultivo: aos 14 DAI, aos 28 DAI e no florescimento pleno. Aos 14 e 28 DAI, o material vegetal foi cortado rente à superfície do solo com foice. Foram

coletadas duas linhas, em uma das bordas das parcelas, a uma distância de 50 cm da bordadura e retiradas as plantas em 50 cm em cada linha, totalizando um metro linear de material coletado. Essas amostras foram secas em estufa à temperatura de ~50°C. Após secas, as amostras foram pesadas e moídas. Por ocasião do florescimento pleno das lavouras, foi feita a coleta de 30 folhas bandeira por parcela. O material foi seco em estufa à temperatura de ~50°C e moído.

Ao final do ciclo da cultura foi realizada a colheita de grãos dos ensaios em uma área de 5 m² (2 x 2,5 m). O material colhido foi trilhado em trilhadora estacionária. Os grãos foram limpos com peneira e pesados. O peso foi corrigido para a umidade de 13%.

Os resultados da dinâmica do S-SO₄²⁻ na solução do solo e rendimento de grãos foram submetidos a análise de variância, e as médias, comparadas pelo teste de DMS a 5% de probabilidade de erro, com o auxílio do programa SISVAR.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Enxofre na água de irrigação

Os teores de S-SO₄²⁻ na água de irrigação foram variáveis entre as épocas e as fontes (barragens e rios) utilizadas (Tabela 2). O teor desse nutriente na água dos rios variou de 0,30 a 3,94 mg L⁻¹, à semelhança do observado por IVANOV (1983), que obteve valores de 1 a 4 mg L⁻¹. A água do Rio Vacacaí I foi a que apresentou, na média, valores mais elevados de S-SO₄²⁻, quando comparada a dos demais rios. Ressalva-se que, apesar

de se tratar do mesmo rio, ao contrário do Vacacaí I, em Vacacaí II, a água bombeada era transportada, via levante elétrico, a um açude em um patamar mais elevado, para posterior distribuição, por gravidade, para o quadro onde se encontrava o experimento. Isto pode ter causado uma diluição do S-SO₄²⁻ aportado do rio. Isto é possível, pois os teores de S-SO₄²⁻ observados na água na Fazenda Monjolo e Capané, cujos mananciais são barragens, com teores médios que variaram de 0,49 a 0,75 mg L⁻¹, são inferiores aos teores médios obtidos em rios, que foram de 0,71 a 2,95 mg L⁻¹ (Tabela 2).

Era de se esperar que a concentração de S-SO₄²⁻ na água aumentasse à medida que se avançasse no tempo, pela diminuição gradual dos níveis dos rios e das barragens, pois nessa época ocorre uma demanda maior de água tanto no meio urbano, quanto no rural, principalmente para irrigação de lavouras de arroz. Entretanto, isso ocorreu apenas em um dos mananciais, o Vacacaí I. Mesmo com o nível dos rios e barragens mais baixos, os valores de S-SO₄²⁻ na água de irrigação tenderam a decrescer ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura (Tabela 2), especialmente no Rio Jacuí, onde os teores de S-SO₄²⁻ diminuíram de 3,38 mg L⁻¹ aos 14 DAI a 0,86 mg L⁻¹ na DPF.

Os teores de S-SO₄²⁻ da água de irrigação dos três rios e das duas barragens utilizados neste trabalho podem ser considerados insuficientes para o pleno desenvolvimento da cultura. Nos seis locais, o sistema de cultivo (semi-direto) e o cultivar (IRGA 422 CL) foram os mesmos. Portanto, considera-se que a quantidade de água utilizada na irrigação dos diferentes experimentos foi semelhante, uma vez que procurou-se manter uma lâmina d'água uniforme até a maturação fisiológica do cultivo.

Tabela 2 – Teor de S-SO₄²⁻ na água de irrigação de rios, em diferentes estágios de desenvolvimento do arroz irrigado

Fonte hídrica	Período de desenvolvimento				Média
	Implantação	14 DAI ⁽⁸⁾	28 DAI	DPF	
Rios					
mg L ⁻¹				
Vacacaí Mirim ⁽¹⁾	1,56	1,21	1,99	1,89	1,64
Vacacaí I ⁽²⁾	1,86	2,33	3,94	3,68	2,95
Vacacaí II ⁽³⁾	0,67	0,87	1,02	0,30	0,71
Jacuí ⁽⁴⁾	3,38	1,68	1,08	0,86	1,75
Média	1,87	1,52	2,01	1,68	
Barragens					
Fazenda Monjolo ⁽⁵⁾	nd ⁽⁷⁾	0,6	0,41	0,46	0,49
Capané ⁽⁶⁾	0,8	1,1	0,66	0,45	0,75
Média	0,8	0,85	0,53	0,45	

⁽¹⁾ Restinga Seca I; ⁽²⁾ Restinga Seca II; ⁽³⁾ Restinga Seca III; ⁽⁴⁾ Restinga Seca IV; ⁽⁵⁾ Minas do Leão; ⁽⁶⁾ Cachoeira do Sul; ⁽⁷⁾ não determinado; ⁽⁸⁾ Dias após o início da irrigação.

A demanda da cultura é de cerca de 8.000 m³ ha⁻¹ de água, quando a irrigação é realizada de maneira adequada (MARCOLIN et al., 2007). Considerando-se esse volume de água e o teor médio máximo de 2,95 mg de S-SO₄²⁻ L⁻¹ obtido no rio Vacacaí I (Tabela 1), chega-se a um aporte potencial de 23,6 kg ha⁻¹ de S-SO₄²⁻ via água de irrigação. Como apenas 54% do S da água de irrigação pode ser absorvido pelo arroz (TISDALE et al., 1986), a cultura seria capaz de utilizar, no máximo, cerca de 12,7 kg ha⁻¹ de S-SO₄²⁻ do total, ou 4,2 kg ha⁻¹ de S. Com base nesse cálculo, a contribuição potencial desse nutriente pelos rios Vacacaí Mirim, Vacacaí II e Jacuí e pelas barragens da Fazenda Monjolo e Capané seria, respectivamente de: 2,4, 1,0, 2,5, 0,7 e 1,1 kg ha⁻¹ de S. Considerando-se a necessidade de 22 kg de S para a produção de 10 Mg ha⁻¹ de grãos de arroz (WILSON et al., 2006), verifica-se que mesmo a fonte hídrica com maior teor de S-SO₄²⁻ (Rio Vacacaí I) poderia suprir, no máximo, em torno de 20 % dessa demanda de S.

Esses dados são concordantes com os disponíveis na literatura confirmam os da literatura, pois sintomas de deficiência de S em arroz irrigado ocorreram quando a água de irrigação contém, em média, 2,8 mg

L⁻¹ de S-SO₄²⁻ (BLAIR et al., 1979), valor próximo da fonte mais rica desse nutriente no presente trabalho. Além disso, rendimentos de arroz inferiores a 5,0 Mg ha⁻¹ foram obtidos na utilização de mananciais hídricos com teores médios de 6,4 mg L⁻¹ (WANG, 1979), que se encontram bastante acima dos determinados nos rios e barragens utilizados.

Enxofre na solução do solo

Os teores de S-SO₄²⁻ na solução do solo em Restinga Seca II, com disponibilidade de 6,6 mg dm⁻³ (Tabela 1), aumentaram com as doses de adubo adicionadas e diminuíram ao longo do desenvolvimento das plantas de arroz (Tabela 3). O aumento com as doses ocorreu nas etapas de crescimento (14 e 28 DAI), com o valor mais elevado (5,49 mg L⁻¹) aos 14 DAI na maior dose aplicada (40 kg ha⁻¹ de S). Esta situação é decorrente da alta solubilidade do sulfato em água (754 g L⁻¹, a 20–25 °C), o que lhe confere uma elevada capacidade de fornecer ânions SO₄²⁻ ao solo em curto prazo (VITTI et al., 1986), sendo que a absorção pelas plantas ocorre majoritariamente nessa forma (HAVLIN et al., 2005).

Tabela 3 – Teor de enxofre na solução do solo cultivado com arroz irrigado em função da adição de doses de enxofre, em diferentes períodos de desenvolvimento. Restinga Seca II, safra 2005/06

S aplicado kg ha ⁻¹	Período de desenvolvimento			Média
	14 DAI ⁽¹⁾	28 DAI	DPF	
0	1,96Ba	1,78Ba	0,78Aa	1,51
20	3,12Ba	2,28ABab	1,17Ab	2,19
40	5,43Aa	3,59Ab	1,39Ac	3,47
Média	3,50	2,55	1,11	

⁽¹⁾ Dias após o início da irrigação. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem entre si, pelo teste DMS, a 5% de probabilidade.

Os teores desse nutriente na DPF, apesar de manterem as mesmas tendências entre as doses, são similares, mas com decréscimos proporcionais aos seus teores aos 14 DAI. Uma drástica diminuição no teor de S-SO₄²⁻ (de 6,0 para 0,2 mg L⁻¹), no período de oito semanas de alagamento de um solo cultivado com arroz, também foi obtida por GAO et al. (2002).

O aumento do enxofre na solução do solo, com a dose de adubo adicionada, resultou em aumento (P < 0,05) no teor e na absorção desse nutriente somente na etapa inicial do crescimento do arroz (14 DAI) (Tabela 4). Nas avaliações posteriores, embora as tendências de aumento havidas com as doses de adubo, não houve significância nos efeitos (P > 0,05). Por outro lado, a diminuição dos teores ao longo do tempo (Tabela 3) deve estar relacionada à sua maior absorção pelas plantas de arroz

(Tabela 4), a despeito da menor concentração no tecido vegetal no tempo, o que é esperado. A redução eletroquímica do S-SO₄²⁻ em ambiente anaeróbico ocorre na presença de doadores de elétrons (matéria orgânica) e num potencial redox em pH 7,0 inferior a zero (KONOPKA et al., 1986). Essa reação dificilmente ocorre até aos 30 dias após o alagamento do solo, uma vez que, em ambiente reduzido, os organismos anaeróbios facultativos e obrigatórios utilizam na respiração, preferencialmente, nitrato, óxidos mangânicos e óxidos férricos (SOUSA et al., 2002).

Outra via de saída desse nutriente do sistema, mas de difícil quantificação, são as perdas laterais, o que se verifica, principalmente, em solos arenosos (LEFROY et al., 2005), como o do presente trabalho, em Restinga Seca II (Tabela 1).

Tabela 4. Teor de S na parte aérea e S absorvido por plantas de arroz irrigado em função da adição de doses de enxofre, em diferentes períodos de desenvolvimento. Restinga Seca II, safra 2005/06

S aplicado kg ha ⁻¹	Período de desenvolvimento				
	14 DAI ⁽¹⁾		28 DAI		S na folha bandeira
	Teor g kg ⁻¹	S na planta kg ha ⁻¹	Teor g kg ⁻¹	S na planta kg ha ⁻¹	
0	1,57 B	5,48 Bb	1,28 A	13,94 Aa	1,20 A
20	1,79 A	8,18 Ab	1,23 A	14,41 Aa	1,22 A
40	1,90 A	7,39 Ab	1,26 A	15,23 Aa	1,27 A

⁽¹⁾ Dias após o início da irrigação. Médias seguidas pela mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem entre si, pelo teste DMS, a 5% de probabilidade.

Rendimento de grãos pela adição de enxofre

A resposta do arroz irrigado variou com o solo e com a dose de sulfato adicionada (interação solo vs dose; P < 0,05). Assim, o rendimento de grãos (Tabela 5) aumentou com a elevação do teor de S disponível no solo (Tabela 1). Por outro lado, somente houve resposta (P < 0,05) à adição desse nutriente nos solos com o teor disponível mais baixo (2,0 a 6,6 mg dm⁻³). Nesta condição, houve aumento no rendimento de arroz com a adição entre 10 e 40 kg ha⁻¹ S-SO₄²⁻ e, na maioria dos casos, a 20 kg ha⁻¹, com um ganho máximo médio de grãos de 1,06 Mg ha⁻¹.

Os dados do presente trabalho fizeram parte de uma rede experimental maior, cujo objetivo era a calibração do extrator fosfato de cálcio [(Ca(H₂PO₄)] 500 mg L⁻¹, para a avaliação da disponibilidade de enxofre para o arroz irrigado. Nesse trabalho (CARMONA et al., 2008), foi determinado o teor crítico de 10 mg dm⁻³ de S, que passou a ser adotado no Rio Grande do Sul e Santa Catarina (SOSBAI, 2007). Esse valor está de acordo com os níveis críticos obtidos para o arroz irrigado em outros países, como Bangladesh e Indonésia, de 7 a 11 mg dm⁻³ (NEUE & MAMARIL, 1984).

Tabela 5. Rendimento de grãos de arroz irrigado, em função da aplicação de doses de enxofre, em diferentes locais da Depressão Central do RS

Locais	Doses de S-SO ₄ ²⁻ aplicadas (kg ha ⁻¹)					Média
	0	10	20	40	80	
Mg ha ⁻¹					
Restinga Seca I	7,09Cb	7,17BCb	8,31ABa	7,23BCb	6,37Cb	7,23
Minas do Leão	6,83Cab	7,78Ba	7,41BCab	6,64Cb	6,78BCab	7,09
Restinga Seca II	7,24BCab	6,71Cb	7,41BCab	8,22ABa	6,71BCb	7,26
Restinga Seca III	7,13BCa	6,89BCa	6,62Ca	6,81Ca	6,80BCa	6,85
Cachoeira do Sul	8,18ABa	7,61BCa	7,13Ca	7,25BCa	7,56Ba	7,55
Restinga Seca IV	8,71Aa	9,19Aa	9,35Aa	8,47Aa	9,02Aa	8,95
Média	7,53	7,56	7,71	7,44	7,21	

Médias seguidas pela mesma letra, maiúscula na coluna e minúscula na linha, não diferem entre si, pelo teste DMS, a 5% de probabilidade.

Resposta do arroz irrigado à aplicação de enxofre foi também encontrada por RIOBUENO (2003) e MEDINA (2003), na Colômbia em solos com 2,0 e 6,2 mg dm⁻³ de S, respectivamente. Nesses casos, na Colômbia, e em trabalhos em outros locais, como os de BLAIR et al. (1979), BEATON & WHITE (1997), MANDAL et al. (1997) e, mais recentemente, de WILSON et al. (2006), a adição de 100 kg ha⁻¹ de sulfato de amônio, dá um aporte de cerca de 24 kg ha⁻¹ de S, o que é suficiente para um bom desenvolvimento do arroz e um ganho de até 1,2 Mg ha⁻¹, em solos deficientes nesse nutriente. Esses dados dão sustentação à inferência anterior neste trabalho, de que os mananciais hídricos estudados (Tabela 2), não fornecem quantidades suficientes desse nutriente para a obtenção de altas produtividades.

CONCLUSÕES

- Os teores de S-SO₄²⁻ nos rios foram maiores em relação aos de barragens, porém, insuficientes para suprir as demandas desse nutriente para alta produtividade de grãos de arroz irrigado.
- Os teores de S-SO₄²⁻ na solução do solo se relacionaram com as doses desse nutriente aplicadas e promoveram uma maior absorção desse nutriente nas etapas iniciais de seu desenvolvimento, e decresceram com o desenvolvimento do cultivo.
- Houve aumento no rendimento de grãos pela adição do adubo sulfatado nos solos com teor de S-SO₄²⁻ menor que 6,6 mg dm⁻³.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEATON, J.D.; WHITE, M. Occurrence and correction of S deficiencies in the Asian and Pacific Region: a review and update. **Sulphur in agriculture**, Washington, v.20, p.31-46, 1997.

BLAIR, G.J.; MOMUAT, E.O.; MAMARIL, C.P. Sulfur nutrition of rice. II. Effect of source and rate of S on growth and yield under flooded conditions. **Agronomy Journal**, Madison, v.71, p.477-480, 1979.

BOHNEN, H.; SILVA, L.S.; MACEDO, V.R.M.; MARCOLIN, E. Ácidos orgânicos na solução de um gleissolo sob diferentes sistemas de cultivo com arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, p.475-480, 2005.

CARMONA, F.C.; CONTE, O.; FRAGA, T.I.; PULVER, E.; ANGHINONI, I. Enxofre para o arroz irrigado em solos da Depressão Central do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, submetido, 2008.

COUNCE, P.A.; KEISLING, T.C.; MITCHELL, A. A uniform, objective, and adaptive system for expressing rice development. **Crop Science**, Madison, v.40, n.2, p.436-443, 2000.

DOW, A.I. S fertilization of irrigated soils in Washington State. **Sulphur Institute Journal**, Washington, v.12, p.13-15, 1976.

GAO, S.; TANJI, K.K.; SCARDACI, S.C.; CHOW, A.T. Comparison of redox indicators in a paddy soil during rice growing season. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.66, p.805-817, 2002.

HAVLIN, J.L.; BEATON, J.D.; TISDALE, S.L.; NELSON, W.L. **Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management**. 7ed. New Jersey: Pearson-prentice hall, 2005. Cap. 7, p.219.

INSTITUTO RIO GRANDENSE DO ARROZ – IRGA. 2006. Safra 2005-2006, produção municipal. Disponível em: <http://www.irga.rs.gov.br/arquivos/20070117104152.pdf>. Acesso em: 14 de fevereiro de 2008.

IVANOV, M.V. Major fluxes of the global biogeochemical cycle of sulphur. In: IVANOV, M.V.; FRENEY, J.R. (ed) **The global biogeochemical sulphur cycle**. Scope 19, New York : John Wiley & Sons, 1983. p.449-463.

JORDAN, H.V.; ENSMINGER, L.E. The role of sulfur in soil fertility. **Advances in Agronomy**, Madison, v.10, p.407-434, 1958.

KONOPKA, A.E.; MILLER, R.H.; SOMMERS, L.E. Microbiology of the Sulfur cycle. In: SULFUR in agriculture. Madison : ASA : CSSA : SSSA , 1986. p.23-55. (Agronomy monograph, 27).

LEFROY, R.D.B.; MAMARIL, C.P.; BLAIR, G.J.; GONZALES, P.J. **Scope 48- sulphur cycling on the continents: 11 sulphur cycling in rice wetlands**. Disponível em: <http://www.icsn-scope.org/downloadpubs/scope48/chapter11.html#2>>. Acesso em: 16 set 2005.

MANDAL, B.K.; CHATTERJEE, B.N.; MUKHOPADHYAY, P. Direct and residual effects of different S fertilizers in rice-based sequential cropping in west Bengal, India. **Sulphur in Agriculture**, Washington, v.20, p.47-53, 1997.

MARCOLIN, E.; MACEDO, V.R.M.; GENRO JR, S.A. Volume e eficiência de uso de água para a cultura de arroz em função de época de início de irrigação por inundação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 5.; REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 27., 2007, Pelotas. **Anais...Pelotas**, 2007. v 1. p.474-476.

MARIOT, C.H.P.; MENEZES, V.G.; LIMA, A.L.; RAMIREZ, H.V.; NEVES, G. Influência da época de semeadura no rendimento de grãos de cultivares de arroz irrigado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 4.; REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 26., 2005, Santa Maria. **Anais...Santa Maria**, 2005. v.1. p.251-253.

MEDINA, A.C. Mejore los rendimientos y la calidad del arroz aplicando azufre. **Revista Arroz**, Bogotá, v.51, p.56 – 58, 2003.

MENEZES, V. G.; MACEDO, V. R. M.; ANGHINONI, I. Projeto 10: estratégias de manejo para o aumento da produtividade, competitividade e sustentabilidade da lavoura de arroz irrigado do RS. 2004.

NEUE, H.E.; MAMARIL, C.P. Zinc, sulfur and other micronutrients in wetland soils. In: WETLAND soils characterization, classification and utilization.. Los Banos, Philippines : International Rice Research Institute, 1984. p.307-319.

- OSORIO FILHO, B. D. **Dinâmica de enxofre no sistema solo e respostas das culturas à adubação sulfatada**. Santa Maria, 2006. 75p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria.
- PINTO, L.F.S.; LAUS NETO, J.A.; PAULETTO, E.A. **Solos de várzea do Sul do Brasil cultivados com arroz irrigado**. In: GOMES, A.S.; MAGALHÃES, A.M. Arroz Irrigado no Sul do Brasil. Brasília : Embrapa, 2004. cap.3, p.75-96.
- PULVER, E.; CARMONA, L.C. **Reduzindo as lacunas de produtividade em arroz irrigado na Venezuela e Rio Grande do Sul, Brasil**. Cachoeirinha: IRGA, RS, 2004. 54 p.
- RIOBUENO, C.M. Respuesta de FEDEARROZ 2000 a la fertilización con azufre. **Revista Arroz**, Bogotá, v.51, p.85-87, 2003.
- SOCIEDADE SUL-BRASILEIRA DE ARROZ IRRIGADO - SOSBAI. 2007. **Recomendações técnicas da pesquisa para o Sul do Brasil**. Pelotas: SOSBAI. 161p.
- SOUSA, R.; CAMARGO, F.A.O. ; VAHL, C. Solos alagados: reações de redox. In: MEURER, E.J. (Ed). **Fundamentos de química do solo**. 2 ed. (rev. e amp). Porto Alegre : Gênese, 2002. cap.7, p.207.
- TEDESCO J. M.; GIANELLO C.; BISSANI C. A.; BOHNEM H.; VOLKWEISS, S. J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2 ed. (rev. e ampl). Porto Alegre : Departamento de Solos da UFRGS, 1995-2. 174p. (Boletim Técnico de Solos, 5).
- TISDALE, S.L.; RENEAU, JR., R.B.; PLATOU, J.S. Atlas of sulfur deficiencies. In: SULFUR in agriculture. Madison : ASA : CSSA :SSSA , 1986. p.295-322. (Agronomy monograph, 27).
- VITTI, G.C.; FERREIRA, M.E. & MALAVOLTA, E. Respostas de culturas anuais e perenes ao fosfogesso. In: SEMINÁRIO SOBRE O USO DE FOSFOGESSO NA AGRICULTURA, 1. Brasília, 1985. **Anais...** Brasília, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1986. p.17-44.
- WANG, C.H. Sulphur fertilization of rice-diagnostic techniques. In: SULPHUR in agriculture, Washington, v.3, p.12-15, 1979.
- WILSON JR, C.; SLATON, N.; NORMAN, R.; MILLER, D. **Rice production handbook**. Efficient Use of Fertilizer. Arkansas : Cooperative extension service university of Arkansas, 2006. p.59-60.