

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
FACULDADE DE AGRONOMIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**ENXOFRE PARA O ARROZ IRRIGADO EM SOLOS DA DEPRESSÃO  
CENTRAL DO RIO GRANDE DO SUL**

FELIPE DE CAMPOS CARMONA  
(Dissertação de mestrado)

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
FACULDADE DE AGRONOMIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**ENXOFRE PARA O ARROZ IRRIGADO EM SOLOS DA DEPRESSÃO  
CENTRAL DO RIO GRANDE DO SUL**

FELIPE DE CAMPOS CARMONA  
Engenheiro Agrônomo (UFRGS)

Dissertação apresentada como um dos requisitos à obtenção do grau de Mestre  
em Ciência do Solo.

Porto Alegre (RS), Brasil  
Março/2007

Dedico:

à memória de um saudoso amigo,  
meu grande incentivador aos  
estudos, Vô Nero Virtuoso de  
Campos, pelo legado deixado, de  
honestidade, abnegação e carinho.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por nos conceder a vida...

Ao Professor Ibanor Anghinoni, pelo convívio, orientação e paciência, durante a realização desse trabalho.

Ao Dr. Edward Pulver, exemplo de profissional, por ter me proporcionado a oportunidade ímpar de fazer parte de um projeto de grande importância para a orizicultura gaúcha.

Ao extensionista Gilberto Mori Dotto, fundamental na execução dos trabalhos de campo, pelo convívio e amizade.

Aos produtores rurais e amigos, principais beneficiários desse trabalho, Sandro Cunha, Alberto Milbradt e Família, Eraldo Gribler, Jaime Milbradt, Julcy Eidt, Túlio Eidt, Luiz Lavall, André Lavall, Paulo Milanesi, Ricardo Engelmann, Alcides Mezzomo e Família, Reni Grelmann, Gilberto Rabuski e Família, Auro Kirinus, Arlênio Alves, Gilberto Bortoluzzi, Wernei Schwartzmann, Carlos Rogério de Abreu, e aos funcionários da Barragem do Capané.

A Adão Luís Ramos dos Santos, pelas contribuições durante a condução dos experimentos, tanto a campo, quanto nas análises laboratoriais. A Jader Ribeiro Amaro e sua boa vontade, sempre prestativo na secretaria do Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo da UFRGS.

Ao Dr. Nelson Horowitz, da Roullier Brasil, pelo valioso material disponibilizado e pelas orientações antes da implantação do trabalho a campo.

A todos os colegas e amigos que se propuseram a contribuir, de alguma forma, na execução desse trabalho: Thiago Fraga, Osmar Conte, Gustavo Gonçalves, João Guilherme Leite, Mário Luis Ávila Neto, Thiago Barros, Thaís Freitas, Tatiana Cardoso (*in memorian*) e Raquel Rolim.

Aos extensionistas do Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA), Clairton Petry, José Patrício de Freitas, José Fernando de Andrade, Milton Machado e Jairo Dotto, pela amizade e contribuição na escolha das áreas para execução desse estudo.

Ao Engº. Agr. Márcio Lauschner e à empresa Unifertil, pela doação dos fertilizantes utilizados no campo.

Aos professores e colegas do Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, pela amizade, companheirismo e auxílio ao longo da jornada.

Às instituições que contribuíram, financeira ou logisticamente, para a execução desse projeto: CAPES, Common Fund for Commodities (CFC), Fondo Latino-americano para Arroz de Riego (FLAR), Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) e IRGA.

Aos meus pais e irmãos, pelo auxílio e apoio.

À vó Hilda, outra grande incentivadora.

Aos meus sobrinhos, Léo, Gabi, Tui e Jô, minhas válvulas de escape nos momentos de fadiga.

A todos, que de alguma forma contribuíram, muito obrigado.

# ENXOFRE PARA O ARROZ IRRIGADO EM SOLOS DA DEPRESSÃO CENTRAL DO RIO GRANDE DO SUL <sup>1/</sup>

Autor: Felipe de Campos Carmona

Orientador: Prof. Ibanor Anghinoni

## RESUMO

A região da Depressão Central do Rio Grande do Sul caracteriza-se por apresentar vastas áreas com solos arenosos e cultivadas intensivamente com arroz irrigado há várias décadas. Os altos índices de produtividade obtidos em arroz irrigado atualmente, associados aos baixos teores de matéria orgânica desses solos e às práticas de fertilização utilizadas, constituem condições favoráveis à manifestação da deficiência de enxofre (S). Com o objetivo de determinar a necessidade de aplicação desse nutriente para o arroz irrigado, foi realizado o presente trabalho em 12 locais da região da Depressão Central, nas safras 2004/05 e 2005/06, onde foi testada a resposta do arroz irrigado à adição de doses de S. Os teores de enxofre no perfil do solo foram relacionados aos teores de matéria orgânica, porém, não o foram aos teores de argila; os mananciais hídricos (rios e barragens) não aportaram quantidade relevante de S à cultura. O arroz irrigado respondeu positivamente, em enxofre absorvido pelas plantas e rendimento de grãos, à adição de S em solos com teores de  $S-SO_4^{2-}$  de até  $7,3 \text{ mg dm}^{-3}$ . O teor crítico desse nutriente no solo foi estabelecido como sendo em torno de  $9,0 \text{ mg dm}^{-3}$ . As doses de máxima eficiência técnica e econômica foram de, respectivamente,  $31,25$  e  $24,74 \text{ kg de S ha}^{-1}$  e corresponderam a ganho em rendimento de arroz semelhante.

---

<sup>1/</sup> Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre (RS). (70 p.) Março, 2007. Trabalho realizado com recursos da CAPES e CFC.

# SULFUR TO FLOODED RICE IN THE DEPRESSÃO CENTRAL REGION OF RIO GRANDE DO SUL STATE, BRAZIL <sup>2/</sup>

Author: Felipe de Campos Carmona

Adviser: Prof. Ibanor Anghinoni

## SUMMARY

The region of Depressão Central of the Rio Grande do Sul state, Brazil, is characterized for presenting large sandy soils areas that have been intensively cultivated with flooded rice in the last decades. The high rice yield levels currently achieved, associated to low organic matter contents of these soils and fertilization practices, constitute favorable conditions for the appearance of sulfur (S) deficiency. With the purpose of determining the necessity of this nutrient for the flooded rice in that region, a study was carried out during 2004/05 and 2005/06 seasons to determine the response of the flooded rice to the addition of different rates of S. The sulfur content in the soil profile was related to the organic matter, but not to the clay content; the used water sources (rivers and dams) did not supply relevant amount of S to the plants. The flooded rice increased in S uptake and grain yield, with the applied rates of S to the soil content up to 7,3 mg of S dm<sup>-3</sup>. The critical content of this nutrient in the soil was established as being 9,0 mg dm<sup>-3</sup>. The most efficient technical and economic doses were of, respectively, 31,25 and 24,74 kg of S ha<sup>-1</sup>, that resulted in a very similar rice yield gain.

---

<sup>2/</sup> Master Dissertation in Soil Science. Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre (RS), Brazil. (70 p.) March, 2007. Research supported by CAPES and CFC.

## SUMÁRIO

	Página
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. O enxofre no solo .....	5
2.1.1. O enxofre em solos oxidados .....	5
2.1.2. O enxofre em solos alagados .....	9
2.2. O enxofre na planta.....	12
2.3. Fontes de enxofre às plantas .....	13
2.3.1. Via atmosfera .....	14
2.3.2. Via água de irrigação.....	15
2.3.3. Via adubação mineral .....	17
2.4. Resposta do arroz irrigado à aplicação de enxofre .....	19
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	22
3.1. Escolha dos locais.....	22
3.2. Instalação dos ensaios.....	22
3.3. Caracterização dos solos estudados.....	23
3.4. Adubação e manejo empregados.....	23
3.5. Tratamentos, dimensão das parcelas e delineamento experimental...	25
3.6. Amostragens e determinações .....	25
3.6.1 Análise dos teores de enxofre e demais atributos .....	29
3.6.2 Rendimento de grãos.....	29
3.6.3 Análise do teor de enxofre nos grãos .....	30
3.7. Análises estatísticas.....	30
3.8. Curva de calibração e teor crítico de enxofre no solo .....	30
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	32
4.1. Relação entre os teores de argila, de enxofre e de matéria orgânica em profundidade no solo .....	32
4.2. Dinâmica do enxofre na solução do solo, em função de sua adição e teor de S na água de irrigação ao longo do desenvolvimento do cultivo ...	34
4.3. Crescimento do arroz irrigado e absorção de enxofre em função de sua adição ao solo .....	38
4.4. Rendimento de grãos de arroz irrigado em função da adição de enxofre ao solo .....	48
4.5. Teor e exportação de enxofre nos grãos de arroz irrigado em função da sua adição ao solo.....	51
4.6. Calibração do teor de enxofre para o arroz irrigado .....	52
4.7. Interpretação dos valores de enxofre no solo e recomendação de adubação.....	55
5. CONCLUSÕES.....	60
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	61
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62

## RELAÇÃO DE TABELAS

	Página
01. Atributos químicos e teor de argila dos solos estudados nas safras de 2004/05 e 2005/06 .....	24
02. Teores de argila, de matéria orgânica e de $S-SO_4^{2-}$ em profundidade em diferentes locais da Depressão Central do RS. Safra 2005/06 .....	34
03. Teor de $S-SO_4^{2-}$ na água de irrigação de rios, em diferentes estágios de desenvolvimento do arroz irrigado. Safra 2005/06.....	37
04. Teor de $S-SO_4^{2-}$ na água de irrigação de barragens em diferentes estágios de desenvolvimento do arroz irrigado. Safra 2005/06 .....	37
05. Teor de enxofre no tecido do arroz irrigado, aos 14 DAI ou 21 DAI, em função da adição de doses de S ao solo, em diferentes locais da Depressão Central do RS. Safra 2005/06.....	44
06. Teor de enxofre no tecido do arroz irrigado, aos 28 DAI ou 35 DAI, em função da adição de doses de S ao solo, em diferentes locais da Depressão Central do RS. Safra 2005/06.....	44
07. Teor de enxofre na folha bandeira do arroz irrigado, em função da adição de doses de S ao solo, em diferentes locais da Depressão Central do RS. Safra 2005/06 .....	48
08. Teor de enxofre nos grãos do arroz irrigado, em função da adição de doses de S ao solo, em diferentes locais da Depressão Central do RS. Safra 2005/06 .....	52
09. Exportação de enxofre pelos grãos do arroz irrigado, em função da adição de doses de S ao solo, em diferentes locais da Depressão Central do RS. Safra 2005/06 .....	52

## RELAÇÃO DE FIGURAS

	Página
01. Ilustração da variabilidade de solos submetidos ao nivelamento. Restinga Seca, safra 2005/06.....	26
02. Ilustração da variabilidade de solos submetidos ao nivelamento. Cachoeira do Sul, safra 2005/06 .....	26
03. Representação esquemática de coletor de solução do solo (Adaptado de Bohnen et al., 2005).....	28
04. Coletor de solução do solo instalado a campo. Restinga Seca II, safra 2005/06.....	28
05. Teor de enxofre na solução do solo cultivado com arroz irrigado em função da adição de doses de enxofre, em diferentes estágios de desenvolvimento do cultivo. Restinga Seca II, safra 2005/06.....	35
06. Biomassa do arroz irrigado, aos 14 DAI ou 21 DAI, em função da aplicação de doses de enxofre, em diferentes locais da Depressão Central do RS, na safra 2005/06. *Significativo (P<0,05), <sup>NS</sup> Não Significativo (P>0,05).....	39
07. Biomassa do arroz irrigado, aos 28 DAI ou 35 DAI, em função da aplicação de doses de enxofre, em diferentes locais da Depressão Central do RS, na safra 2005/06. *Significativo (P<0,05), <sup>NS</sup> Não Significativo (P>0,05).....	40
08. Aspecto geral das plantas: a) na parcela testemunha, b) na parcela com 20 kg de S ha <sup>-1</sup> . Restinga Seca I, safra 2005/06.....	42
09. Aspecto visual de duas plantas retiradas: a) da parcela testemunha, b) da parcela com 20 kg de S ha <sup>-1</sup> . Restinga Seca I, safra 2005/06 .....	42
10. Aspecto visual das plantas que receberam: a) a adição de 80 kg ha <sup>-1</sup> de S ao solo, e b) 0 kg de S ha <sup>-1</sup> . Restinga Seca V, safra 2005/06.....	43

11. Enxofre absorvido pelo arroz irrigado, aos 14 DAI ou 21 DAI, em função da aplicação de doses de enxofre, em diferentes locais da Depressão Central do RS, na safra 2005/06. **Significativo (P<0,01), *Significativo (P<0,05), <sup>NS</sup> Não Significativo (P>0,05) .....	46
12. Enxofre no tecido do arroz irrigado, aos 28 DAI ou 35 DAI, em função da aplicação de doses de enxofre, em diferentes locais da Depressão Central do RS, na safra 2005/06. **Significativo (P<0,01), <sup>NS</sup> Não Significativo (P>0,05) .....	47
13. Rendimento de grãos do arroz irrigado, em função da aplicação de doses de enxofre, em diferentes locais da Depressão Central do RS, nas safras 2004/05 e 2005/06. *Significativo (P<0,05), <sup>NS</sup> Não Significativo (P>0,05) .....	50
14. Curva de calibração do teor de enxofre para solos da Depressão Central do RS, nas safras 2004/05 e 2005/06 .....	54
15. Resposta do arroz irrigado, em rendimento médio de grãos, a aplicação de doses de S, em seis solos da Depressão Central do RS, com teores de S-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> no solo abaixo do crítico, nas safras 2004/05 e 2005/06 .....	57
16. Resposta do arroz irrigado, em rendimento médio de grãos, a aplicação de doses de S, em seis solos da Depressão Central do RS, com teores de S-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> no solo acima do crítico, nas safras 2004/05 e 2005/06 .....	57

## 1. INTRODUÇÃO

A atividade orizícola no Rio Grande do Sul teve início há mais de cem anos, tendo como região pioneira a Depressão Central. Do princípio do século passado até os dias de hoje, a orizicultura é a principal fonte de renda de milhares de famílias gaúchas. Este fato é particularmente importante nessa região, onde se concentram 50% dos produtores de arroz de todo o Estado. Diferentemente de outras regiões, como a Fronteira Oeste e a Campanha, onde o cultivo de arroz é mais recente e há alternância de áreas com pecuária e soja, na Depressão Central, muitas das terras utilizadas para a produção de arroz não passam por qualquer tipo de rotação de culturas há anos e, em muitos casos, sequer ocorre a prática de pousio.

Esse panorama, aliado ao material de origem sedimentar e à textura arenosa dos solos, determina uma situação de desgaste dos atributos químicos e físicos do solo, interferindo sobremaneira na fertilidade das terras e nos índices de produtividade do arroz. Neste contexto, a região da Quarta Colônia, inserida na Depressão Central tem como principal atividade primária a orizicultura, devido às características favoráveis de relevo. As propriedades rurais são predominantemente de pequeno porte e a maior parte das lavouras é sistematizada, sendo utilizadas intensivamente ano após ano. A adoção, por muitos arrozeiros, do sistema de plantio pré-germinado é outro fator que contribuiu para o estado de esgotamento em que se encontra boa parte das terras dessa região do RS.

Outras zonas arrozeiras da Depressão Central também apresentam limitações ao cultivo, seja pelo uso intensivo da terra, seja pelas características naturais de fertilidade do solo, com baixos teores de argila, de matéria orgânica e

de potássio. Esta situação, somada à alta infestação de arroz vermelho em expressiva parcela das áreas cultivadas prejudica os produtores em um mercado competitivo e, em muitas ocasiões, pouco compensatório.

Indo ao encontro desse panorama, o projeto de transferência de tecnologia em arroz irrigado do convênio IRGA/FLAR/CFC teve início no Rio Grande do Sul na safra 2003/04, com o objetivo de aumentar os índices de produtividade do orizicultor gaúcho, reduzindo os custos por unidade produzida e tornando o produtor mais competitivo. Esse sistema de difusão de tecnologia consiste na observação de seis pontos-chave de manejo: época de semeadura, de acordo com o ciclo da cultivar; densidade de semeadura adequada; tratamento de sementes com inseticida, caso haja histórico de incidência de bicheira da raiz (*Oryzophagus oryzae*); controle de invasoras em tempo oportuno; momento de entrada correto da água de irrigação e nutrição conforme os índices de fertilidade do solo e produtividade almejada.

Num primeiro momento, o projeto foi introduzido em três regiões do RS. Os resultados na Campanha e na Fronteira Oeste foram plenamente satisfatórios, pois alcançou-se uma produtividade média de 9,7 Mg ha<sup>-1</sup>, com picos de até 12,0 Mg ha<sup>-1</sup>. Entretanto, na Depressão Central, algumas lavouras não apresentaram os rendimentos esperados, mesmo que tivessem sido cumpridos todos os requisitos de manejo. Nestes casos, produtividade média não passou de 7,5 Mg ha<sup>-1</sup>.

Nos locais de rendimento inferior, as plantas apresentavam amarelecimento, porte baixo e perfilhamento reduzido, não condizente com o estágio de desenvolvimento em que se encontravam, mesmo tendo supridas suas demandas por nitrogênio (até 200 kg de N ha<sup>-1</sup>). Os baixos teores de argila e de matéria orgânica, além dos cortes profundos para o nivelamento das áreas, caracterizaram a possibilidade de o enxofre ter sido o fator limitante.

Na safra seguinte, 2004/05, a aplicação de sulfato de amônio tornou-se comum entre muitos produtores, naquelas áreas demasiadamente arenosas, principalmente nos municípios de Restinga Seca, Rio Pardo e Cachoeira do Sul. Esta prática já se verificava há alguns anos entre os orizicultores de alguns municípios da Quarta Colônia, pois os mesmos visualizavam um melhor

desenvolvimento de suas lavouras quando da aplicação de enxofre em solos exauridos. Esse fato evidencia a demanda por maiores informações a respeito da real necessidade de enxofre nos solos propícios a apresentarem o problema.

Este trabalho tem como objetivo mensurar a necessidade de aplicação de enxofre em solos cultivados com arroz irrigado na Depressão Central do RS, pela avaliação do enxofre no perfil do solo; aporte desse nutriente pelos mananciais hídricos; resposta do arroz a aplicação desse nutriente; obtenção de uma curva de calibração e estabelecimento de recomendação específica para o arroz irrigado.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No Rio Grande do Sul, pouco se tem estudado sobre a necessidade de enxofre para o cultivo de arroz irrigado, uma vez que, até o momento, tem sido dada maior ênfase às práticas de manejo do solo, da cultura e dos macronutrientes primários. Entretanto, levando-se em conta que grande parte do aporte de enxofre às plantas provém da matéria orgânica, é de se esperar que áreas com baixos teores de matéria orgânica, muito arenosas, sistematizadas e cultivadas há muitos anos apresentem baixos níveis de enxofre.

Vários autores citam que há uma tendência pela diminuição do uso de adubos contendo S no Brasil (Nascimento & Morelli, 1980; Fontes et al., 1982; Couto & Ritchey, 1986; Armbruster & Monesmith, 1993) e no mundo (Ensminger & Freney, 1966; Bixby & Beaton, 1970; Ceccotti, 1994; Fan & Messick, 1997; Gupta et al., 1997), uma vez que há uma tendência da indústria de fertilizantes de países desenvolvidos e em desenvolvimento em produzir adubos concentrados, como uréia, monoamônio fosfato (MAP), diamônio fosfato (DAP) e superfosfato triplo (SFT), cujas quantidades de enxofre são nulas ou ínfimas. Esse panorama tem reflexo no mercado brasileiro, pelo menor custo na aquisição desses fertilizantes pelo produtor. Embora o Brasil seja um grande produtor de gesso, que contém cerca de 18% de S, apenas uma pequena fração do que é produzido chega ao solo e estima-se que a demanda não realizada de S pelas culturas chegue a 750.000 t ano<sup>-1</sup> (Malavolta et al., 1987). Em contrapartida, Lopes (2006) cita que, de 1984 a 2004, houve aumento de 3,3 vezes no consumo de S na agricultura brasileira, sem, no entanto, fazer menção à evolução da área plantada no país nesse período.

Diversos são os fatores que contribuem para a diminuição dos teores de S no solo, como o seu uso cada vez mais intensivo em busca de altas produtividades das culturas, entre elas o arroz, o que causa diminuição dos teores de matéria orgânica, principal fonte de S às plantas. Some-se a isso, o surgimento de variedades modernas de plantas com alto potencial de rendimento, o que pode demandar maiores aportes de nutrientes, e o uso mais intensivo de calcário e de fósforo em solos ácidos. Deve-se enfatizar que a contribuição das chuvas no fornecimento desse nutriente tem diminuído pela adoção de sistemas de controle de emissão de dióxido de S na atmosfera, gás resultante da queima de combustíveis fósseis e da atividade de usinas e de indústrias (Wainwright, 1984; Tabatabai, 1993; Beaton & White, 1997).

## **2.1. O enxofre no solo**

### **2.1.1. O enxofre em solos oxidados**

O conteúdo de enxofre na litosfera terrestre varia de 0,06 a 0,10% (Havlin et al., 2005). O S presente em piritas e em outros sulfetos metálicos pode ser transformado em sulfato durante o processo de intemperização do solo, sendo, posteriormente, perdido por lixiviação, adsorvido pelos colóides do solo (Jordan & Ensminger, 1958), ou transformado em formas orgânicas por microorganismos e plantas (Bissani & Tedesco, 1988).

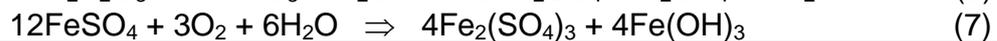
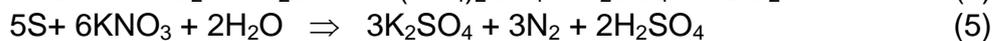
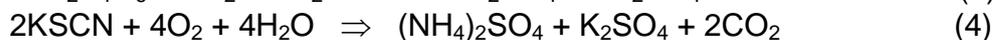
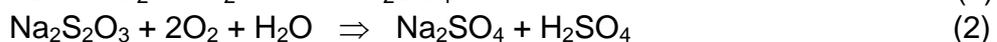
A maior parte do enxofre do solo se encontra em formas não disponíveis aos cultivos a curto prazo, o que torna indispensável o conhecimento das formas de S e sua dinâmica no ambiente, para avaliação da disponibilidade desse nutriente para as plantas. Grande parcela do S total presente no solo se encontra na forma orgânica, principalmente nas camadas mais superficiais. Em regiões de clima temperado, com chuvas bem distribuídas ao longo do ano, 90 a 98% do S se encontra em formas orgânicas (Brady & Weil, 2002). No entanto, a fração orgânica dos solos diminui à medida que ocorre a ação antrópica pela prática da agricultura. Essa diminuição é contínua até que se alcance um novo equilíbrio (Jordan & Ensminger, 1958). Segundo Neptune et al. (1975), o S orgânico pode ser dividido em três frações distintas: ésteres, onde os átomos de S estão ligados aos de oxigênio (polissacarídeos e lipídeos sulfatados, sulfato de colina); átomos

ligados diretamente ao carbono, especialmente nos aminoácidos, e sob a forma de S inerte ou residual (S em compostos não identificados).

As transformações de S no solo são controladas por uma série de processos, tanto bióticos quanto abióticos. Os processos bióticos, que envolvem uma ampla gama de fungos, bactérias e actinomicetos, incluem a mineralização do S (conversão de formas orgânicas de S a  $\text{SO}_4^{2-}$ ); imobilização (conversão de  $\text{SO}_4^{2-}$  a formas orgânicas de S); redução dissimilatória de  $\text{SO}_4^{2-}$  e oxidação de  $\text{H}_2\text{S}$ , e assimilação de  $\text{SO}_4^{2-}$  pelas plantas. Já, os processos abióticos relacionam-se à adsorção/dessorção de  $\text{SO}_4^{2-}$ , (em função do pH do solo, teor e tipo de argila e conteúdo de óxidos de Fe e Al) e precipitação/dissolução de sulfetos ou sulfatos (Norman et al., 2002). Segundo Costa (1980), a adsorção do íon  $\text{SO}_4^{2-}$  pode ocorrer tanto em superfícies positivas (adsorção eletrostática), quanto em negativas com características covalentes (adsorção química ou específica).

A mineralização do enxofre no solo é o processo de maior importância, uma vez que torna esse elemento disponível às plantas. As plantas fazem uso das formas inorgânicas de S, sendo o  $\text{SO}_4^{2-}$  a forma mais comum no solo oxidado, a qual pode existir como  $\text{SO}_4^{2-}$  solúvel;  $\text{SO}_4^{2-}$  adsorvido;  $\text{SO}_4^{2-}$  insolúvel e  $\text{SO}_4^{2-}$  insolúvel co-precipitado com  $\text{CaCO}_3$  (Wainwright, 1984). Segundo Freire (1975), o percentual de S mineralizado por ano em climas temperados úmidos pode chegar a 3%. Na China, a quantidade de S disponível representa, em média, aproximadamente 10% do S total. O mais importante fator determinante dos baixos teores de S no solo, no sul daquele país, é o baixo conteúdo de matéria orgânica, predominante nos solos de textura mais grosseira daquela região (Fan & Messick, 1997). No horizonte A, os teores de S orgânico de solos do sul dos EUA variam de 20 a 176  $\text{mg kg}^{-1}$ , sendo que esses valores estão diretamente correlacionados com o teor de matéria orgânica dos respectivos solos (Kamprath & Jones, 1986).

Um grande espectro de microorganismos é capaz de oxidar o S no ambiente solo, especialmente bactérias do gênero *Thiobacillus*. Algumas espécies de bactérias, como a *Thiobacillus denitrificans*, podem oxidar formas reduzidas a sulfato, com redução de nitrato a  $\text{N}_2$  (Wainwright, 1984), descritas pelas seguintes reações:

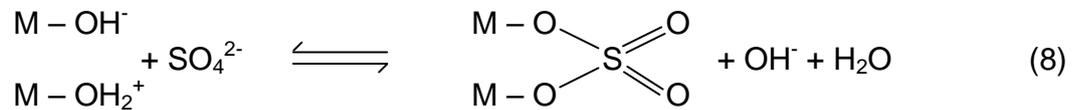


A quantidade de S disponível para as plantas é regulada pelo fluxo de C e pela relação C/S dos resíduos vegetais e da biomassa microbiana, sendo que, quando há adição de resíduos orgânicos com alta relação C/S, ocorre a imobilização do S do solo tornando-o indisponível (Wainwright, 1984; Aita, 2006). Bissani (1985), estudando 987 amostras de solos do RS, chegou a uma relação C/S média de 105/1.

Freney (1986) afirma que existe estreita relação entre o C orgânico, o N total e o S total na camada superficial do solo, mas apreciáveis variações nas relações C/N/S podem ocorrer entre os diferentes tipos de solos, sendo que os utilizados para a agricultura tendem a ter uma relação C/N/S da ordem de 130/10/1,3 e solos de pastagens nativas ou florestas apresentam uma relação de 200/10/1. No Rio Grande do Sul, Nascimento & Morelli (1980) avaliaram solos de 16 Unidades de Mapeamento do RS, onde a relação C/N/S média foi de 146:10:1,3. Nos solos da Unidade de Mapeamento Vacacaí, geralmente utilizados para o cultivo de arroz irrigado, essa relação foi próxima, 146/10/0,95. Costa (1980) realizou estudo semelhante em 16 solos do RS, onde constatou que a relação C/N/S foi de 130/10/1,7.

O pH do solo é fator determinante na adsorção de S nos sítios de troca, uma vez que, em solos próximos à neutralidade, a adsorção do elemento é menor, devido à diminuição da quantidade de cargas superficiais positivas e à desprotonação dos grupos hidroxilas. Desta forma, a prática da calagem proporciona diminuição na adsorção de  $S-SO_4^{2-}$ , aumentando a disponibilidade deste íon na solução do solo (Ensminger, 1954; Mehlich, 1964; Kamprath & Jones, 1986; Caires & Fonseca, 2000). O efeito do pH do solo sobre a adsorção do

S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> em óxidos de Fe e Al pode ser visualizado na Equação 8, (Parfitt & Smart, 1978), onde “M” representa um dado metal e a sua força de atração no solo:



Por ser mais fortemente adsorvido que o S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, o fósforo adicionado ao sistema também pode contribuir para a diminuição da capacidade de retenção de enxofre pelo solo, possibilitando, assim, a lixiviação de sulfato a camadas mais profundas (Ensminger, 1954; Jordan & Ensminger, 1958; Hingston et al., 1972). Esses fatores, aliados à menor quantidade de matéria orgânica no subsolo, podem determinar uma maior concentração de sulfato em camadas mais profundas do solo em relação à superfície (Bissani, 1985; Ceretta, 2006).

Os solos argilosos possuem uma maior capacidade de retenção de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> por possuírem, geralmente, teores elevados de óxidos de ferro, o que torna mais lento o seu movimento no perfil. Em solos arenosos, o sulfato tende a deslocar-se mais rapidamente para os horizontes subsuperficiais, pelo efeito da lixiviação. Regiões tropicais possuem solos mais intemperizados, portanto contêm maior quantidade de óxidos e caulinita (argilas 1:1) conferindo-lhes maior capacidade de adsorção de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, em comparação a solos de climas temperados (Neptune et al., 1975). Esta capacidade de adsorção muitas vezes determina a deficiência ou não de S no solo (Tisdale et al., 1986). Bissani (1985) constatou que, naqueles solos estudados em que os teores de argila eram inferiores a 20%, os teores de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> variaram de 8 mg kg<sup>-1</sup>, na camada de solo de 0-20 cm, a 13 mg kg<sup>-1</sup>, na camada de 20-40 cm. Esse autor verificou também, que o teor de argila aumentava com a profundidade. Este fato é de relevada importância para o arroz irrigado, pois, com o constante preparo do solo para o plantio, em especial no sistema pré germinado, ocorre a desestruturação dos macro e microagregados, que são constituídos principalmente por partículas de argila, resultando na eluviação dessa fração mineral para horizontes mais profundos. O cátion ao qual está associado influi também na lixiviação do S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. O movimento de descida é maior quando ligado a cátions monovalentes, como o

$\text{Na}^+$  e  $\text{K}^+$ , moderado com os divalentes  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  e pequeno com os trivalentes  $\text{Fe}^{3+}$  e  $\text{Al}^{3+}$  (Hagstrom, 1986).

### 2.1.2. O enxofre em solos alagados

O processo de alagamento do solo gera uma série de transformações químicas, físicas e biológicas que afetam sobremaneira suas propriedades. Como consequência imediata, há ruptura dos agregados do solo, dispersão de colóides e diluição da solução do solo. A difusão limitada de oxigênio, o suprimento de C biodegradável, o nível de outros oxidantes e a atividade biológica no solo, particularmente na rizosfera, são a chave para o entendimento dos processos químicos e bioquímicos do solo reduzido (Lefroy et al., 2005).

No processo de respiração biológica, alguns elementos servem como receptores de elétrons. Em solos bem aerados, o  $\text{O}_2$  é o principal receptor. Entretanto, quando o  $\text{O}_2$  é excluído pelo processo de inundação, outros componentes minerais ou elementos, ou ambos, cumprem essa função, regulada pela afinidade em receber elétrons. Em solos submersos, os organismos anaeróbios facultativos e obrigatórios utilizam na respiração, preferencialmente nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), óxidos mangânicos ( $\text{Mn}^{4+}$ ), óxidos férricos ( $\text{Fe}^{3+}$ ), sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) e hidrogênio ( $\text{H}^+$ ), reduzindo-os, respectivamente, a nitrogênio ( $\text{N}_2$ ), óxidos manganosos ( $\text{Mn}^{2+}$ ), óxidos ferrosos ( $\text{Fe}^{2+}$ ), enxofre ( $\text{S}^{2-}$ ), gás metano ( $\text{CH}_4$ ) e gás hidrogênio ( $\text{H}_2$ ) (Patrick & Reddy, 1978; Sousa et al., 2000).

À medida que os compostos oxidados vão sendo consumidos e convertidos a formas reduzidas, reações eletroquímicas importantes ocorrem e esse ambiente passa a assumir características de redução, que são indicadas pelo potencial redox (Eh), sendo que, quanto mais baixo for o seu valor, maior será a concentração de substâncias reduzidas no solo (Sousa et al., 2000).

Segundo Ponnampertuma (1984), a cinética de redução do  $\text{S-SO}_4^{2-}$  em solos anaeróbicos, depende das propriedades do solo e da temperatura, sendo que sua redução é maior quanto maior for a temperatura. Em um ambiente alagado, o  $\text{S-SO}_4^{2-}$  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).

Um bom manejo da água é fundamental na prevenção de perdas de S da lavoura. Se significativas quantidades de água forem drenadas da lavoura constantemente, perdas de S e outros nutrientes serão inevitáveis. Entretanto, se a água for adicionada somente para manter a lâmina d'água no nível desejado, estas perdas serão minimizadas. Em solos muito arenosos, perdas de S normalmente ocorrem em função do movimento lateral e vertical da solução do solo (Lefroy et al., 2005).

De acordo com Konopka et al. (1986), a redução do  $S-SO_4^{2-}$  ocorre em ambiente anaeróbico se houver adequada concentração de doadores de elétrons (matéria orgânica) e receptores de elétrons ( $SO_4^{2-}$ ); entretanto, para que se tenha início a redução do  $S-SO_4^{2-}$ , é necessário que o potencial redox a pH 7 seja inferior a zero. Este dado indica que essa reação dificilmente ocorrerá até 30 dias do alagamento do solo, considerando que se mantenha o seu perfil oxidado antes da inundação, prática comum no RS.

A absorção de enxofre em solos alagados ocorre majoritariamente na forma de  $SO_4^{2-}$ , embora suspeite-se que as raízes sejam capazes de absorver S na forma de  $S_2O_3^{2-}$  e as folhas, através dos estômatos, sob a forma de  $SO_2$  (Havlin et al., 2005). Assim como em solos oxidados, a quantidade de  $S-SO_4^{2-}$  disponível em solos alagados está diretamente relacionada à textura e à matéria orgânica, sendo que solos arenosos naturalmente terão menor capacidade de retenção desse ânion. A redução do sulfato pode causar deficiência de S em solos com baixa disponibilidade desse elemento e até toxidez por  $H_2S$  (Equação 9), em solos ricos em matéria orgânica e submetidos a condições de anaerobiose por muito tempo. Formas reduzidas de enxofre, como  $H_2S$ ,  $FeS$  e  $FeS_2$ , são importantes em solos alagados onde predominam situações de anaerobiose (Moreira & Siqueira, 2002); entretanto, apenas solos com baixos teores de Fe estão aptos a produzir concentrações elevadas de  $H_2S$  (Sousa et al., 2000). A aplicação proposital ou acidental de doses elevadas de  $SO_4^{2-}$  pode levar a perdas de S por volatilização em ambientes reduzidos (Lefroy et al., 2005).



Beaton & White (1997) afirmam que a maioria dos solos das Filipinas, usualmente utilizados para o cultivo de arroz irrigado, contêm teores de S adequados à nutrição das plantas nos primeiros 20 cm da camada arável, enquanto que os teores abaixo dessa profundidade são menores. Isso pode ocorrer devido ao maior tempo de saturação a que são submetidos os solos conforme aumenta a profundidade. Solos de várzea utilizados para o cultivo de arroz, mesmo se drenados superficialmente, podem manter uma camada subsuperficial ainda em estado de anaerobiose. Nesta condição, há uma tendência de redução dos compostos oxidados de S até  $\text{H}_2\text{S}$ , com conseqüente volatilização e saída do sistema (Jordan & Ensminger, 1958), reduzindo os teores de S em camadas mais profundas, caso não haja combinação com um metal (Lefroy et al., 2005) e conseqüente formação de precipitados, como  $\text{FeS}$  ou  $\text{FeS}_2$ . Chaitep et al. (1994) observaram uma menor absorção pelo arroz irrigado do S aplicado em profundidade em comparação ao S aplicado superficialmente. Esses autores atribuem esse fato a uma possível redução do S elementar incorporado a  $\text{H}_2\text{S}$ .

Microorganismos do gênero *Beggiatoa sp.* são importantes na oxidação de S em ambientes alagados. As plantas de arroz transportam  $\text{O}_2$  para as raízes estabelecendo uma fina zona oxidada no sistema radicular, fronteira à zona reduzida. Wainwright (1984) suspeita que as bactérias *Beggiatoa* se desenvolvam nesse limiar, entre os ambientes oxidado e reduzido, convertendo o  $\text{H}_2\text{S}$  à  $\text{SO}_4^{2-}$ , estabelecendo, portanto, uma relação mutualística com a planta. Como as plantas de arroz ocupam considerável volume do solo, zonas de oxidação estão presentes, favorecendo o crescimento e o metabolismo de microorganismos aeróbios. Resulta desse processo, a ocorrência de S em todos os estados de oxidação, desde 6+ a 2-, conforme demonstram Bissani & Tedesco (1988):

	Anaerobiose	↔			Aerobiose
Estado de oxidação	Redução $\text{S}^{2-}$	$\text{S}^0$	$\text{S}^{2+}$	$\text{S}^{4+}$	Oxidação $\text{S}^{6+}$
Compostos ou íons	$\text{H}_2\text{S}$	S	$\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$	$\text{SO}_2$	$\text{SO}_4^{2-}$
Denominação	sulfetos	enxofre elementar	tiosulfato	dióxido de enxofre	sulfatos

## 2.2. O enxofre na planta

O S é elemento essencial a todas as plantas, visto que é necessário para a síntese dos aminoácidos cistina, cisteína e metionina, os quais constituem vitaminas, hormônios e enzimas. Aproximadamente 90% do enxofre presente nas plantas é encontrado nesses aminoácidos. Embora não ocorra na clorofila, o S é requerido para a formação dessa substância. O  $S-SO_4^{2-}$  é suprido às raízes principalmente por fluxo de massa, sendo transportado através dos vasos do xilema para as folhas, onde sofre, nos cloroplastos, redução e incorporação a formas orgânicas, que são então redistribuídas para a planta nos vasos do floema (Thompson et al., 1986). A maioria do S orgânico das plantas está presente nos peptídeos e proteínas, sendo que os aminoácidos cisteína e metionina assumem papel fundamental neste contexto (Duke & Reisenauer, 1986). O baixo aporte de ambos leva à clorose das folhas novas e inibe a síntese de proteínas, pois ocorre um decréscimo nos conteúdos de clorofila e ribulose-bisfosfato carboxilase (RuBisCo), com conseqüente redução da fotossíntese e do crescimento das plantas (Resurreccion et al., 2001)

O acúmulo de enxofre, na forma de sulfato, nos tecidos varia de acordo com o desenvolvimento da planta, tanto em situações de baixo aporte desse nutriente quanto de pleno suprimento e tende a aumentar conforme o avanço no desenvolvimento do cultivo. O contrário ocorre com o enxofre orgânico, que tende a ter seu acúmulo diminuído (Eaton, 1966). Em uma lavoura de arroz com rendimento médio de  $7 \text{ Mg ha}^{-1}$ , a quantidade de S absorvida pelas plantas é de cerca de  $22 \text{ kg ha}^{-1}$  e a remoção via grãos aproxima-se de  $7 \text{ kg ha}^{-1}$ , ou seja, 30% do enxofre absorvido tem como destino final os grãos (Wilson et al., 2006). Para Eaton (1966), o  $SO_4^{2-}$  presente no sistema vascular é bastante móvel sendo esta estrutura da planta citada também como um local de armazenamento desse elemento na planta. Em situações de deficiência, a quantidade de sulfato nos tecidos é pequena, caracterizando a conversão de  $SO_4^{2-}$  em aminoácidos essenciais à planta. Compactam dessa hipótese Ensminger & Freney (1966), ao afirmarem que, quando o enxofre é aportado em pequenas quantidades, a maior parte do que é absorvido é convertido na síntese de proteínas, resultando em uma pequena fração de sulfato detectável nos tecidos. Além disso, concluem que o

estágio de desenvolvimento da cultura deve também ser levado em conta na diagnose dos níveis de sulfato na planta.

A planta de arroz necessita de uma quantidade de enxofre semelhante à de fósforo para se desenvolver. É possível se observar deficiência de enxofre no arroz irrigado em solos altamente reduzidos, com baixa concentração de sulfato na água de irrigação e em cultivos nos quais os fertilizantes aplicados são desprovidos de enxofre. Para um bom desenvolvimento, os tecidos da planta devem apresentar, durante o perfilhamento e iniciação da panícula, concentrações de  $\text{SO}_4^{2-}$  de, respectivamente 0,17% e 0,15% (Wilson et al., 2006). Os sintomas de deficiência de enxofre nas plantas são muito parecidos com os de deficiência de nitrogênio. Em ambos os casos, as folhas apresentam amarelecimento e clorose. O motivo desta semelhança é o fato de que ambos são essenciais para a formação da clorofila. A planta de arroz deficiente em enxofre apresenta, inicialmente, amarelecimento nas folhas mais jovens e, posteriormente, este sintoma toma conta das demais folhas, uma vez que, ao contrário do nitrogênio, o enxofre é pouco móvel na planta. Além disso, sua deficiência causa um menor perfilhamento, atraso na maturidade e crescimento atrofiado (Wilson et al., 2006)

### **2.3. Fontes de enxofre às plantas**

O solo, a água da chuva e da irrigação, as formas gasosas da atmosfera, os estercos e os pesticidas são importantes supridores de S às plantas. Entretanto, os aportes de adubos fosfatados e nitrogenados contendo S estão se tornando práticas cada vez menos comuns, devido à ênfase da indústria em produzir fertilizantes de alta concentração, como o superfosfato triplo, o monoamônio fosfato (MAP), o diamônio fosfato (DAP) e a uréia, que são carentes, em sua composição, desse nutriente essencial. De acordo com um estudo de Liu (1995), na China, as adições anuais de S pelos fertilizantes, pela precipitação e pela água de irrigação são de, respectivamente,  $16,99 \text{ kg ha}^{-1}$ ,  $6,88 \text{ kg ha}^{-1}$  e  $3,90 \text{ kg ha}^{-1}$ , soma essa que é inferior às remoções da camada arável por absorção radicular das plantas e perdas por lixiviação.

### 2.3.1. Via atmosfera

O S da atmosfera é emitido por uma variedade de fontes naturais e antropogênicas. A atividade vulcânica, tanto na superfície terrestre quanto no leito oceânico, a atividade biológica, o aerossol marinho e, principalmente, a emissão industrial e a queima de combustíveis fósseis, são algumas das fontes desse elemento no ar. O homem é responsável pelo aporte de 113 Tg S ano<sup>-1</sup>, equivalente a 35% do fluxo total de S na atmosfera (Trudinger, 1986). A queima de resíduos de lavouras e de pastagens também pode aportar quantidades importantes de S via volatilização. A atividade biológica do solo representa a terceira maior fonte de S atmosférico natural, pela atividade de bactérias decompositoras de resíduos vegetais e bactérias específicas redutoras de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (Noggle et al., 1986).

Os componentes de S detectados na atmosfera incluem SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, frações orgânicas gasosas de S e SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> aerossol (Trudinger, 1986). Mais de 95% das emissões de S na atmosfera se dão sob a forma de SO<sub>2</sub>, com pequenos traços de H<sub>2</sub>S, SF<sub>6</sub> e mercaptanos (Kellogg et al., 1972). O SO<sub>2</sub> é altamente solúvel em água. A oxidação abiótica do S na atmosfera resulta na formação de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e sais de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> e, em especial, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, sendo que a concentração de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> que atinge o solo próximo a fontes emissoras de SO<sub>2</sub> no ambiente é considerável (Wainwright, 1984). O SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> adicionado ao solo por essa via está prontamente disponível para absorção pelas raízes das plantas (Noggle et al., 1986).

Em regiões onde excessivas quantidades de SO<sub>2</sub> são liberadas, pode ocorrer a formação de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> livre, resultando no fenômeno conhecido como chuva ácida. A remoção de gases atmosféricos pode se dar tanto por via úmida quanto por via seca, pelo impacto do aerossol fino sobre a superfície terrestre e absorção de SO<sub>2</sub> pelos estômatos das plantas (Edwards et al., 1999). A precipitação pluviométrica é responsável pelo retorno, ao solo, desses gases lançados no ambiente, mas o regime de ventos faz com que esse processo não se dê necessariamente próximo aos locais de origem. No Rio Grande do Sul, apesar do controle cada vez mais rigoroso da atividade industrial, a região metropolitana de Porto Alegre responde pela emissão de quantidades suficientes para o

suprimento da maioria das culturas. Guedes (1985) mediu aportes de até 49,6 kg ha<sup>-1</sup> semestre<sup>-1</sup> na zona industrial de Porto Alegre, sendo que em zonas rurais mais distantes, foi medida uma contribuição de S atmosférico de 19,7 kg ha<sup>-1</sup> semestre<sup>-1</sup>. Na região da Campanha, a atividade das termelétricas de Candiota influi nas emissões de S sobre regiões vizinhas, inclusive o Uruguai, uma vez que o substrato utilizado para a produção de energia é o carvão mineral (Braga et al., 2004). Osório (2005), em estudo realizado em Santa Maria, observou uma grande variação nos aportes de S atmosférico ao longo de 12 meses, sendo que a quantidade total foi de 9,6 kg ha<sup>-1</sup>, nesse período.

Em Minnesota, nos Estados Unidos, a quantidade de S proveniente da água da chuva variou de 112 kg ha<sup>-1</sup>, no centro da metrópole Minneapolis, até menos de 6 kg ha<sup>-1</sup>, em um pequeno distrito distante cerca de 290 quilômetros (Alway et al., 1937). Já, em áreas rurais dos estados de Alabama, Arkansas, Flórida, Geórgia, Lousiana, Mississippi, Carolina do Norte, Carolina do Sul e Texas quantidades médias de S via atmosfera foram de 6,5, 4,6 e 7,0 kg ha<sup>-1</sup> nos anos de 1953, 1954 e 1955, respectivamente (Jordan & Ensminger, 1958). Vários autores citam que a contribuição dos ventos oceânicos tende a satisfazer a necessidade de S da maioria das culturas próximas a regiões costeiras. Entretanto, Blair et al. (1979b) encontraram resposta a aplicação de S em experimentos realizados com arroz irrigado a 50 m de distância do mar.

### **2.3.2. Via água de irrigação**

Os oceanos e os mares são considerados grandes depósitos de S, a maior parte sob a forma de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Segundo Trudinger (1986), a principal fonte de entrada provém dos rios (208 Tg de S ano<sup>-1</sup>). Contribuem também as deposições por via úmida (130 Tg de S ano<sup>-1</sup>) e seca (17 Tg de S ano<sup>-1</sup>) da atmosfera, a erosão do solo em regiões costeiras (7 Tg de S ano<sup>-1</sup>) e o movimento de águas subterrâneas (9 Tg de S ano<sup>-1</sup>). A intemperização de rochas e a exposição e contato direto do solo das margens com a água são as principais fontes de S dos rios e lagos (Krupa & Tabatabai, 1986). A ocorrência de S na água de irrigação nem sempre coincide com a quantidade de S proveniente da água da chuva na região. A qualidade e a quantidade das águas subterrâneas são renovadas pela

precipitação anual e são essas águas que mantêm, na maioria das vezes, a vazão dos rios e lagos. Entretanto, para atingir os depósitos subterrâneos, estas águas necessitam transpor barreiras físicas, que servem como filtros muitas vezes intransponíveis aos compostos de S (Olson & Rehm, 1986).

Para Jordan & Ensminger (1958), a água de irrigação nos Estados Unidos contém apreciável quantidade de S, sendo que em regiões da costa do Pacífico e noroeste, em solos naturalmente deficientes em S, a irrigação dá aporte suficiente desse elemento para o bom desenvolvimento dos cultivos. Para Ivanov (1983), águas continentais provenientes de rios e lagos contêm, em média, de 1 a 4 mg de S  $\text{dm}^{-3}$ , principalmente na forma de  $\text{SO}_4^{2-}$ . Entretanto, esses valores podem ser variáveis, uma vez que a maior porção de S considerada por esse autor advém da intemperização de rochas piríticas, que contribuem, em nível global, com cerca de 114 Tg de S  $\text{ano}^{-1}$ .

Dow (1976) realizou estudo onde relacionou o teor de S- $\text{SO}_4^{2-}$  na água de irrigação com a expectativa de resposta de diversos cultivos. Constatou que, em geral, teores de S- $\text{SO}_4^{2-}$  menores que 1 mg  $\text{dm}^{-3}$  são insuficientes para o bom desenvolvimento das culturas. Não houve resposta no desempenho das plantas à aplicação de S quando os teores de S- $\text{SO}_4^{2-}$  na água foram de 2 mg  $\text{dm}^{-3}$ . Pesquisadores do International Rice Research Institute – IRRI, das Filipinas, afirmaram que o arroz é capaz de absorver 54% do S contido na água utilizada para a inundação da lavoura (Tisdale et al., 1986). Wang (1979) afirma que 6,4 mg de S  $\text{dm}^{-3}$  na água são suficientes para a produção de 4,5 Mg  $\text{ha}^{-1}$  de arroz irrigado. Blair et al. (1979b) observaram deficiência de S em lavouras da Indonésia cujos teores de S- $\text{SO}_4^{2-}$  na água continham, em média, 2,8 mg  $\text{dm}^{-3}$ . Para Lefroy et al. (2005), mais importante que o teor de S na água 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.

Em uma lavoura de arroz irrigado, a dinâmica do S- $\text{SO}_4^{2-}$  na solução do solo é afetada, principalmente, por três fatores: absorção pelas raízes das plantas, perdas por lixiviação e redução a compostos de menor valência. Sendo assim, é de se esperar que os teores de S- $\text{SO}_4^{2-}$  no solo diminuam ao longo do desenvolvimento da cultura. As perdas de S- $\text{SO}_4^{2-}$  por redução, todavia, não

ocorrem instantaneamente, uma vez que, após o início do alagamento, os microorganismos anaeróbios agem, preferencialmente, sobre outros compostos oxidados, como o nitrato, por exemplo. Gao et al. (2002), estudando as reações de redox em um solo alagado cultivado com arroz irrigado, observaram um decréscimo acentuado na concentração de  $S-SO_4^{2-}$  na solução do solo, sendo que os teores variaram de cerca de  $6 \text{ mg dm}^{-3}$  antes da inundação à aproximadamente  $0,2 \text{ mg dm}^{-3}$  oito semanas após o alagamento do solo.

### **2.3.3. Via adubação mineral**

Em um passado recente, para o mercado de fertilizantes, o S foi apenas mero coadjuvante nas formulações de adubos minerais utilizados na agricultura. Entretanto, esta realidade está mudando, uma vez que é cada vez mais comum a detecção de zonas agricultáveis deficientes ou potencialmente deficientes em S ao redor do mundo. Em 1991, estimou-se que a demanda de S não realizada, no mercado mundial, foi de 6,4 milhões de toneladas e será de 10,4 milhões de toneladas em 2010 (Ceccotti, 1994). A maioria dos fertilizantes minerais que contém S disponibiliza esse elemento sob a forma inorgânica. Esta é a maneira economicamente mais viável de adicionar S nas quantidades requeridas pelos cultivos (Bohn et al., 1986).

Existe uma gama de fertilizantes desenvolvidos pela indústria que contêm enxofre. A relação custo - benefício do produto, a eficiência agronômica, assim como as facilidades no manuseio e armazenamento, devem ser considerados na aquisição do adubo. No Brasil, as duas principais fontes de S utilizadas em 2004 foram o superfosfato simples e o sulfato de amônio, representando, respectivamente, 58,4% e 41,6% do mercado de adubos sulfatados (Lopes, 2006). Em alguns países, como Austrália e Nova Zelândia, é prática comum na indústria de fertilizantes a incorporação de S elementar ao superfosfato simples, proporcionando ao produto uma fração de liberação mais lenta de S ao longo do tempo. A eficiência no suprimento de sulfato via S elementar depende de uma série de fatores incluindo tamanho de partículas, dose e método de aplicação, características do solo para oxidar o S elementar e condições do ambiente (Ceccotti, 1994). Quanto menor o tamanho da partícula,

maior será sua área superficial, o que proporcionará uma oxidação mais rápida do enxofre. Horowitz (2003) afirma que a determinação da taxa de oxidação é importante para indicar se a atividade microbiana do solo é suficiente para oxidar o S elementar a  $\text{SO}_4^{2-}$ . Pesquisadores da Universidade da Nova Inglaterra (Austrália) desenvolveram um novo conceito de fertilizante baseado na adesão de S elementar ao superfosfato triplo, DAP e uréia, sendo que o produto apresenta algumas facilidades na aplicação em solos alagados e melhor dispersão do S do grânulo, assim como distribuição espacial mais uniforme (Ceccotti, 1994).

O gesso solúvel em água é constituído de sulfato de cálcio combinado com água ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ). É obtido como subproduto de algumas atividades industriais e constitui-se numa fonte alternativa de cálcio, além de S. Alam et al. (1985), observando diferentes fontes de S às plantas de arroz, concluíram que a melhor delas é o sulfato de amônio, pois obtiveram os maiores rendimentos com esse fertilizante. Esta idéia não é compartilhada por Mandal et al. (1997), que obtiveram resultados superiores com gesso agrícola. Fan & Messick (1997) citam a realização de 112 ensaios na China, nos quais foi avaliada a resposta de diferentes cultivos, incluindo arroz, a diferentes fontes de enxofre (sulfato de amônio, gesso, enxofre elementar e superfosfato simples), nas doses de 20 a 30  $\text{kg ha}^{-1}$ , com resposta significativa à adição de qualquer fonte em 91% dos experimentos.

Além das fontes citadas, existem outras, menos usadas, mas que também podem servir como provedoras de S aos cultivos, como o sulfato fosfato de amônio (13% de S); uréia sulfatada (10% de S); sulfato de potássio (18% de S); sulfato de potássio e magnésio (22% de S), entre outros (Hagstrom, 1986). Independentemente da fonte a ser usada, a efetividade do S aplicado, em termos de ganhos em produtividade, depende do momento de aplicação, de modo a haver coincidência entre a maior disponibilização de  $\text{SO}_4^{2-}$  por parte do fertilizante e a maior demanda da cultura; além disso, quanto mais próximo da rizosfera for depositado o  $\text{SO}_4^{2-}$ , maior será o seu aproveitamento por parte da planta de arroz (Lefroy et al., 2005).

#### **2.4. Resposta do arroz irrigado à aplicação de enxofre**

O arroz irrigado não requer a adição de elevadas quantidades de S para obtenção de altas produtividades. Isto, como foi visto, se deve aos aportes de enxofre advindos da matéria orgânica do solo, da precipitação e da água de irrigação, especialmente de fontes hídricas subterrâneas. Entretanto, os sintomas de deficiência se agravam quando altas doses de nitrogênio, fósforo, potássio e outros nutrientes são aplicados. A necessidade de enxofre para os cultivos pode ser determinada de acordo com a quantidade de nitrogênio e fósforo aplicadas. Bixby & Beaton (1970) afirmam que, em solos onde N e S são limitantes, a aplicação de sete partes de N para uma de S é suficiente para a maioria dos cultivos, inclusive o arroz. Já, a relação P:S, segundo esses autores, deve ser de 1,3:1. Estas relações são válidas apenas quando se aportam as quantidades suficientes dos demais nutrientes para o bom desenvolvimento dos cultivos.

A maior parte da pesquisa em torno das limitações causadas pela deficiência de enxofre ao cultivo de arroz irrigado é realizada em zonas tropicais, cujos solos sofrem um processo de avançado intemperismo. Países asiáticos altamente consumidores desse cereal, como China, Indonésia, Bangladesh, Tailândia, Japão, Filipinas, Índia e Vietnã, possuem extensas áreas passíveis de apresentar o problema. Portanto, grande parte dos trabalhos publicados sobre este tema advém da Ásia. Em Bangladesh, por exemplo, a primeira identificação de deficiência de S em arroz irrigado se deu no ano de 1978, quando a aplicação de 20 kg de S ha<sup>-1</sup> resultou num acréscimo em produtividade de 0,5 a 1,0 Mg ha<sup>-1</sup> (Beaton & White, 1997). Blair et al. (1979a) conduziram 18 ensaios em diferentes locais da província de Sulawesi, Indonésia, onde concluíram que a grande variabilidade de resposta à aplicação de enxofre derivava dos diversos materiais de origem dos solos nos quais foram realizados os trabalhos. Os autores obtiveram respostas à adição de enxofre com incremento de rendimento de grãos de até 278% e média de 18,6% nos diferentes locais. Mandal et al. (1997), no Estado de Bengal do Oeste, Índia, concluíram que, independentemente da fonte, doses de 20 kg de S ha<sup>-1</sup> incrementaram as produtividades entre 20,1 e 30,4%, além de prevenir o amarelecimento das folhas no estágio inicial de crescimento. Esses mesmos autores indicaram que os ganhos em produtividade, entretanto,

foram significativamente maiores com a adição de  $\text{CaSO}_4$  e  $\text{MgSO}_4$  em relação ao S elementar, sem citar, todavia, os teores de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$  nos solos estudados. Diferentes fontes de enxofre, na dose de 15 kg de S  $\text{ha}^{-1}$ , aumentaram significativamente o conteúdo de sulfato nos tecidos da planta de arroz em todos os estágios de crescimento do cultivo, além de aumentar, também, a quantidade de enxofre disponível no solo (Alam et al., 1985).

Segundo Fox & Blair (1986), a maior causa da redução do rendimento do arroz em função da deficiência de S se dá pela redução no perfilhamento das plantas. Em solos deficientes da Indonésia, onde o arroz apresentava baixo perfilhamento, a aplicação de 80 kg de S  $\text{ha}^{-1}$  resultou em um aumento no número de perfilhos, no sistema de transplante, de 4,1 por cova na testemunha, a 14,9 por cova quando da sua adição ao solo (Blair et al., 1979b). O melhor aproveitamento do S aplicado se dá entre a semeadura ou transplante e o máximo perfilhamento, pois o S influi na formação dos perfilhos e no número de panículas (Lefroy et al., 2005).

Além da Ásia, alguns países da América Latina também vêm dando ênfase ao estudo do enxofre, mais recentemente. Embora o mercado dos países latino-americanos (inclusive o Brasil) tenha à sua disposição cultivares de arroz irrigado com alto potencial produtivo há décadas, somente de alguns anos para cá, devido aos avanços nas práticas de manejo do solo e da cultura, os orizicultores têm conseguido atingir este potencial em nível de lavoura. Entretanto, para alcançar rendimentos satisfatórios, eventualmente a aplicação de enxofre pode ser requerida. Na Colômbia, as variedades Colombia XXI, Fedearroz 2000 e Fedearroz 50 responderam significativamente a aplicação de S elementar em um solo franco com  $6,2 \text{ mg dm}^{-3}$  de  $\text{S-SO}_4^{2-}$ , sendo que houve incremento de mais de  $2,3 \text{ Mg ha}^{-1}$  em relação à testemunha na dose de  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  de S nos tratamentos com a variedade Fedearroz 50 (Medina, 2003). Resultado semelhante foi obtido por Riobueno (2003), em um solo com  $2 \text{ mg dm}^{-3}$ , que observou melhor resposta em rendimento da variedade Fedearroz 2000, quando da aplicação de  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  de S elementar, resultando em mais de uma tonelada de vantagem em relação à testemunha sem enxofre. Nos Estados Unidos, segundo Wilson et al. (2006), a aplicação de  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  de sulfato de amônio ( $24 \text{ kg S ha}^{-1}$ ) é suficiente para

suprir as necessidades do arroz irrigado, em caso de deficiência. Valor semelhante foi sugerido por Bixby & Beaton (1970), que estimam que uma lavoura com potencial produtivo de 8 Mg ha<sup>-1</sup> demanda cerca de 20 kg de S ha<sup>-1</sup>; 151 kg de N ha<sup>-1</sup>, 57 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>; 181 kg de K<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup> e 17 kg de Mg ha<sup>-1</sup>.

Os teores críticos de enxofre para o arroz irrigado obtidos por diversos pesquisadores em nível mundial, que utilizaram o método de extração por solução de Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>, variam entre 7 e 11 mg dm<sup>-3</sup>, com uma média de 9 mg dm<sup>-3</sup> (Neue & Mamaril, 1984). Esses valores são superiores ao teor crítico de 5 mg dm<sup>-3</sup>, adotado para as culturas pouco exigentes desse nutriente, e próximo dos 10 mg dm<sup>-3</sup> adotado para as culturas exigentes, no sul do Brasil (CFQS RS/SC, 2004). Armbruster et al., (1993), trabalhando em solos da região dos cerrado brasileiros, cujos teores de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> variavam entre 6 e 8 mg dm<sup>-3</sup>, testaram a resposta do arroz à aplicação de 15 e 30 kg de S ha<sup>-1</sup> e obtiveram incrementos em rendimento de grãos em oito dos 9 locais em estudo, sendo que a média de acréscimo foi de 16%.

O enxofre elementar também é importante agente acidificante do solo (Wainwright, 1984), podendo ser utilizado em solos alcalinos. A aplicação de S elementar em áreas alcalinas do Estado de Arkansas mostrou-se efetiva na redução do pH do solo, resultando em incrementos de rendimento em lavouras com histórico de problemas relacionados à alto pH (Wilson et al., 2006). Como consequência da alteração da acidez do solo, a disponibilidade de outros nutrientes, como manganês e zinco, foi aumentada com tal prática. (Bixby & Beaton, 1970).

Tendo em vista os incrementos de rendimento obtidos com a prática de adubação sulfatada em algumas lavouras de arroz irrigado da Depressão Central do RS, faz-se necessário um maior aprofundamento do tema, por parte da pesquisa, com a finalidade de se estabelecer a real necessidade de S para o arroz irrigado, uma vez que teores desse elemento no solo, antes considerados suficientes, agora podem não suprir as demandas do cultivo nos novos patamares de produtividade alcançados no RS.

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1. Escolha dos locais**

A escolha dos locais para instalação dos experimentos, que foram realizados nas safras 2004/05 e 2005/06, foi feita com base em uma amostragem prévia dos solos de 41 lavouras de produtores envolvidos no Programa de Transferência de Tecnologia para Altas Produtividades em Arroz Irrigado, do Convênio IRGA/FLAR/CFC, em diferentes municípios da Depressão Central do RS. Buscaram-se áreas com teores que contemplassem quatro faixas pré - estabelecidas de teores de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> no solo: 0 – 5,0 mg dm<sup>-3</sup>; 5,1 – 10,0 mg dm<sup>-3</sup>; 10,1 – 15,0 mg dm<sup>-3</sup> e mais de 15 mg dm<sup>-3</sup>. No total, selecionaram-se 19 áreas com teores de S na camada superficial de 0 – 20 cm variando de 2,0 à 19 mg dm<sup>-3</sup>. Em seis locais, na safra de 2004/05, e em um local, na safra 2005/06, os experimentos não puderam ser aproveitados, em função da alta infestação de arroz vermelho nas parcelas, decorrente de problemas diversos, como má sistematização do solo, problemas no sistema de irrigação da lavoura e momento inoportuno para o controle de invasoras (aplicação tardia de herbicidas).

#### **3.2. Instalação dos ensaios**

Os experimentos foram desenvolvidos em 11 propriedades rurais da Depressão Central do Rio Grande do Sul e um na Sub-Estação Experimental do IRGA, na barragem Capané, em Cachoeira do Sul. Os municípios onde os ensaios foram desenvolvidos são os seguintes:

- Restinga Seca: seis locais, dois em 2004/05 e quatro em 2005/06;
- Cachoeira do Sul: três locais, dois em 2004/05 e um em 2005/06;
- Rio Pardo: dois locais, em 2004/05;

- Minas do Leão: um local, em 2005/06.

### **3.3. Caracterização dos solos estudados**

As áreas experimentais foram implantadas em Gleissolos Háplicos, à exceção da barragem do Capané – IRGA, que foi um Planossolo Hidromórfico Eutrófico típico, unidade de mapeamento Vacacaí, e da área utilizada em Minas do Leão, um Planossolo Hidromórfico. Alguns dos atributos químicos e o teor de argila dos solos, após a adubação de base, nos dois anos, estão apresentados na Tabela 1, e ordenados de forma crescente de acordo com o teor de  $S-SO_4^{2-}$  no solo.

### **3.4. Adubação e manejo empregados**

Utilizaram-se os cultivares IRGA 422 CL em 11 áreas e IRGA 417 em uma das áreas (Rio Pardo I). O sistema de cultivo adotado foi o semi-direto. Todas as lavouras foram semeadas mecanicamente em linha e dentro da época considerada ideal para cultivares de ciclo precoce, ou seja, de 15 de outubro a 15 de novembro, visando a coincidência do período reprodutivo com o de máxima disponibilidade de radiação no ambiente (Mariot et al., 2005). A densidade de semeadura utilizada foi de  $80 \text{ kg ha}^{-1}$  (Pulver & Carmona, 2003), sendo que as sementes receberam tratamento com inseticida à base de fipronil, para prevenir a infestação de *Oryzophagus oryzae*, a bicheira-da-raiz (Pulver et al., 2005). O controle de plantas invasoras foi feito através de herbicidas específicos e se deu no estágio de desenvolvimento V3 - V4.

Por ocasião da adubação de base, foram aplicados mecanicamente  $50 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$ , via MAP, na linha de semeadura, dose esta que contempla a quantidade de fósforo exportada pelo arroz irrigado (Bixby & Beaton, 1970; Machado & Pöttker, 1979; Pulver & Carmona, 2003). A adubação potássica foi realizada mecanicamente em cobertura e seguiu a recomendação do Projeto de Transferência de Tecnologia para Altas Produtividades do Convênio IRGA/FLAR/CFC visando à obtenção do máximo rendimento. As doses aplicadas

TABELA 1. Atributos químicos e teor de argila dos solos utilizados nas safras de 2004/05 e 2005/06

Locais	pH	pH	Argila	Matéria orgânica	P <sup>(3)</sup> disponível	K <sup>(3)</sup> disponível	S- SO <sub>4</sub> <sup>(4)</sup>	Cátions trocáveis <sup>(5)</sup>		
	água (1:1)	SMP						Ca	Mg	Al
			.....g dm <sup>-3</sup> .....		.....mg dm <sup>-3</sup> .....		.....cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> .....			
1. Restinga Seca I <sup>(2)</sup>	4,7	5,9	100	13	18	88	2,0	0,6	0,4	3,1
2. Cachoeira do Sul I <sup>(1)</sup>	4,9	6,7	120	6	29	104	4,5	1,0	0,3	0,6
3. Minas do Leão <sup>(2)</sup>	4,4	6,0	100	11	6	89	6,4	1,0	0,7	2,8
4. Restinga Seca II <sup>(2)</sup>	4,9	6,2	90	9	9	50	6,6	1,9	1,0	1,4
5. Rio Pardo I <sup>(1)</sup>	5,3	7,0	150	16	21	104	6,7	3,3	0,9	0,2
6. Rio Pardo II <sup>(1)</sup>	5,9	7,1	130	15	29	87	7,3	3,2	1,0	0,1
7. Restinga Seca III <sup>(1)</sup>	4,4	5,5	320	15	5	74	9,4	2,3	0,9	2,0
8. Restinga Seca IV <sup>(1)</sup>	4,4	6,2	160	11	6	83	9,6	1,4	0,5	0,5
9. Restinga Seca V <sup>(2)</sup>	4,7	6,2	90	8	7	68	13,4	1,6	1,1	2,4
10. Cachoeira do Sul II <sup>(2)</sup>	4,5	5,7	230	14	4	72	15,6	2,4	2,7	3,6
11. Restinga Seca VI <sup>(2)</sup>	4,3	4,8	290	32	4	97	16,5	4,3	1,6	8,7
12. Cachoeira do Sul III <sup>(1)</sup>	4,2	5,9	280	15	13	65	19,0	2,3	0,7	2,2

<sup>(1)</sup> Safra 2004/05; <sup>(2)</sup> Safra 2005/06; <sup>(3)</sup> Miehlich I; <sup>(4)</sup> Extrator Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>, 500 mg dm<sup>-3</sup> de P; <sup>(5)</sup> Extrator KCl 1 mol L<sup>-1</sup>.

variaram de 80 a 120 kg de  $K_2O$   $ha^{-1}$ , na forma de KCl, em função do teor de K no solo.

### **3.5. Tratamentos, dimensão das parcelas e delineamento experimental**

Os tratamentos foram aplicados no estágio de desenvolvimento V3 – V4 (três a quatro folhas totalmente desenvolvidas) do arroz irrigado, e constaram da adição manual em cobertura de 0, 10, 20, 40 e 80 kg de S  $ha^{-1}$ , na forma de sulfato de amônio. A dose de N aplicada, juntamente com o sulfato de amônio, foi de 200 kg  $ha^{-1}$  na safra 2004/05 e de 150 kg  $ha^{-1}$  na safra 2005/06, na forma de uréia, em complementação ao sulfato de amônio aplicado nos tratamentos. Em adição, foi aplicada mecanicamente a quantidade de 10 kg de N  $ha^{-1}$  na linha de semeadura, na forma de MAP.

No ano agrícola de 2004/05, os experimentos foram conduzidos em parcelas de 24 m<sup>2</sup> (6 x 4 m), dispostas em blocos ao acaso, com espaçamento de 1,5 m entre as parcelas e três repetições. No ano agrícola de 2005/06, as parcelas tiveram a dimensão de 75 m<sup>2</sup> (10 x 7,5 m), delineadas em blocos ao acaso, com espaçamento de 3 m entre parcelas, com quatro repetições. O tamanho das parcelas foi aumentado, devido à grande variabilidade dos solos submetidos ao nivelamento (Figuras 1 e 2), buscando contemplar essa variação do terreno. A entrada d'água ocorreu, no máximo, oito horas após a implantação dos experimentos, no estágio de desenvolvimento V3 – V4, mantendo-se uma lâmina de água de 5 a 10 cm até a fase de maturação fisiológica do cultivo.

### **3.6. Amostragens e determinações**

As amostragens do solo foram realizadas após a adubação de base e imediatamente antes da aplicação dos tratamentos. Na safra agrícola de 2004/05, foram retiradas cinco sub-amostras de solo em cada bloco, com trado rosca, na camada de 0-20 cm de profundidade, compondo uma amostra por bloco. Na safra seguinte, foram retiradas, com trado calador, três sub-amostras de solo por parcela em três profundidades (0 – 10 cm, 10 – 20 cm e 20 – 30 cm), compondo



FIGURA 1. Ilustração da variabilidade de solos submetidos ao nivelamento. Restinga Seca, safra 2005/06.



FIGURA 2. Ilustração da variabilidade de solos submetidos ao nivelamento. Cachoeira do Sul, safra 2005/06.

três amostras por parcela, uma em cada profundidade, para determinação dos teores de  $S-SO_4^{2-}$  e de argila. Para a determinação dos demais atributos, misturou-se o solo das amostras das quatro repetições do tratamento testemunha, nas profundidades de 0-10 cm e 10-20 cm, compondo, assim, uma amostra representativa da camada de 0-20 cm.

Na safra 2005/06, foram instalados coletores de solução do solo (Figuras 3 e 4), nas parcelas que receberam a aplicação de 0, 20 e 40 kg de S  $ha^{-1}$  em Restinga Seca II (Tabela 1). O equipamento, desenvolvido por Bohnen et al. (2005), consiste de um tubo de PVC que serve como suporte; uma mangueira de plástico, introduzida dentro do tubo suporte em uma das extremidades e conectada ao tubo coletor e que é revestido por uma tela de nylon nas duas extremidades, sendo posicionado a 5 cm de profundidade no solo. As coletas foram realizadas com seringas de 60 ml, sendo que o volume coletado foi de aproximadamente 30 ml em cada parcela. Tais coletas de solução, para análise do teor de  $S-SO_4^{2-}$ , foram realizadas em três momentos: aos 14 dias após o alagamento (14 DAI), aos 28 DAI e na iniciação do primórdio floral (IP).

Também, por ocasião da aplicação dos tratamentos, foi iniciada a coleta de amostras da água de irrigação das lavouras, a qual ocorreu imediatamente após a entrada d'água nos quadros, aos 14 DAI, aos 28 DAI e na IP. A coleta foi efetuada no ponto de entrada mais próximo do local de implantação dos experimentos, sendo a irrigação das áreas experimentais proveniente do manancial, 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 L de água em garrafas PET, que eram imediatamente 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 pelos produtores foram os seguintes: barragem (Cachoeira do Sul II e Minas do Leão), Rio Jacuí (Restinga Seca VI), Rio Vacacaí Mirim (Restinga Seca I) e Rio Vacacaí (Restinga Seca II e V).

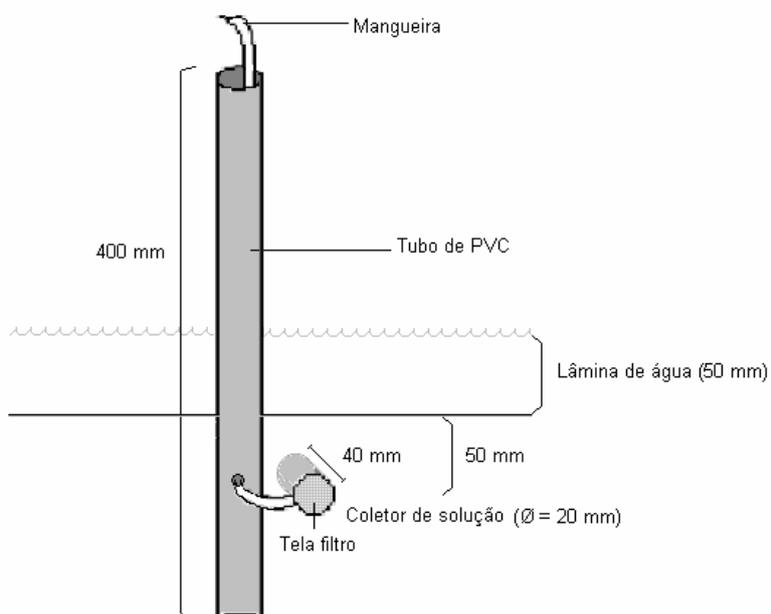


FIGURA 3. Representação esquemática de coletor de solução do solo (Adaptado de Bohnen et al., 2005).



FIGURA 4. Coletor de solução do solo instalado a campo. Restinga Seca II, safra 2005/06.

Na safra 2005/06, foram feitas, também, coletas de plantas de arroz para a determinação da biomassa da parte aérea em dois períodos de desenvolvimento do cultivo: aos 14 DAI e aos 28 DAI. Em Cachoeira do Sul II, ambas as coletas foram retardadas em sete dias, em função do estabelecimento irregular da cultura; em Minas do Leão, apenas a primeira coleta foi retardada em uma semana, pela incidência de algas. O material foi cortado rente à superfície do solo com foice. Foram coletadas duas linhas com bom estande, 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  $\sim 50^{\circ}\text{C}$ . Após secas, as amostras foram pesadas e moídas, para análise do teor de S no tecido. Por ocasião do pleno florescimento das lavouras, foi feita a coleta de 30 folhas bandeira por parcela. O material vegetal foi seco em estufa à temperatura de  $\sim 50^{\circ}\text{C}$  e moído para análise do teor de S.

### **3.6.1. Análise dos teores de enxofre e demais atributos**

O  $\text{S-SO}_4^{2-}$  nas amostras de solo foi extraído por  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ ,  $500 \text{ mg dm}^{-3}$ , e determinado por turbidimetria (Tedesco et al., 1995). A análise desse nutriente nas amostras de solo da safra 2004/05 foi efetuada no Laboratório de Análises da Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC). As análises do teor de argila e dos demais atributos químicos, matéria orgânica, fósforo e potássio disponíveis (Mielhich I), cálcio, magnésio e alumínio trocáveis ( $\text{KCl } 1 \text{ mol L}^{-1}$ ) e pH em água e pH SMP, foram realizadas no Laboratório de Análises de Solos do IRGA. Todas as análises de solo (solução e fase sólida), de água e de tecido vegetal, referentes à safra 2005/06, foram realizadas nos Laboratórios de Química e Fertilidade do Solo do Departamento de Solos da UFRGS. Essas análises, em ambas as safras, seguiram procedimentos descritos por Tedesco et al. (1995).

### **3.6.2. Rendimento de grãos**

Ao final do ciclo da cultura, na safra 2004/05, foi feita a colheita manual dos ensaios em uma área de  $12 \text{ m}^2$  ( $3 \times 4 \text{ m}$ ) em cada parcela. Na safra seguinte, a área colhida foi de  $5 \text{ m}^2$  ( $2 \times 2,5 \text{ m}$ ). 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%.

### 3.6.3. Análise do teor de enxofre nos grãos

Após a determinação do peso dos grãos, foi separada, aleatoriamente, a quantidade de 1 kg de grãos, por parcela, para a determinação do teor de S. As amostras foram secas em estufa até atingirem peso constante, sendo, posteriormente, moídas e armazenadas até o momento do procedimento laboratorial, seguindo descrição de Tedesco et al. (1995).

### 3.7. Análises estatísticas

Os resultados de biomassa da parte aérea, S absorvido e rendimento de grãos, foram submetidos à análise de regressão, com o auxílio dos programas SIGMAPLOT e ESTAT. Utilizaram-se as equações polinomiais de primeiro ou segundo grau que melhor se ajustaram aos dados, sendo apresentada a significância estatística da regressão juntamente com o coeficiente de determinação. Foram plotados no plano cartersiano dos gráficos apenas os valores médios, embora a análise estatística tenha sido realizada com os valores de todas as repetições. Para melhor visualizar as diferenças entre os valores apurados entre os locais e os tratamentos dentro de cada local, os resultados da quantidade de S no tecido, de S nos grãos e de S exportado pelos grãos foram submetidos a análise de variância, e as médias, comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro, com o auxílio do programa SISVAR.

### 3.8 Curva de calibração e teor crítico de enxofre no solo

A determinação do teor crítico do  $S-SO_4^{2-}$  no solo seguiu modelo proposto por Cate & Nelson (1965) e foi determinado a partir do rendimento relativo médio obtido nos tratamentos testemunha em relação aos rendimentos máximos obtidos nos tratamentos (Equação 10).

$$RR (\%) = \frac{\text{Rendimento sem a adição de S}}{\text{Rendimento máximo para as doses de S testadas}} \times 100 \quad (10)$$

A curva de calibração e o teor crítico foram obtidos a partir da relação entre os teores de  $S-SO_4^{2-}$  determinados no solo e os respectivos valores de rendimento relativo calculados na Equação 10.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A apresentação dos resultados segue a seqüência cronológica dos eventos da safra 2005/06, uma vez que, na safra anterior, o trabalho se resumiu em determinar o teor de  $S-SO_4^{2-}$  do solo e os rendimentos obtidos com a adição de cinco doses de S ao solo. Isto foi feito para atender uma demanda identificada no Programa de Transferência de Tecnologia para Altas Produtividades, do Convênio IRGA/FLAR/CFC, na safra 2003/04, na região da Depressão Central do RS.

### 4.1. Relação entre os teores de argila, de enxofre e de matéria orgânica em profundidade no solo

Verificou-se, como referido anteriormente, uma grande variabilidade nos teores iniciais de  $S-SO_4^{2-}$  no solo, que ficaram entre 2,0 e 19,0 mg  $dm^{-3}$ , considerando-se os diferentes locais e safras (Tabela 1). Os teores de argila variaram entre 90 e 320 g  $dm^{-3}$  e os de matéria orgânica (MOS), entre 6 e 32 g  $dm^{-3}$ . Esta variabilidade foi buscada, no momento da escolha dos locais para implantação dos experimentos, para verificar a resposta do arroz irrigado à adição de enxofre em solos diferenciados nesses atributos. Os baixos teores de  $S-SO_4^{2-}$ , de argila e de MOS da maioria dos solos podem ser atribuídos, em adição à sua condição natural, às práticas de manejo antes utilizadas, especialmente no sistema de cultivo pré-germinado.

Atualmente, práticas de manejo mais conservacionistas do solo utilizado com arroz irrigado vêm sendo adotadas na Depressão Central. Entretanto, durante muitos anos, o sistema de cultivo pré-germinado foi utilizado em função da alta infestação por arroz vermelho dos solos daquela região. Esse fato pode ser um

dos determinantes dos baixos índices de  $S-SO_4^{2-}$  encontrados em algumas áreas. O próprio material de origem daqueles solos e o cultivo de arroz irrigado, ano após ano, em muitas lavouras, também contribuem para potencializar a possível deficiência de S.

As determinações dos teores de  $S-SO_4^{2-}$ , de argila e de MOS, em diferentes profundidades, foram feitas visando verificar a sua relação no solo (Tabela 2). Isto, porque Bissani (1985) encontrou maiores teores de S disponível na camada de 20 – 40 cm em seis planossolos do RS, o que foi relacionado ao maior teor de argila e menor teor de MOS nessa camada, quando comparada à de 0 – 20 cm.

Considerando-se que o teor de argila do solo tende, naturalmente, a aumentar em profundidade, esperava-se que os teores de  $S-SO_4^{2-}$  também aumentassem nos solos dos experimentos, uma vez que esse íon é passível de lixiviação do horizonte superficial do solo, adsorvendo-se às cargas positivas de óxidos de ferro e alumínio em horizontes sub-superficiais (Ensminger, 1954; Jordan & Ensminger, 1958; Hingston et al., 1972). Entretanto, no presente estudo, isso não ocorreu. Na maioria dos locais amostrados (Tabela 2), o teor de  $S-SO_4^{2-}$  na camada de 20 – 30 cm foi inferior aos valores existentes nas camadas de 0 – 10 cm e 10 – 20 cm, embora a quantidade de argila, como esperado, tenha aumentado, com uma única exceção feita à Restinga Seca V. Isto pode ter ocorrido pelo maior período de saturação na camada de solo de 20 – 30 cm, caracterizando um ambiente de redução do solo e transformando o  $S-SO_4^{2-}$  aportado à essa camada, via lixiviação, a  $H_2S$  (Jordan & Ensminger, 1958; Chaitep et al., 1994). Por se tratarem de solos de várzea, a camada de 20 – 30 cm provavelmente passa por períodos de redução mais prolongados do que a camada de 0 – 20 cm, em especial durante o inverno e primavera, estações tipicamente chuvosas, caracterizando um ambiente de redução propício ao desenvolvimento de microorganismos anaeróbios que utilizam o  $S-SO_4^{2-}$  no metabolismo, resultando na volatilização do S reduzido a  $H_2S$  (Lefroy et al., 2005) na porção de solo amostrada mais profundamente.

TABELA 2. Teores de argila, de matéria orgânica e de  $S-SO_4^{2-}$  em profundidade em diferentes locais da Depressão Central do RS. Safra 2005/06

Locais	Camada de solo cm	Argila .....g dm <sup>-3</sup> .....	Matéria orgânica .....g dm <sup>-3</sup> .....	S-SO <sub>4</sub> <sup>(1)</sup> mg dm <sup>-3</sup>
1. Restinga Seca I	0 - 10	100	11	2,2
	10 - 20	100	10	1,8
	20 - 30	120	5	1,2
2. Minas do Leão	0 - 10	100	11	6,2
	10 - 20	100	12	6,5
	20 - 30	110	6	5,6
3. Restinga Seca II	0 - 10	80	11	7,2
	10 - 20	100	6	6,1
	20 - 30	110	4	6,3
4. Restinga Seca V	0 - 10	100	8	11,9
	10 - 20	90	6	14,8
	20 - 30	90	5	14,2
5. Cachoeira do Sul II	0 - 10	210	14	16,7
	10 - 20	240	11	14,6
	20 - 30	270	9	10,2
6. Restinga Seca VI	0 - 10	260	40	16,5
	10 - 20	310	33	16,5
	20 - 30	350	24	10,5

<sup>(1)</sup> Extrator  $Ca(H_2PO_4)_2$ , 500 mg dm<sup>-3</sup> de P.

O teor de matéria orgânica do solo, de modo geral, diminuiu à medida que se avançou em profundidade, apresentando dinâmica semelhante à do  $S-SO_4^{2-}$ . Bissani (1985) também observou esse comportamento, salientando que o teor de S orgânico, uma das fontes de  $S-SO_4^{2-}$  no solo, segue essa tendência. Isto também pode justificar a diminuição dos teores de S disponível nas camadas mais profundas do perfil dos solos estudados. Os solos com menores quantidades de argila, Restinga Seca I, II e V e Minas do Leão, foram também os que apresentaram os menores teores de matéria orgânica e de  $S-SO_4^{2-}$ .

#### 4.2. Dinâmica do enxofre na solução do solo, em função de sua adição, e teor de S na água de irrigação ao longo do desenvolvimento do cultivo

Conforme referido anteriormente, no item Material e Métodos, este estudo foi realizado somente em Restinga Seca II, na safra 2005/06. O tratamento testemunha (Figura 5) já, na primeira medição, 14 dias após o início do

alagamento, apresentou teor médio de  $2,9 \text{ mg dm}^{-3}$ . No tratamento onde fora aplicada a dose de  $40 \text{ kg de S ha}^{-1}$ , o teor de  $\text{S-SO}_4^{2-}$  era de  $7,9 \text{ mg dm}^{-3}$  aos 14 DAI, o que permite supor que o S aplicado já estava, nesse momento, prontamente disponível às plantas. Mesma inferência, contudo, não pode ser feita analisando o teor de  $\text{S-SO}_4^{2-}$  extraído da solução do solo no tratamento de  $20 \text{ kg de S ha}^{-1}$ , visto que o valor apurado aos 14 DAI,  $2,8 \text{ mg dm}^{-3}$ , foi semelhante à testemunha. Entretanto, na segunda medição, aos 28 DAI, houve um incremento relacionado aos tratamentos, uma vez que, com 0, 20 e  $40 \text{ kg de S ha}^{-1}$ , os teores de  $\text{S-SO}_4^{2-}$  obtidos foram de, respectivamente, 1,78; 1,85 e  $3,59 \text{ mg dm}^{-3}$ . No entanto, houve, nos três tratamentos, redução nos teores de  $\text{S-SO}_4^{2-}$  na solução do solo ao longo do desenvolvimento da cultura, com todos atingindo valores semelhantes na IP, indicando que a maior parte do S aplicado ao solo foi absorvido pelas plantas, lixiviado ou reduzido. Esses teores, entretanto, ainda ficam acima dos obtidos por Gao et al. (2002), de  $0,2 \text{ mg dm}^{-3}$  após oito semanas de alagamento, intervalo de tempo equivalente ao da última medição, no presente estudo.

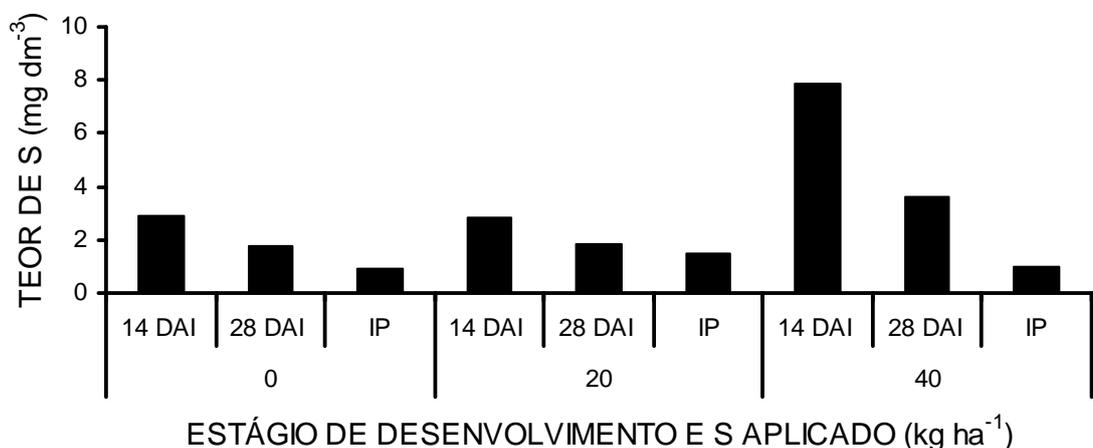


FIGURA 5. Teor de enxofre na solução do solo cultivado com arroz irrigado em função da adição de doses de enxofre, em diferentes estágios de desenvolvimento do cultivo. Restinga Seca II, safra 2005/06.

No presente estudo, nos seis locais da safra 2005/06, o sistema de cultivo (semi-direto) e o cultivar (IRGA 422 CL), de ciclo precoce, foram os

mesmos. Portanto, considera-se que a quantidade de água utilizada na irrigação dos diferentes experimentos foi semelhante.

Na avaliação dos aportes de  $S-SO_4^{2-}$ , via água de irrigação, em quatro momentos do desenvolvimento do cultivo (Tabelas 3 e 4), obtiveram-se valores muito variáveis entre as diferentes fontes estudadas no momento de amostragem. O teor de  $S-SO_4^{2-}$  na água dos rios variou de 0,30 à 3,94  $mg\ dm^{-3}$ , à semelhança do observado por Ivanov (1983), que obteve valores de 1 a 4  $mg\ dm^{-3}$ . A água do Rio Vacacaí foi a que apresentou os maiores teores de S, como pode ser verificado em Vacacaí I. Em Vacacaí II, o manancial e a data das amostragens foram os mesmos, entretanto os teores foram menores. Ressalva-se que, ao contrário de 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  $S-SO_4^{2-}$  aportado do rio. Dão sustentação a essa suposição, os teores de  $S-SO_4^{2-}$  observados na água na Fazenda Monjolo e Capané (Tabela 4), cujos mananciais foram barragens, com teores que variaram de 0,41 à 1,10  $mg\ dm^{-3}$ , valores esses inferiores aos teores médios obtidos em rios, que foram de 1,52 a 2,01  $mg\ dm^{-3}$ .

Era de se esperar que a concentração de  $S-SO_4^{2-}$  na água aumentasse à medida que se avançasse no tempo, pela diminuição gradual dos níveis dos rios e barragens; entretanto, isso ocorreu apenas em um dos mananciais, em Vacacaí I. À época dos experimentos, verificaram-se, no RS, volumes de chuva abaixo da média histórica nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro. Além disso, nessa época do ano, verifica-se também uma demanda maior de água tanto no meio urbano, pela temperatura mais elevada, quanto no rural, principalmente para irrigação de lavouras de arroz. Entretanto, mesmo com o nível dos rios e barragens mais baixos ao longo do desenvolvimento das áreas experimentais, verificaram-se, em geral, valores de  $S-SO_4^{2-}$ , na água de irrigação, mais elevados no momento da implantação dos experimentos, em comparação às medições feitas na IP, comparando-se os valores médios obtidos na água tanto dos rios, quanto dos açudes. A diminuição mais acentuada verificou-se na água

proveniente do Rio Jacuí, onde se apuraram teores de  $S-SO_4^{2-}$  de  $3,38 \text{ mg dm}^{-3}$  na implantação e  $0,86 \text{ mg dm}^{-3}$  na IP.

TABELA 3. Teor de  $S-SO_4^{2-}$  na água de irrigação de rios, em diferentes estágios de desenvolvimento do arroz irrigado. Safra 2005/06

Rios	S-SO <sub>4</sub>				Média
	Implantação	14 DAI	28 DAI	IP	
	.....mg dm <sup>-3</sup> .....				
1. Vacacaí Mirim <sup>(1)</sup>	1,56	1,21	1,99	1,89	1,64
2. Vacacaí I <sup>(2)</sup>	1,86	2,33	3,94	3,68	2,95
3. Vacacaí II <sup>(3)</sup>	0,67	0,87	1,02	0,30	0,71
4. Jacuí <sup>(4)</sup>	3,38	1,68	1,08	0,86	1,75
Média	1,87	1,52	2,01	1,68	

<sup>(1)</sup> Restinga Seca I; <sup>(2)</sup> Restinga Seca II; <sup>(3)</sup> Restinga Seca V; <sup>(4)</sup> Restinga Seca VI.

TABELA 4. Teor de  $S-SO_4^{2-}$  na água de irrigação de barragens em diferentes estágios de desenvolvimento do arroz irrigado. Safra 2005/06

Barragens	S-SO <sub>4</sub>				Média
	Implantação	14 DAI	28 DAI	IP	
	.....mg dm <sup>-3</sup> .....				
1. Fazenda Monjolo <sup>(1)</sup>	nd <sup>(3)</sup>	0,60	0,41	0,46	0,49
2. Capané <sup>(2)</sup>	0,80	1,10	0,66	0,45	0,75
Média	0,80	0,85	0,53	0,45	

<sup>(1)</sup> Minas do Leão; <sup>(2)</sup> Cachoeira do Sul II; <sup>(3)</sup> não determinado.

Segundo Dow (1976), o aporte de  $2,0 \text{ mg dm}^{-3}$  de  $S-SO_4^{2-}$  via água de irrigação seria suficiente para suprir as demandas por S da maioria dos cultivos. Entretanto, em trabalho realizado na Indonésia, Blair et al. (1979b) observaram sintomas de deficiência de S em arroz irrigado cuja água de irrigação continha, em média,  $2,8 \text{ mg dm}^{-3}$  de  $S-SO_4^{2-}$ . Considerando-se que Wang (1979) obteve uma produção de arroz irrigado inferior a  $5,0 \text{ Mg ha}^{-1}$  utilizando fontes hídricas com teores médios de  $6,4 \text{ mg dm}^{-3}$ , supõe-se que nenhum dos rios e barragens avaliados no presente estudo seria capaz de suprir S em quantidade suficiente para altas produtividades de arroz irrigado.

### **4.3. Crescimento do arroz irrigado e absorção de enxofre em função de sua adição ao solo**

Os resultados da biomassa da parte aérea (BPA) do arroz irrigado em diferentes períodos de desenvolvimento estão apresentados nas Figuras 6 e 7. Adotaram-se os períodos de amostragem aos 14 DAI e aos 28 DAI, por mera questão de equidistância temporal, pois, em cultivares de ciclo precoce (120 dias), o estágio vegetativo tem cerca de 60 dias. Como a aplicação dos tratamentos se deu, aproximadamente, 15 dias após a emergência das plantas, a primeira amostragem de BPA, ocorreu aos 30; e a segunda, aproximadamente, ocorreu aos 45 dias após a semeadura. Esses intervalos de tempo não são imutáveis, variando, principalmente, pelas condições climáticas, que podem alterar o ciclo da cultura.

Nota-se, que houve uma grande diferença de valores de BPA entre os locais amostrados, em uma mesma época. Como foi informado anteriormente, não foi possível realizar a coleta de BPA aos 14 DAI em Minas do Leão, pela alta ocorrência de algas, o que levou a um menor desenvolvimento das plantas. Essa coleta, portanto, foi feita uma semana após, aos 21 DAI (Figura 6b). O mesmo atraso ocorreu em Cachoeira do Sul II (Figura 6e), onde houve déficit hídrico após a semeadura, o que ocasionou uma emergência desuniforme do cultivo e mau estabelecimento inicial.

Embora as tendências apresentadas nas avaliações de BPA (Figuras 6 e 7), o único ajuste quadrático significativo ocorreu na primeira amostragem em Restinga Seca (Figura 6f). Neste caso, mesmo que o solo tivesse o maior teor de S entre os locais (Tabela 1), os valores de BPA foram os menores. Isso ocorreu, provavelmente, devido ao maior teor de argila daquele solo em relação aos demais, o que dificultou a emergência das sementes, em comparação aos solos mais arenosos.

Na avaliação das Figuras 6 e 7, notou-se que nos solos com teores de  $S-SO_4^{2-}$  variando entre 2,0 e 6,6 mg dm<sup>-3</sup> (a - c), houve tendência de ganho de BPA com as doses de S.

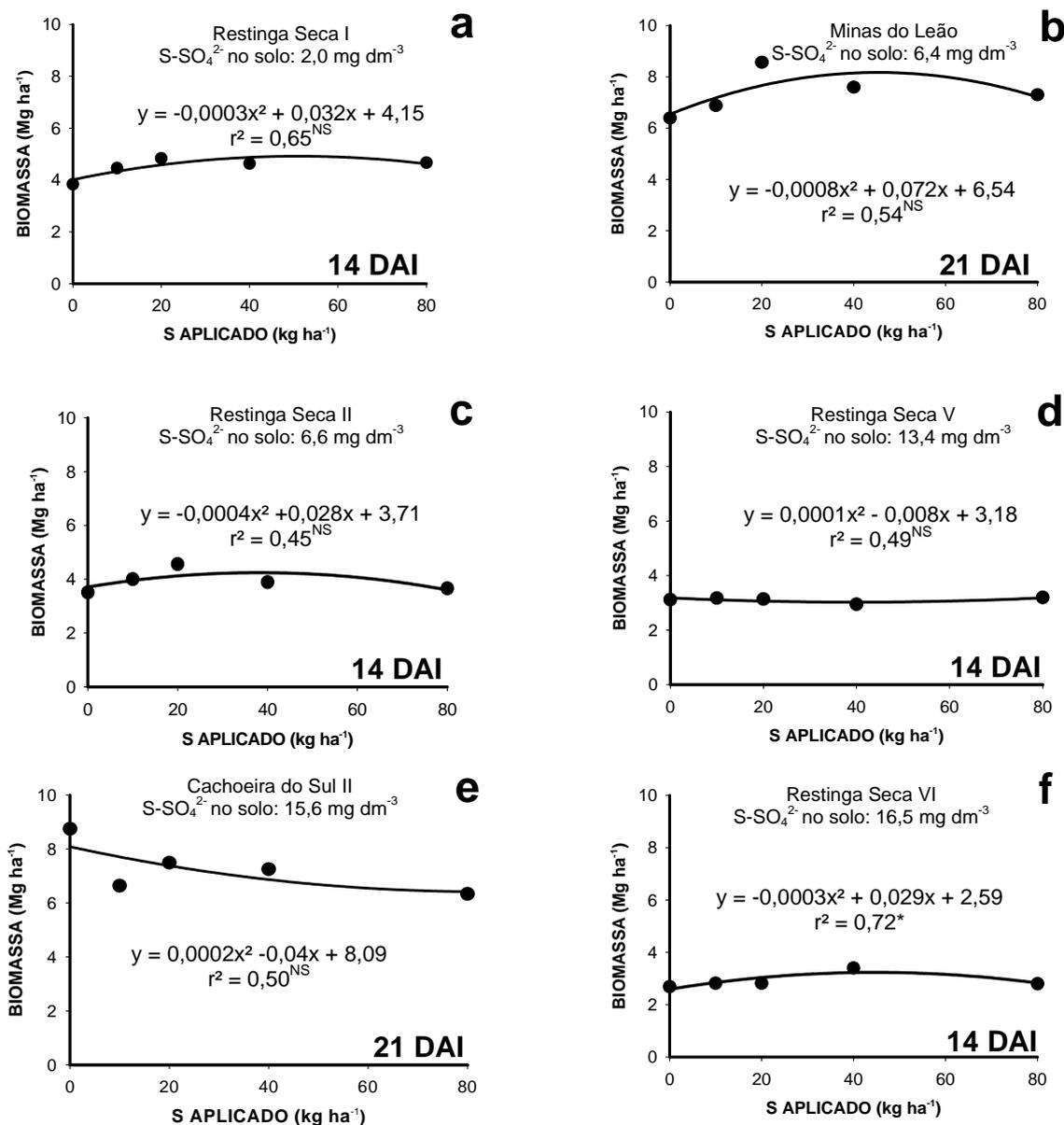


FIGURA 6. Biomassa da parte aérea do arroz irrigado, aos 14 DAI ou 21 DAI, em função da aplicação de doses de enxofre, em diferentes locais da Depressão Central do RS, na safra 2005/06. \*Significativo ( $P < 0,05$ ), <sup>NS</sup> Não Significativo ( $P > 0,05$ ).

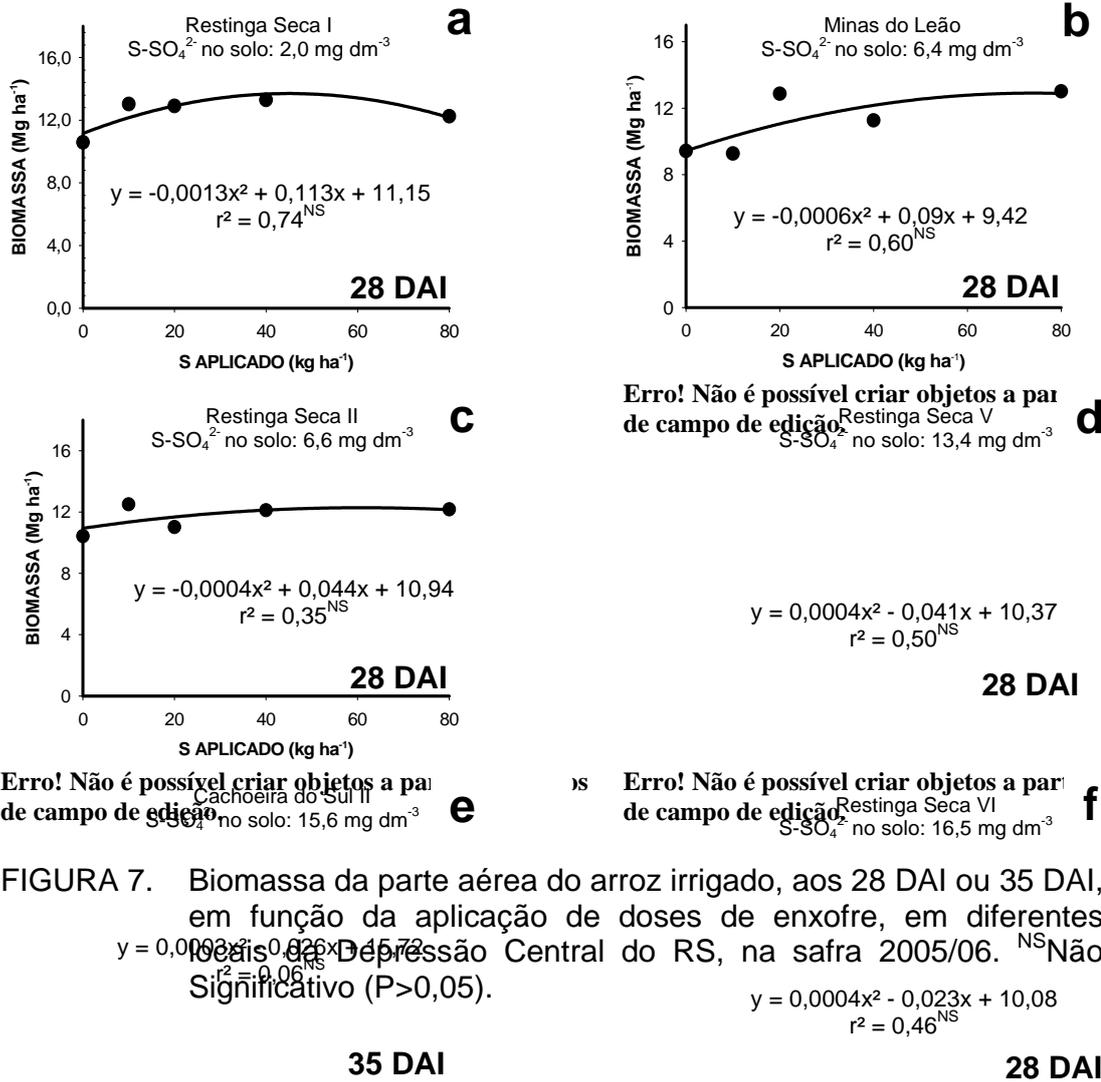


FIGURA 7. Biomassa da parte aérea do arroz irrigado, aos 28 DAI ou 35 DAI, em função da aplicação de doses de enxofre, em diferentes locais da Depressão Central do RS, na safra 2005/06. <sup>NS</sup> Não Significativo (P>0,05).

O maior porte e perfilhamento, visualmente observados com adição da dose de 20 kg de S ha<sup>-1</sup>, em comparação à testemunha (Figuras 8 e 9), devem ter sido os fatores responsáveis por essa tendência de ganho. Um baixo perfilhamento do arroz irrigado já fora constatado em solos deficientes em S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (Fox & Blair, 1986) e com um aumento de até 10 perfilhos por cova, em sistema de transplante, com adição de S ao solo (Blair et al., 1979b). Como observação geral, pode-se afirmar que, na maioria dos solos com teores de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> de 2,0 a

6,6 mg dm<sup>-3</sup>, houve tendência de ganho em BPA com a adição de até 40 kg de S ha<sup>-1</sup>, sendo prejudicado, na maioria dos casos, com a aplicação da dose de 80 kg de S ha<sup>-1</sup> ao solo.

Em contrapartida, nos demais solos, cujos teores de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> variaram de 13,4 a 16,5 mg dm<sup>-3</sup> (Figuras 6 e 7d-f), parece haver predominantemente tendência de decréscimo de BPA com o aumento da dose de S.

Em Cachoeira do Sul II, na coleta aos 21 DAI, a aplicação de S mostrou-se deletéria (Figura 6e). Neste local, a coleta de material foi retardada em sete dias nas duas épocas. O mau estabelecimento da cultura parece ter afetado, ao menos em parte, os resultados de BPA, visto que houve dificuldades para se identificar linhas com bom estande para coleta das plantas.

Nos solos mais arenosos (Restinga Seca I, II e V e Minas do Leão), com teores de argila de até 100 g kg<sup>-1</sup> (Tabela 1), observou-se uma tendência de queda na BPA, a partir da adição de 40 kg ha<sup>-1</sup> de S ao solo. Nesses solos, a aplicação de 80 kg de S ha<sup>-1</sup> causou uma “queima” nas pontas das folhas, indicando uma possível toxidez por excesso de S (Figura 10). Além disso, de modo geral, o porte das plantas era menor em relação, principalmente, aos tratamentos onde foram aplicadas doses de 20 e 40 kg de S ha<sup>-1</sup>. Patella (1965) já havia identificado sintomas de toxidez por excesso de enxofre em arroz irrigado com aplicações superiores a 60 kg de S ha<sup>-1</sup> em solos do RS.

Na safra 2004/05, em uma das áreas com baixo teor de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cachoeira do Sul I, constatou-se que, cerca de 15 dias após a aplicação dos tratamentos 0 e 10 kg de S ha<sup>-1</sup>, as plantas apresentavam porte menor em relação àquelas que foram supridas com maiores quantidade de S. Entretanto, com o

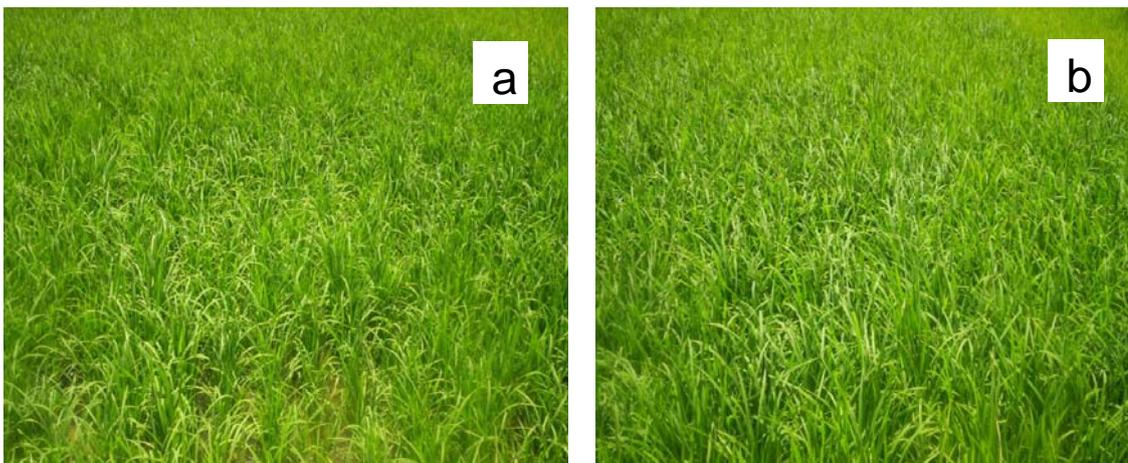


FIGURA 8. Aspecto geral das plantas: a) na parcela testemunha, b) na parcela com 20 kg de S ha<sup>-1</sup>. Restinga Seca I, safra 2005/06.

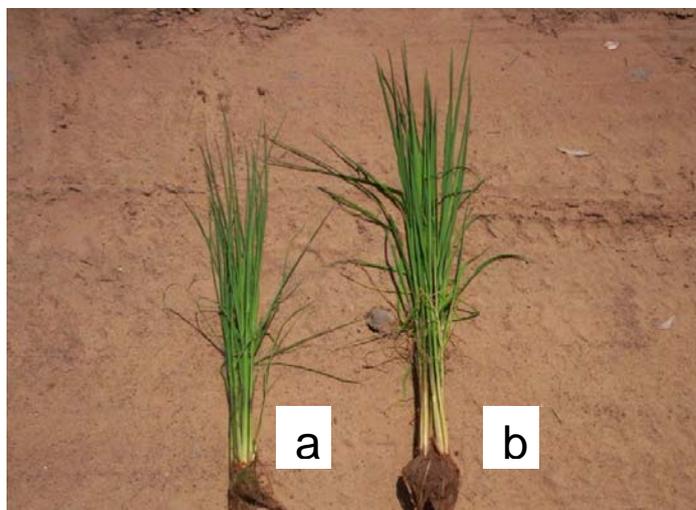


FIGURA 9. Aspecto visual de duas plantas retiradas: a) da parcela testemunha, b) da parcela com 20 kg de S ha<sup>-1</sup>. Restinga Seca I, safra 2005/06.

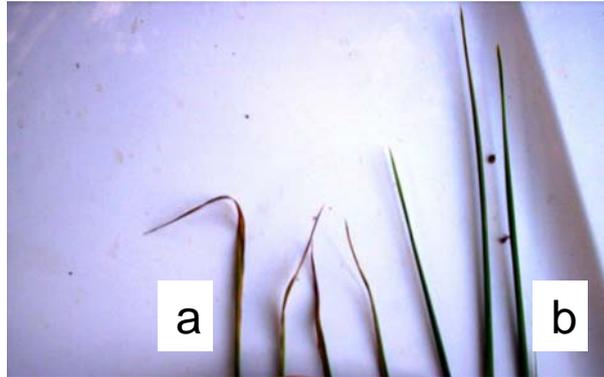


FIGURA 10. Aspecto visual das plantas que receberam: a) a adição de  $80 \text{ kg ha}^{-1}$  de S ao solo, e b)  $0 \text{ kg de S ha}^{-1}$ . Restinga Seca V, safra 2005/06.

passar do tempo, essas diferenças foram diminuindo. À época, se atribuiu a essa recuperação das plantas, baseado nos resultados de Bissani (1985), um possível aporte de S proveniente de camadas mais profundas, uma vez que, o sistema radicular, tendo acesso às camadas mais profundas, poderia absorver esse nutriente do sub-solo. Com base nos teores de  $\text{S-SO}_4^{2-}$  apurados na safra seguinte (Tabela 2), descartou-se essa hipótese, uma vez que os dados da safra 2005/06 não permitiram essa inferência.

O material usado nas análises de tecido nos dois estágios de desenvolvimento foi o mesmo utilizado para a auferição da BPA. Portanto, devido aos problemas já citados anteriormente, Minas do Leão e Cachoeira do Sul II tiveram a coleta de material retardada em sete dias. Os teores de S no tecido (Tabelas 5 e 6) aumentaram ( $P < 0,05$ ) em ambas as amostragens à medida que se adicionaram doses de S ao solo. Alam et al. (1985) já haviam reportado um aumento significativo nos teores de S no tecido, com a adição de  $15 \text{ kg de S ha}^{-1}$  em solos deficientes em S. Baseado na comparação entre os valores médios absolutos de todos os tratamentos nos seis locais, notou-se uma diminuição, entre a primeira e a segunda amostragens, que variou de  $0,3$  a  $0,4 \text{ g kg}^{-1}$  nos teores de S no tecido, comparando-se os mesmos locais. A diminuição dos teores desse nutriente no tecido, especialmente a forma orgânica, à medida que se avança no tempo, tem sido referido na literatura (Eaton, 1966), o que pode ser atribuído à diluição desse elemento na planta.

TABELA 5. Teor de enxofre no tecido do arroz irrigado, aos 14 DAI ou 21 DAI, em função da adição de doses de S ao solo, em diferentes locais da Depressão Central do RS. Safra 2005/06

Local	Doses de enxofre aplicadas (kg ha <sup>-1</sup> )					Média
	0	10	20	40	80	
..... g kg <sup>-1</sup> .....						
1. Restinga Seca I <sup>(1)</sup>	0,85 Cb	1,05 Cab	1,07 Dab	1,05 Dab	1,17 Da	1,04 E
2. Minas do Leão <sup>(2)</sup>	1,00 Cc	1,20 Cbc	1,48 Ca	1,35 Cab	1,47 Ca	1,30 D
3. Restinga Seca II <sup>(1)</sup>	1,57 Bb	1,83 Ba	1,79 Bab	1,90 Ba	1,91 Ba	1,80 C
4. Restinga Seca V <sup>(1)</sup>	1,40 Ba	1,29 Ca	1,36 CDa	1,36 Ca	1,54 Ca	1,39 D
5. Cachoeira do Sul II <sup>(2)</sup>	2,06 Abc	1,78 Bd	2,36 Aa	1,93 Bcd	2,25 Aab	2,08 B
6. Restinga Seca VI <sup>(1)</sup>	2,08 Aa	2,14 Aa	2,32 Aa	2,21 Aa	2,30 Aa	2,21 A
Média	1,49 d	1,55 cd	1,73 ab	1,63 bc	1,77 a	

<sup>(1)</sup> 14 DAI; <sup>(2)</sup> 21 DAI. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula/minúscula, não diferem entre si na coluna/linha, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

TABELA 6. Teor de enxofre no tecido do arroz irrigado, aos 28 DAI ou 35 DAI, em função da adição de doses de S ao solo, em diferentes locais da Depressão Central do RS. Safra 2005/06

Local	Doses de enxofre aplicadas (kg ha <sup>-1</sup> )					Média
	0	10	20	40	80	
..... g kg <sup>-1</sup> .....						
1. Restinga Seca I <sup>(1)</sup>	0,65 Cb	0,76 Dab	0,91 Dab	0,95 Da	0,96 Ca	0,85 E
2. Minas do Leão <sup>(1)</sup>	0,84 Cc	0,98 CDbc	1,07 CDbc	1,23 BCab	1,37 Ba	1,10 D
3. Restinga Seca II <sup>(1)</sup>	1,28 Ba	1,28 Ba	1,29 BCa	1,27 BCa	1,48 Ba	1,32 BC
4. Restinga Seca V <sup>(1)</sup>	1,33 ABab	1,24 BCb	1,40 Bab	1,35 Bab	1,51 Ba	1,37 B
5. Cachoeira do Sul II <sup>(2)</sup>	1,25 Ba	1,16 BCa	1,23 BCa	1,08 CDa	1,30 Ba	1,20 CD
6. Restinga Seca VI <sup>(1)</sup>	1,59 Ab	1,84 Aab	1,72 Aab	1,86 Aa	1,92 Aa	1,78 A
Média	1,16 b	1,21 bc	1,27 bc	1,29 b	1,42 a	

<sup>(1)</sup> 28 DAI; <sup>(2)</sup> 35 DAI. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula/minúscula, não diferem entre si na coluna/linha, pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

Nos solos com teores de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> abaixo de 6,6 mg dm<sup>-3</sup>, notou-se, em ambas as épocas, que os teores de S no tecido das plantas aumentaram com as doses de S adicionadas (P<0,05), única exceção feita à Restinga Seca II aos 28 DAI. Nos demais solos, esse aumento foi menor, embora, em alguns casos, tenha sido significativo. As testemunhas, nos diferentes locais e em ambas as épocas, apresentaram aumento nos teores de S no tecido (P<0,05) à medida que os teores de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> no solo (Tabela 1) aumentaram. Em Cachoeira do Sul II, os teores referentes à segunda amostragem (Tabela 6), foram, em média, inferiores (P<0,05) àqueles apurados em Restinga Seca V e VI, cujos solos contêm teores

de  $S-SO_4^{2-}$  mais elevados. Nesse caso, o retardo na época de amostragem, de sete dias, parece ter interferido na comparação, uma vez que não era de se esperar diferenças entre esses locais. Apenas Restinga Seca I mostrou teores de S no tecido da testemunha, em ambas as épocas, inferior a  $1,0 \text{ g kg}^{-1}$ , teor considerado baixo por Wilson et al., (2006) que considera que uma planta bem nutrida de S, apresenta teores de S no tecido de  $1,7 \text{ g kg}^{-1}$  e  $1,5 \text{ g kg}^{-1}$  no perfilhamento e iniciação do primórdio floral, respectivamente. Justamente nesse local, o teor de  $S-SO_4^{2-}$  no solo era o mais baixo, de apenas  $2,0 \text{ mg dm}^{-3}$  (Tabela 1).

Os resultados de quantidade de enxofre absorvido pelas plantas de arroz nas duas épocas de coleta (Figuras 11 e 12) mostram mais claramente as tendências apresentadas pelos dados de BPA, nas respectivas épocas (Figuras 6 e 7). Exceção feita a Restinga Seca II (Figura 12c), ocorreram ajustes lineares ou quadráticos significativos na absorção de S pelas plantas em ambas as épocas, quando os teores de  $S-SO_4^{2-}$  no solo se situaram na faixa de  $2,0$  a  $6,6 \text{ mg dm}^{-3}$ . Por outro lado, à exceção da coleta aos 14 DAI em Restinga Seca VI (Figura 11f), em que houve uma resposta quadrática ( $P < 0,05$ ), em todas as outras situações não houve ajuste, linear ou quadrático, na absorção de S pelo arroz, com o aumento das doses desse nutriente aplicado ao solo. O estabelecimento inicial do cultivo nesse local foi o mais lento na comparação com os demais, o que pode ser visualizado na Figura 6f, devido à textura mais argilosa do solo em questão, o que dificultou a emergência das plântulas tendo, portanto, refletido nos valores de BPA aos 14 DAI. Entretanto, nesse local, cujo teor de  $S-SO_4^{2-}$  no solo foi o maior (Tabela 1) houve a maior absorção de S pelas plantas, na segunda amostragem (Figura 12f), excetuando-se a comparação feita com Cachoeira do Sul II (Figura 12e), cuja segunda coleta foi realizada aos 35 DAI. Isto poderia indicar que, pela alta disponibilidade desse nutriente no solo, pode estar havendo consumo de luxo pelas plantas de arroz em Restinga Seca VI.

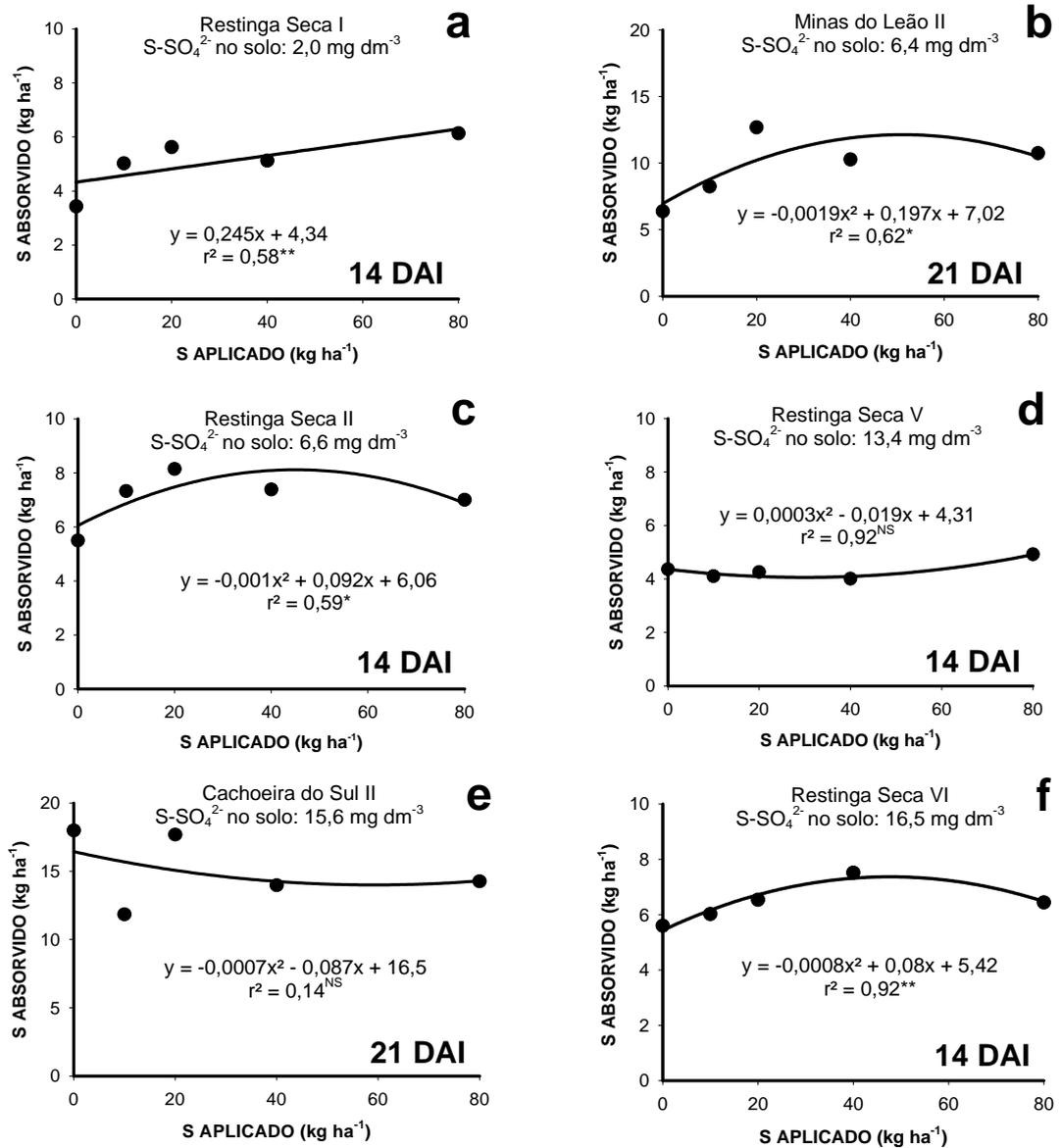


FIGURA 11. Enxofre absorvido pelo arroz irrigado, aos 14 DAI ou 21 DAI, em função da aplicação de doses de enxofre, em diferentes locais da Depressão Central do RS, na safra 2005/06. \*\* Significativo ( $P < 0,01$ ), \*Significativo ( $P < 0,05$ ), <sup>NS</sup> Não Significativo ( $P > 0,05$ ).

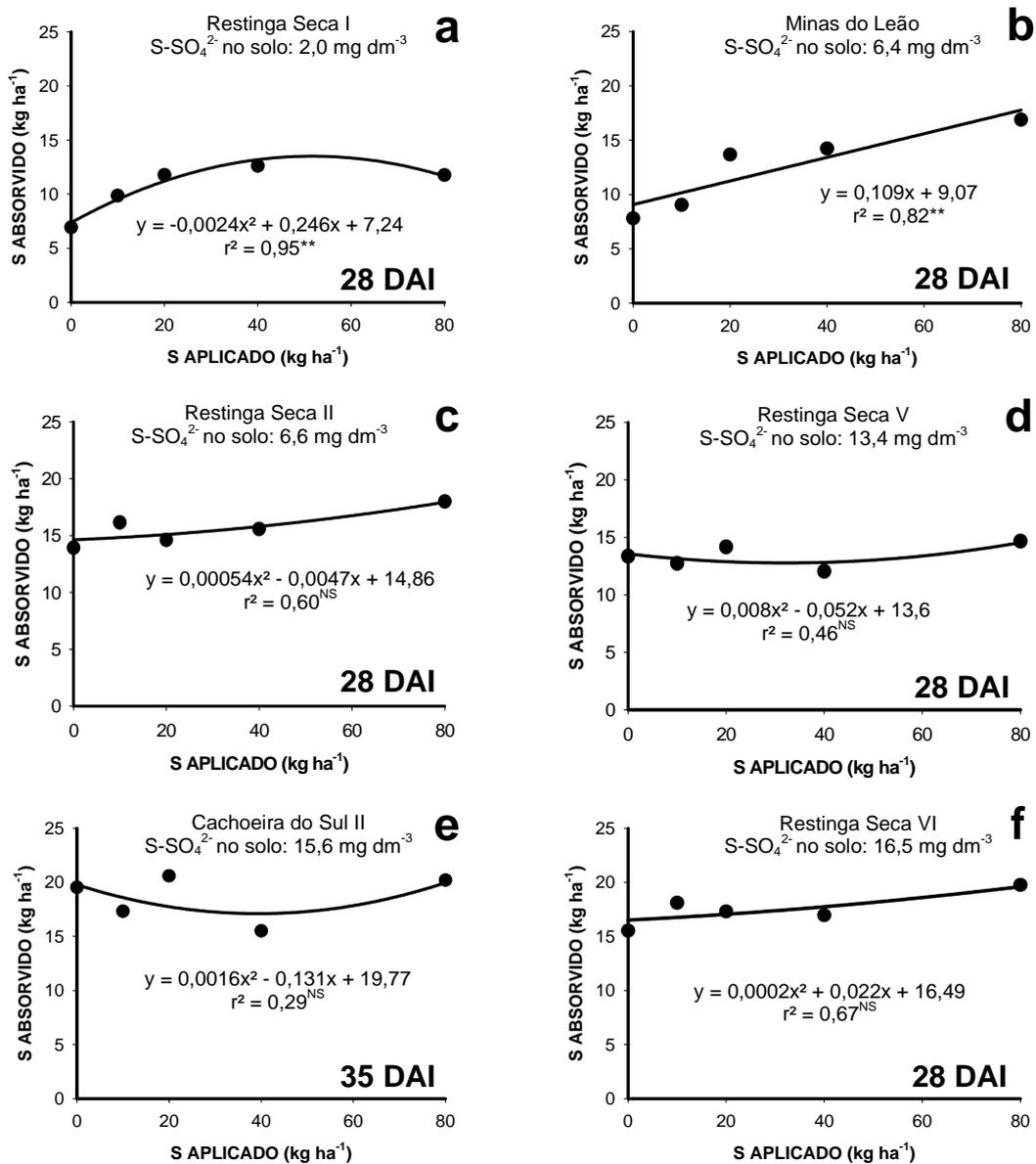


FIGURA 12. Enxofre absorvido pelo arroz irrigado, aos 28 DAI ou 35 DAI, em função da aplicação de doses de enxofre, em diferentes locais da Depressão Central do RS, na safra 2005/06. **\*\***Significativo ( $P < 0,01$ ), <sup>NS</sup>Não Significativo ( $P > 0,05$ ).

Com relação aos teores de S na folha bandeira do arroz irrigado, em pleno florescimento, (Tabela 7), houve uma diminuição consistente, à exceção de Restinga Seca I e Cachoeira do Sul II, entre os valores apurados nesse estágio de desenvolvimento, em comparação às medições feitas anteriormente (Tabelas 5 e 6). Ocorreram, no geral, maiores teores de S na folha bandeira nos solos com maiores teores desse nutriente e nas maiores doses adicionadas; sem, porém, distinção entre as duas faixas antes assinaladas: 2,0 a 6,6 mg dm<sup>-3</sup> e 13,4 a 16,5 mg dm<sup>-3</sup>. Percebeu-se, ainda, que nos três locais onde os teores de S no solo são menores, Restinga Seca I e II e Minas do Leão, o teor de S na folha bandeira, nos diversos tratamentos, variou de menos de 0,08% a 0,13%. Já, nos demais, a variação ficou entre 0,11 e 0,15%. O teor crítico estabelecido de S na folha bandeira é de 0,10%, enquanto o ótimo estabelecido é de 0,10 – 0,15% (IRRI, 2007). Assim, no caso do presente trabalho, o teor desse nutriente estaria abaixo do crítico em Restinga Seca I e Minas do Leão, independente da dose de S aplicada ao solo.

TABELA 7. Teor de enxofre na folha bandeira do arroz irrigado, em função da adição de doses de S ao solo, em diferentes locais da Depressão Central do RS. Safra 2005/06

Local	Doses de enxofre aplicadas (kg ha <sup>-1</sup> )					Média
	0	10	20	40	80	
	.....g kg <sup>-1</sup> .....					
1. Restinga Seca I	0,83 Cbc	0,77 Cc	1,06 BCab	0,99Cabc	1,11 Ba	0,95 C
2. Minas do Leão	0,95 BCa	0,82 Ca	0,94 Ca	0,99 Ca	0,80 Ca	0,90 C
3. Restinga Seca II	1,20 Aa	1,12 Ba	1,22 ABa	1,27 ABa	1,29 ABa	1,22 B
4. Restinga Seca V	1,28 Aa	1,36 Aa	1,34 Aa	1,46 Aa	1,38 Aa	1,36 A
5. Cachoeira do Sul II	1,31 Aa	1,08 Ba	1,30 ABa	1,12 BCa	1,20 ABa	1,20 B
6. Restinga Seca VI	1,07 ABa	1,17 ABa	1,19 ABa	1,12 BCa	1,16 ABa	1,14 B
Média	1,10 ab	1,05 b	1,17 a	1,16 a	1,16 a	

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

#### 4.4. Rendimento de grãos de arroz irrigado em função da adição de enxofre ao solo

Nesta avaliação, foram utilizados os rendimentos das duas safras, nos 12 locais de execução dos experimentos. Na safra 2004/05, conforme referido no

item Material e Métodos, as parcelas tiveram a dimensão de 24 m<sup>2</sup> e, em dois locais, Cachoeira do Sul I e Rio Pardo II, algumas delas não puderam ser colhidas, devido ao acamamento. O cultivar IRGA 422 CL é considerado resistente ao acamamento, no sistema de cultivo convencional (Lopes et al., 2003), no entanto, lavouras de alta produtividade estão sujeitas a esse problema, em função de condições climáticas adversas e manejo da lâmina d'água, previamente à colheita, principalmente. Buscando solucionar esse imprevisto, na safra 2005/06, as parcelas tiveram 75 m<sup>2</sup> e a área colhida foi reduzida para 5 m<sup>2</sup>, sendo que, em caso de acamamento das plantas, buscou-se, dentro da parcela, locais onde isso não ocorreu.

A resposta do arroz irrigado à aplicação de enxofre (Figura 13), de uma maneira geral, foi dependente do teor desse nutriente no solo (Tabela 1). Houve ajuste quadrático ( $P < 0,05$ ) do rendimento em função da adição de S em dois locais: Restinga Seca I e Restinga Seca II (Figuras 13a, d), cujos solos apresentaram teores de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> de 2,0 e 6,6 mg dm<sup>-3</sup>, respectivamente. Comparando-se os rendimentos de grãos obtidos com os de BPA (Figuras 6 e 7) e absorção de S pela cultura (Figuras 11 e 12), observou-se um comportamento semelhante no rendimento de grãos, podendo-se dividir os resultados em dois grupos de solos. Nos solos cujos teores iniciais de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> variaram de 2,0 mg de S dm<sup>-3</sup> a 7,3 mg de S dm<sup>-3</sup> (Figura 8a – f), houve ajuste, ou tendência de ajuste quadrático à adição de S, com elevação de rendimento até um máximo (entre 10 e 40 kg de S ha<sup>-1</sup>), depois decrescendo, com o aumento da dose na maioria dos casos. Medina (2003) e Riobueno (2003), em trabalhos realizados com arroz irrigado na Colômbia, já haviam encontrado resposta, em produtividade de grãos, à adição de enxofre em solos cujos teores de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> eram de 6,2 e 2,0 mg dm<sup>-3</sup>, respectivamente.

O maior rendimento de grãos em Restinga Seca I (Figura 13a), foi obtido pela adição de 20 kg ha<sup>-1</sup>, resultando em um rendimento de grãos cerca de 1,2 Mg ha<sup>-1</sup> superior à testemunha, sem adição de enxofre. Resultados semelhantes foram obtidos por Beaton & White (1997), cujos ganhos máximos

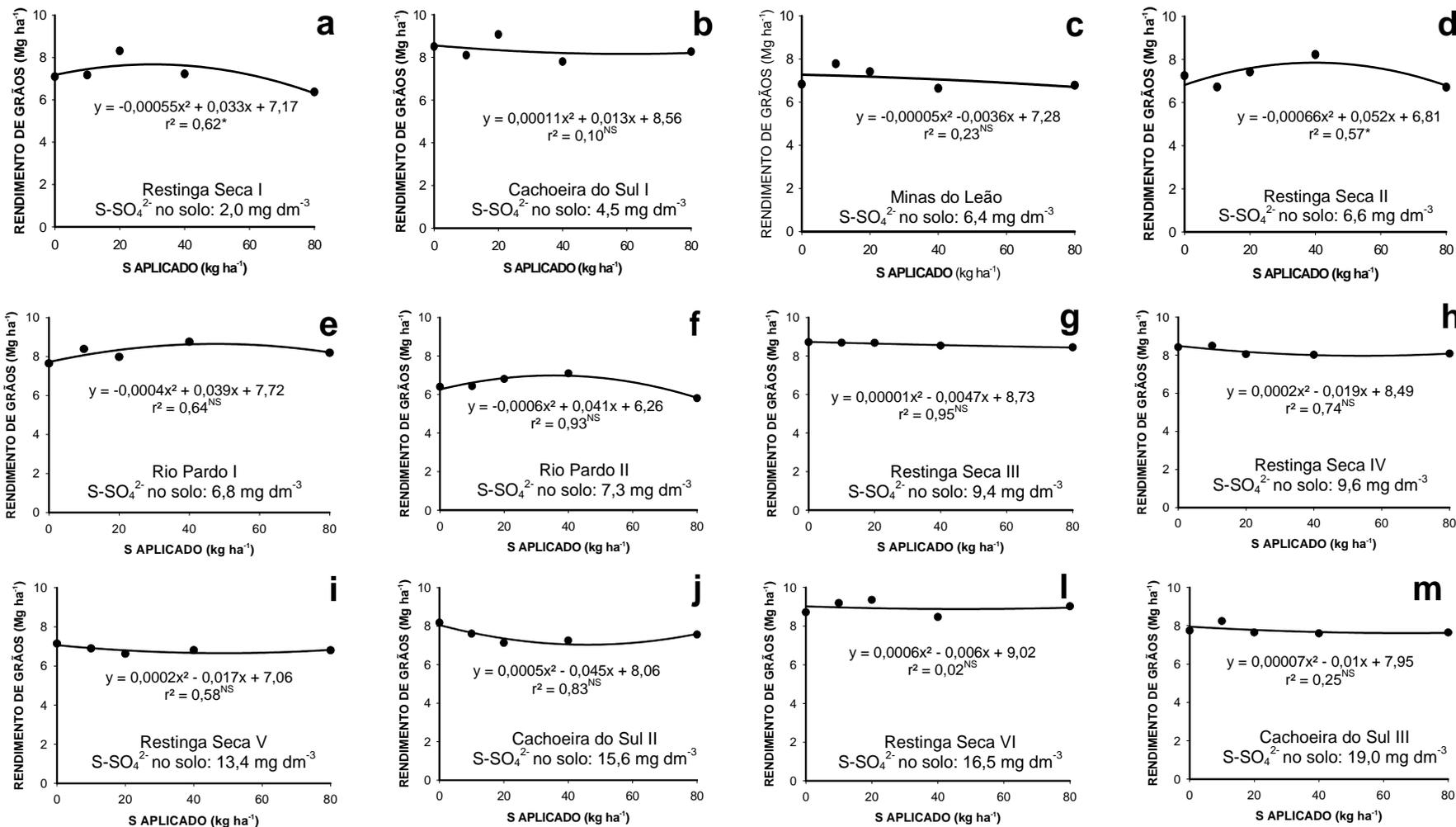


Figura 13. Rendimento de grãos de arroz irrigado, em função da aplicação de doses de enxofre, em diferentes locais da Depressão Central do RS, nas safras 2004/05 e 2005/06. \*Significativo ( $P < 0,05$ ), <sup>NS</sup>Não Significativo ( $P > 0,05$ ).

foram da ordem de  $1,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ . Já, Blair et al. (1979a) obtiveram ganhos médios de 18,6% em rendimento de grãos, com a aplicação de diferentes doses de S em solos deficientes, e Mandal et al., (1997), testando a aplicação de diversas fontes de S na quantidade de  $20 \text{ kg de S ha}^{-1}$ , observaram ganhos de grãos que variaram entre 20,1 e 30,4%. Mais recentemente, Wilson et al., (2006) reportaram, nos Estados Unidos, que a aplicação de  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  de sulfato de amônio, como suficiente para o bom desenvolvimento do arroz irrigado, em caso de deficiência de S, o que significa o aporte de cerca de  $24 \text{ kg de S ha}^{-1}$ .

Nos demais solos estudados (Figura 13g – m), cujos teores de  $\text{S-SO}_4^{2-}$  variaram de 9,4 a  $19,0 \text{ mg dm}^{-3}$ , não houve ajuste, sendo que, em geral, houve tendência de queda nos rendimentos, com o aumento da dose de S adicionado ao solo.

#### **4.5. Teor e exportação de enxofre nos grãos de arroz irrigado em função da sua adição ao solo**

Houve pequena variação nos teores de S nos grãos do arroz irrigado (Tabela 8), refletindo a tendência expressa anteriormente, de que os teores de S no tecido da planta tendem a se equiparar. Não houve diferença ( $P > 0,05$ ) entre as médias, nas cinco doses de S aplicadas ao solo. Já, entre os locais, Minas do Leão e Restinga Seca VI apresentaram os menores ( $P < 0,05$ ) teores de S nos grãos. Todavia, Restinga Seca VI foi o local onde se registrou a maior exportação de S pelos grãos (Tabela 9), em média,  $4,12 \text{ kg ha}^{-1}$ . Considerando-se que o rendimento médio de grãos em Restinga Seca VI foi de aproximadamente  $9,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ , essa quantidade exportada fica abaixo daquela reportada por Wilson et al., (2006) que estimaram esse valor em  $7 \text{ kg ha}^{-1}$ , em lavouras de rendimento próximo a  $7,0 \text{ Mg ha}^{-1}$ , ou seja, 1 kg de S exportado por tonelada de grãos produzida.

Embora não tenha havido variação ( $P > 0,05$ ) nos teores de S exportados entre as doses aplicadas; entre os locais, essa diferença ocorreu ( $P < 0,05$ ), sendo que, onde os teores de  $\text{S-SO}_4^{2-}$  no solo eram maiores ( $13,4$  a  $16,5 \text{ mg dm}^{-3}$ ), a quantidade exportada foi, em média, superior em relação aos demais locais, com quantidades máximas exportadas se verificando com a aplicação de 20 ou  $40 \text{ kg}$

de  $S\ ha^{-1}$ , coincidindo com os maiores rendimentos de grãos (Figura 13). Restinga Seca I foi o local que apresentou a maior exportação de S via grãos ( $P < 0,05$ ), sendo que o tratamento onde fora aplicada a dose de  $20\ kg\ de\ S\ ha^{-1}$ , apresentou um acréscimo de S exportado de cerca de  $1,2\ kg\ ha^{-1}$ , em relação à testemunha.

TABELA 8. Teor de enxofre nos grãos do arroz irrigado, em função da adição de doses de S ao solo, em diferentes locais da Depressão Central do RS. Safra 2005/06

Local	Doses de enxofre aplicadas ( $kg\ ha^{-1}$ )					Média
	0	10	20	40	80	
	.....g $kg^{-1}$ .....					
1. Restinga Seca I	0,43 Aa	0,48 ABa	0,50 Aa	0,49 ABa	0,53 Aa	0,49 AB
2. Minas do Leão	0,43 Aab	0,36 Bb	0,44 Aab	0,50 ABa	0,42 Aab	0,43 B
3. Restinga Seca II	0,49 Aa	0,48 ABa	0,48 Aa	0,42 Ba	0,48 Aa	0,47 AB
4. Restinga Seca V	0,51 Aa	0,52 Aa	0,54 Aa	0,52 ABa	0,53 Aa	0,52 A
5. Cacheira do Sul II	0,53 Aa	0,50 Aa	0,55 Aa	0,58 Aa	0,51 Aa	0,53 A
6. Restinga Seca VI	0,45 Aa	0,42 ABa	0,44 Aa	0,47 ABa	0,49 Aa	0,46 B
Média	0,47 a	0,46 a	0,49 a	0,50 a	0,50 a	

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

TABELA 9. Exportação de enxofre pelos grãos do arroz irrigado, em função da adição de doses de S ao solo, em diferentes locais da Depressão Central do RS. Safra 2005/06

Local	Doses de enxofre aplicadas ( $kg\ ha^{-1}$ )					Média
	0	10	20	40	80	
	.....kg $ha^{-1}$ .....					
1. Restinga Seca I	3,04 BCb	3,40 ABab	4,23 Aa	3,55 Aab	3,66 ABab	3,58 BC
2. Minas do Leão	2,88 Ca	2,61 Ba	3,20 Aa	3,30 Aa	2,84 Ba	2,97 D
3. Restinga Seca II	3,51 ABCa	3,23 ABa	3,58 Aa	3,46 Aa	3,17 Ba	3,39 CD
4. Restinga Seca V	3,67 ABCa	3,58 ABa	3,52 Aa	3,52 Aa	3,60 ABa	3,59 BC
5. Cacheira do Sul II	4,32 Aa	3,78 Aa	3,89 Aa	4,21 Aa	3,86 ABa	4,01 AB
6. Restinga Seca VI	4,00 ABa	4,07 Aa	4,14 Aa	4,00 Aa	4,40 Aa	4,12 A
Média	3,57 a	3,45 a	3,76 a	3,67 a	3,59 a	

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

#### 4.6 Calibração do teor de enxofre para o arroz irrigado

A curva de calibração do enxofre foi obtida pela utilização dos dados de rendimento de arroz sem a sua adição ao solo, em relação ao rendimento máximo

obtido em cada local de condução dos experimentos, nas safras 2004/05 e 2005/2006, versus o teor inicial de S no solo, conforme a Equação 10, descrita no item 3.8 e é apresentada na Figura 14. De acordo com o referido anteriormente, em “Material e Métodos”, o teor crítico foi determinado pelo procedimento descrito por Cate & Nelson (1965), que consiste em enquadrar o maior número possível de pontos nos quadrantes inferior esquerdo e superior direito. Isto, aplicado aos dados da Figura 14, resultou na definição do teor crítico como sendo ao redor de 9,0 mg de  $S-SO_4^{2-} \text{ dm}^{-3}$ , o que corresponde a aproximadamente a 95% do rendimento máximo. Este valor é superior ao teor crítico estabelecido para culturas pouco exigentes, que é de 5,0 mg  $\text{dm}^{-3}$ , e próximo ao de culturas exigentes, de 10,0 mg  $\text{dm}^{-3}$ , (CQFS RS/SC, 2004). A resposta a adição de S ao solo foi sempre positiva, no caso de solos com teor abaixo do crítico estabelecido.

O coeficiente de determinação obtido (Figura 14) é compatível com os obtidos por outros pesquisadores. Muzilli et al. (1979), por exemplo, chegaram a um coeficiente de determinação ( $r^2$ ) de 0,41 na calibração de fósforo para o trigo em solos do Estado do Paraná. Já, para a cultura do milho, esse valor foi de 0,71. Raji et al. (1982) obtiveram valores de 0,74 e 0,44 para a calibração desse nutriente para o milho e algodão, respectivamente, no Estado de São Paulo. Kochhann et al. (1982), por sua vez, compilando diversos resultados de experimentos de calibração de fósforo para as principais culturas do RS e SC, optaram por publicar apenas a tendência quadrática das funções obtidas. O mesmo critério foi utilizado por Lobato (1981), para a cultura da soja, em solos dos cerrados brasileiros e Mielniczuk (1982), para a cultura do trigo, no Rio Grande do Sul.

Comparativamente a trabalhos realizados com arroz irrigado, a curva de calibração e a dispersão dos pontos no plano cartesiano, no presente trabalho, também parecem pertinentes. Machado & Pöttker (1979), por exemplo, não encontraram boa relação entre o K disponível e o rendimento relativo do arroz irrigado, no sistema de cultivo convencional. O mesmo ocorreu no sistema pré germinado (Machado, 1993). Em ambos os casos, foram obtidos valores de rendimento relativo superiores a 70% do rendimento máximo, mesmo em solos cujos teores de K disponível eram de cerca de 20 mg  $\text{dm}^{-3}$ . Contudo, esses dados

foram utilizados como base para o estabelecimento do teor crítico desse

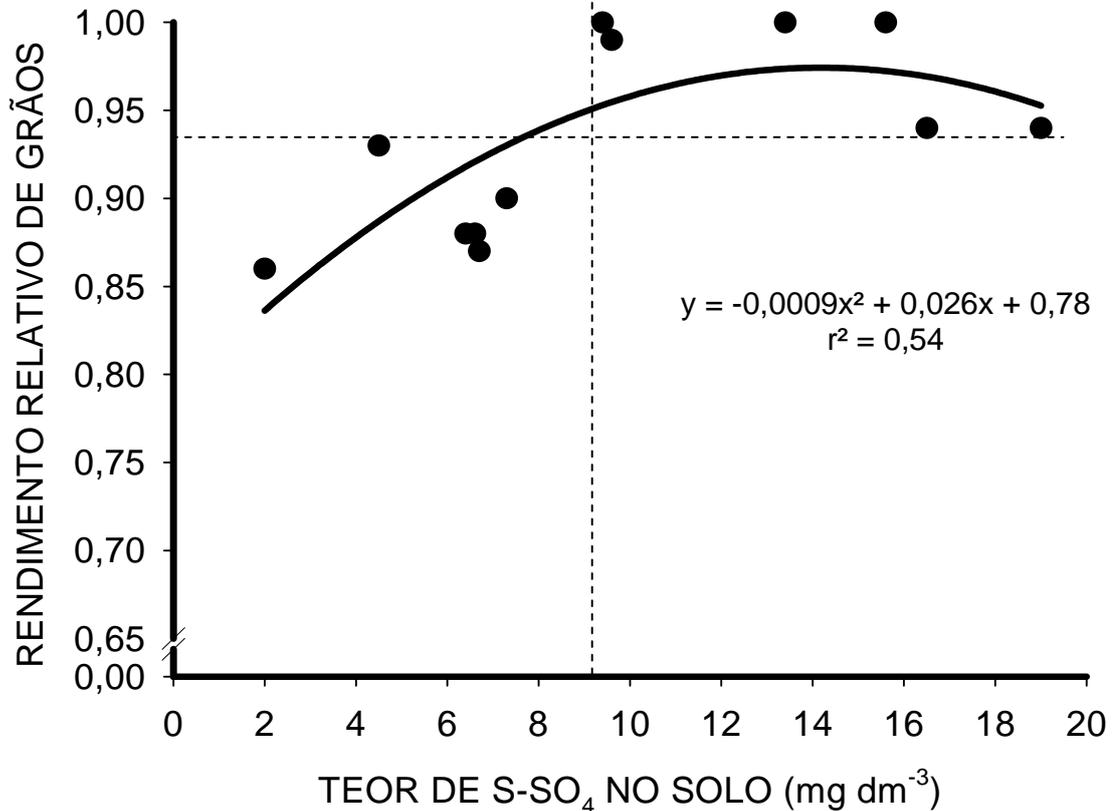


FIGURA 14. Curva de calibração do teor de enxofre para solos da Depressão Central do RS, nas safras 2004/05 e 2005/06.

nutriente no solo para o arroz irrigado.

Para os macronutrientes N e P o panorama é semelhante. Scivittaro & Machado (2004) deduziram que a resposta do arroz irrigado ao nitrogênio está mais relacionada a fatores climáticos (temperatura e radiação solar) e ao tipo de planta (tradicional, americano e moderno), do que ao teor de matéria orgânica no solo. Os mesmos autores consideram que, no caso do estabelecimento do teor crítico para o fósforo, o ajustamento entre as duas variáveis (rendimento relativo e P extraível) é apenas razoável ou deficiente. No entanto, com a utilização do método dos quadrantes (Cate & Nelson, 1965), foi possível atender às exigências mínimas para a obtenção de um teor crítico de P no solo, pelo método de extração

Mehlich I, para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, nos sistemas de cultivo convencional e pré germinado (Machado, 1993).

Com relação ao enxofre, Neue & Mamaril (1984), revisando trabalhos de diversos autores que utilizaram o método de extração por solução de  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ , chegaram à teores críticos, para o arroz irrigado, entre 7,0 e 11,0  $\text{mg dm}^{-3}$ , resultando em uma média de 9,0  $\text{mg dm}^{-3}$ , valor este, próximo ao determinado neste trabalho, assim como do teor utilizado na Colômbia, de 12  $\text{mg dm}^{-3}$  (Medina, 2003; Riobueno, 2003).

#### **4.7. Interpretação dos valores de enxofre no solo e recomendação de adubação**

A partir da obtenção da curva de calibração e do teor crítico, foram estabelecidas as faixas de teores para a interpretação dos resultados das análises de solos (Baixo, Médio e Alto) e elaboração das recomendações de doses do nutriente, com base na resposta da cultura à adição de doses crescentes, em cada faixa de interpretação. Após a discussão dos dados deste trabalho, a equipe de Fertilidade do Solo e Nutrição do Arroz, da Subcomissão de Manejo da Cultura e dos Recursos Naturais da Sociedade Sul-Brasileira do Arroz Irrigado (SOSBAI), decidiu, na XXVI Reunião da Cultura do Arroz Irrigado, em agosto de 2006, em Santa Maria, pela utilização do teor crítico de S para a cultura em 10  $\text{mg dm}^{-3}$ , visando facilitar a subdivisão em três faixas de interpretação: 0 – 5,0, Baixo; 5,1 – 10,0, Médio e > 10,0, Alto. A tentativa de obter a curva média de resposta do arroz a partir dos experimentos deste trabalho foi frustrada, uma vez que não houve distinção de resposta do arroz entre as faixas Baixo (0 – 5,0  $\text{mg dm}^{-3}$ ) e Médio (5,1 – 10,0  $\text{mg dm}^{-3}$ ). A alternativa foi, então, estabelecer a resposta média da cultura em somente duas faixas: abaixo do teor crítico (0 – 10,0  $\text{mg dm}^{-3}$ ) e acima do mesmo (> 10,0  $\text{mg dm}^{-3}$ ).

Em ambas as situações, houve ajuste quadrático das curvas com coeficientes de determinação ( $r^2$ ) de 0,87 e 0,83, respectivamente, para as faixas abaixo (Figura 15) e acima (Figura 16) do teor crítico. Em solos com teor abaixo do crítico estabelecido, a resposta em rendimento de grãos foi positiva até a

aplicação de 20 kg de S ha<sup>-1</sup>. Este resultado está de acordo com publicações de diversos autores, como Blair et al. (1979a); Beaton & White (1997); Mandal et al. (1997) e Wilson et al. (2006), que estabeleceram a recomendação de 20 kg de S ha<sup>-1</sup> em solos deficientes desse nutriente. Já, no presente trabalho, em solos com teor acima do crítico a resposta é negativa a partir da aplicação de 20 kg de S ha<sup>-1</sup>.

Diversos autores (Kochhann et al., 1982; Tisdale et al., 1993; Rajj et al., 1997; Sims, 1999; Schlindwein, 2003; Havlin et al., 2005) citam que a dose de máxima eficiência econômica (DMEE) do nutriente, a dose a ser recomendada, está relacionada a uma produtividade entre 80 a 95% do rendimento máximo da cultura. O cálculo dessa dose é, no entanto, definido pelo preço do insumo variável (dose do adubo com enxofre) e do produto, no caso o arroz irrigado, e pode ser efetuado a partir da função de produção para teores de S no solo abaixo do crítico (< 9,0 mg dm<sup>-3</sup>). No presente trabalho, foi inicialmente calculada a dose de máxima eficiência técnica (DMET), a partir da respectiva função de produção (Figura 15):

$$y = -0,0004x^2 + 0,025x + 7,3 \quad (15)$$

derivando-se e igualando-se a equação derivada a zero (Grimm, 1970; Tisdale et al, 1993), como segue:

$$dy/dx = -R(0,0004x^2) + 0,025 = 0$$

$$-0,0008x + 0,025 = 0$$

$$x = 0,025/0,0008$$

$$x = 31,25 \text{ kg de S ha}^{-1} \text{ (DMET)}$$

Considerando-se a DMET obtida e a dose de N aplicada nos tratamentos nas safras 2004/05 (210 kg de N ha<sup>-1</sup>) e 2005/06 (160 kg de N ha<sup>-1</sup>), se chega, respectivamente, a uma relação de cerca de sete e cinco partes de N para uma de S. Bixby & Beaton (1970) já haviam afirmado que, em solos onde esses dois nutrientes são limitantes, a relação N:S aplicada deve ser de 7:1.

Substituindo-se o valor da DMET na equação da função de produção (15), chega-se ao seguinte rendimento:

$$y = -0,0004(31,25)^2 + 0,025(31,25) + 7,3$$

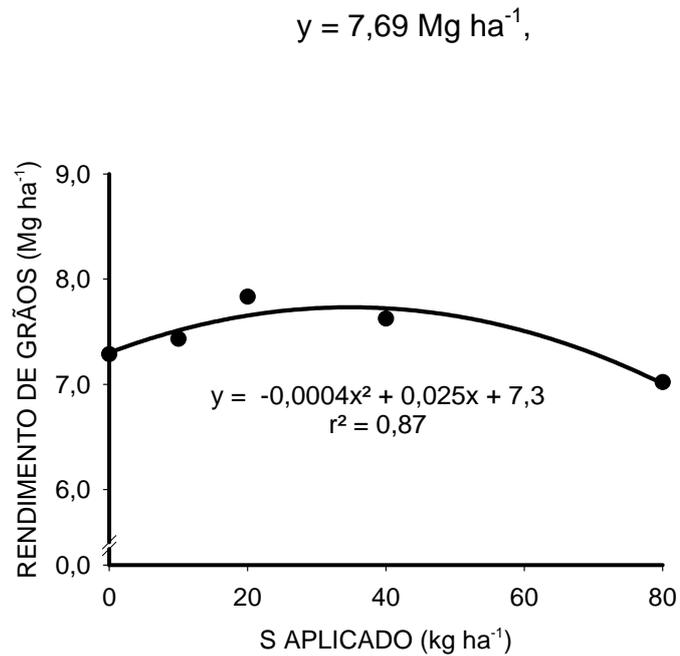


FIGURA 15. Resposta do arroz irrigado, em rendimento médio de grãos, à aplicação de doses de S, em seis solos da Depressão Central do RS, com teores de  $\text{S-SO}_4^{2-}$  abaixo do crítico, nas safras 2004/05 e 2005/06.

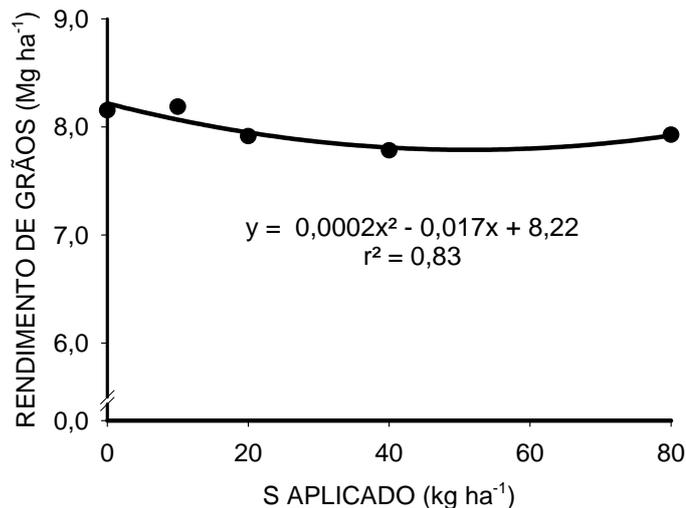


FIGURA 16. Resposta do arroz irrigado, em rendimento médio de grãos, à aplicação de doses de S, em seis solos da Depressão Central do RS, com teores de  $\text{S-SO}_4^{2-}$  no solo acima do crítico, nas safras 2004/05 e 2005/06.

o que representa um ganho de  $0,39 \text{ Mg ha}^{-1}$ , um valor menor do que o ganho máximo médio observado de  $0,92 \text{ Mg ha}^{-1}$ .

Para o cálculo da dose de máxima eficiência econômica (DMEE) de enxofre ( $X_{or}$ ) é necessário levar em consideração o preço de venda do arroz ( $V$ ), o rendimento de grãos ( $Y$ ), o custo do enxofre ( $F_1$ ) e os custos fixos ( $F_0$ ). Logo, o lucro líquido ( $L$ ) corresponde à fórmula:

$$L = VY - F_0 - F_1X$$

Em pesquisa de mercado realizada no momento dos cálculos, o preço do arroz tipo 1 Longo Fino (Agrolink, 2007) e do enxofre (Pesquisa de mercado, 2007) eram de, respectivamente, R\$ 387,00  $t^{-1}$  e R\$ 2.170,00  $t^{-1}$ , ou R\$ 0,39  $kg^{-1}$  e R\$ 2,17  $kg^{-1}$ .

A partir desses dados e considerando-se os preços do kg de enxofre e de arroz, tem-se a seguinte equação:

$$X_{or} = \frac{0,025}{2(0,0004)} - \frac{2,17}{2[(387)0,0004]}$$

$$X_{or} = 24,74 \text{ kg de S ha (DMEE)}$$

Os valores das doses de máxima eficiência técnica e econômica obtidos foram diferentes, sendo que a DMET foi  $6,51 \text{ kg de S ha}^{-1}$  superior a DMEE.

O rendimento obtido a partir da DMEE, na função de produção (15), é o seguinte:

$$y = -0,0004(24,74)^2 + 0,025(24,74) + 7,3$$

$$y = 7,67 \text{ Mg ha}^{-1}$$

Ou seja, tanto a DMET quanto a DMEE, proporcionaram um rendimento de grãos semelhante.

Em se tratando do custo adicional que a DMEE de S proporciona, chega-se a um valor de R\$ 16,90; ou seja, um investimento baixo, se for tomado em conta que o rendimento adicional médio obtido, de  $0,37 \text{ Mg ha}^{-1}$ , gera um lucro líquido adicional de R\$ 126,29  $ha^{-1}$ , pois o sulfato de amônio, por conter 21% de N em sua formulação, tem seu custo abatido, em parte, pela adição de uma menor

quantidade de uréia (R\$ 740,00 t<sup>-1</sup> – Pesquisa de mercado, 2007), visto que, a aplicação de 101 kg de (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup>, além de aportar ao cultivo a DMEE de 24,74 kg de S ha<sup>-1</sup>, também disponibiliza 21,2 kg N ha<sup>-1</sup>.

## 5. CONCLUSÕES

1. Os teores de enxofre no perfil do solo estão relacionados aos teores de matéria orgânica, porém, não aos teores de argila.

2. O teor de S na solução do solo diminui com o avanço do desenvolvimento do cultivo e o enxofre aportado pela água dos rios e barragens não é relevante para suprir a demanda da cultura.

3. A biomassa da parte aérea do arroz irrigado não é afetada pela adição de doses de S. No entanto, o teor e o enxofre absorvido pela cultura aumentam com a dose aplicada em solos com teor de  $S-SO_4^{2-}$  abaixo de  $6,6 \text{ mg dm}^{-3}$ .

4. O rendimento de grãos do arroz irrigado tende a aumentar de forma predominantemente quadrática com a adição de doses de enxofre nos solos com teor de  $S-SO_4^{2-}$  abaixo de  $7,3 \text{ mg dm}^{-3}$ .

5. O teor crítico de enxofre para os solos da Depressão Central do RS é em torno de  $9,0 \text{ mg dm}^{-3}$ , o que corresponde a aproximadamente 95% do rendimento médio máximo.

6. As doses de máxima eficiência técnica e econômica são diferentes:  $31,25$  e  $24,74 \text{ kg de S ha}^{-1}$ , respectivamente, e correspondem a um ganho similar no rendimento de grãos de arroz.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa sobre a necessidade de S para o arroz irrigado ainda é incipiente no RS. Há campo para o teste de diferentes fontes e épocas de aplicação desse nutriente. Existem também indicações sobre a importância da aplicação de S como um *starter*, em solos deficientes. Isso poderia ser contemplado, com a aplicação de superfosfato simples na linha de semeadura. Além disso, é prática comum entre os arroteiros fracionar as aplicações de N em até três vezes, mas não há estudos indicando se essa seria uma alternativa viável no caso do enxofre.

## 7. BIBLIOGRAFIA CITADA

AGROLINK. **Cotações de produtos agrícolas:** consulta ao preço pago ao produtor pelo Arroz Tipo 1 Longo Fino no RS. Disponível em <<http://www.agrolink.com.br/cotacoes/index.asp>>. Acesso em: 15 jan 2007.

AITA, C. Matéria orgânica do solo, nitrogênio e enxofre nos diversos sistemas de exploração agrícola: plantio direto x plantio convencional. In: NITROGÊNIO e enxofre na agricultura brasileira. Piracicaba : Potafos, 2006. p.3-4. (Encarte Técnico, 114).

ALAM, M.L.; AHMED, F.; KARIM, M. Effect of different sources of sulphur on rice under submerged condition. **Journal of Indian Society Soil Science**, New Delhi, v.33, p.586-590, 1985.

ALWAY, F.J.; MARSH, A.W.; METHLEY, W.J. Sufficiency of atmospheric sulfur for maximum crop yields. **Soil Science Society of America Proceedings**, Gainesville. v.2, p.229-238, 1937.

ARMBRUSTER, D.G.; CRUZ, A.P.; MONESMITH, F.L. Ammonium sulphate: an economical sulphur source for maximizing crop returns in sandy or sandy-loam soils – a brazilian case study. **Sulphur in agriculture**, Washington, v.17, p.24-28, 1993.

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.

BISSANI, C.A. **Disponibilidade de enxofre para as plantas em solos do Rio Grande do Sul**. 1985. 198f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1985.

BISSANI, C.A.; TEDESCO, M. Enxofre, Cálcio e Magnésio. In: GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; TEDESCO, M.J. **Princípios de fertilidade do solo**. Porto Alegre: Departamento de Solos da UFRGS, 1995. 276p.:il.

BISSANI, C.A.; TEDESCO, M.J. O enxofre no solo. In: SIMPÓSIO enxofre e micronutrientes na agricultura brasileira, 1988, Londrina, PR. **Anais...Londrina**. EMBRAPA.CNPSo : IAPAR : SBCS, 1988. p.11-29.

BIXBY, D.W.; BEATON, J.D. **Sulphur containing fertilizers, properties and applications**. Washington: The Sulphur Institute, 1970. 27p. (Technical bulletin, 17).

BLAIR, G.J.; MAMARIL, C.P.; UMAR, P.; MOMUAT, E.O.; MOMUAT, C. Sulfur nutrition of rice. I. A survey of soils of south Sulawesi, Indonesia. **Agronomy Journal**, Madison, v.71, p.473-477, 1979a.

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, 1979b.

BOHN, H.L.; BARROW, N.J.; RAJAN, S.S.S; PARFITT, R.L. Reactions of inorganic sulfur in soils. In: SULFUR in agriculture. Madison : ASA : CSSA :SSSA , 1986. p.233-249. (Agronomy monograph, 27).

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, MG, v.29, p.475-480. 2005

BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **The Nature and Properties of Soils**. 13 ed. New Jersey : Springer Netherlands, 2002. Cap 13. p.578.

BRAGA, C.F.; TEIXEIRA, E.C; ALVES, R.C.M. Estudo de aerossóis atmosféricos e aplicação de modelos numéricos. **Química Nova**, São Paulo, v. 27, n.4, p.564-573, 2004.

CAIRES, E.F.; FONSECA, A.F. Fertilidade do solo e nutrição de plantas: absorção de nutrientes pela soja cultivada no sistema de plantio direto em função da calagem de superfície. **Bragantia**, Campinas, v.59, n.2, p.213-220, 2000.

CATE, R.B.; NELSON, L.A. **Um método rápido para correlação de análise de solo com ensaios de adubação**. Raleigh: North Carolina State University, 1965. (Boletim Técnico, 1).

CECCOTTI, S.P. Sulphur fertilizers: an overview of commercial developments and technological advances. **Sulphur in agriculture**, Washington, v.18, p.58 – 64, 1994.

CERETTA, C.A. Manejo do nitrogênio e do enxofre em diferentes sistemas de exploração agrícola: plantio direto x plantio convencional. In: NITROGÊNIO e enxofre na agricultura brasileira. Piracicaba : Potafos, 2006. p.4-6. (Encarte Técnico, n.114).

CHAITEP, W.; LEFROY, R.D.B. ; BLAIR,G.J. Effect of placement and source of sulfur in flooded and non-flooded rice cropping systems. University of New England. **Australian Journal of Agricultural Research**, New England, v.45, p.1547-1556, 1994.

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**. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2004. 400p.

COSTA, C.A.S. **Mineralização de enxofre orgânico e absorção de sulfato em solos**. 1980. 63f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1980.

COUTO W.; RITCHEY, K.D. Enxofre. In: GOEDERT, W.J. (Ed). **Solos dos cerrados** - tecnologias e estratégias de manejo. São Paulo : [s.n.], 1986. p.223-235.

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

DUKE, S.H.; REISENAUER, H.M. Roles and requirements of sulfur in plant nutrition. . In: SULFUR in agriculture, Madison : ASA : CSSA :SSSA , 1986. p.123-168. (Agronomy monograph, 27).

EATON, F.M. Sulfur. In: DIAGNOSTIC criteria for plants & soils. University of California, Riverside, 1966, p.444-475.

EDWARDS, P.J; GREGORY, J.D; ALLEN, H.L. Seasonal sulfate deposition and export patterns for a small appalachian watershed. **Water, Air, and Soil Pollution**, Springer, v.110, p.137–155, 1999.

ENSMINGER, L.E. Some factors affecting the adsorption of sulfate by Alabama soils. **Soil science society of America proceedings**, Madison, v.18, p.259-264, 1954.

ENSMINGER, L.E.; FRENEY,J.R. Diagnostic techniques for determining sulfur deficiencies in crops and soils. **Soil Science**, Baltimore, v.101, n.4, p.283-290, 1966.

FAN, M.X.; MESSICK, D.L. The current status of S in Chinese agriculture. **Sulphur in Agriculture**, Washington, v.20, p.71-79, 1997.

FONTES, M.P.F.; NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; BORGES, A.C. Disponibilidade do enxofre em três extratores químicos em latossolos de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.6, p.125-130. 1982.

FOX, R.L.; BLAIR, G.J. Plant response to sulfur in tropical soils. In: SULFUR in agriculture. Madison: ASA : CSSA : SSSA , 1986. p.405-434. (Agronomy monograph, 27).

FREIRE, J.R.J. **Microbiologia do Solo**. Porto Alegre: Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1975. p.194-206.

FRENEY, J.R. Forms and reactions of organic sulfur compounds in soils. In: SULFUR in agriculture. Madison : ASA : CSSA : SSSA , 1986. p.207-232. (Agronomy monograph, 27).

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.

GRIMM, S.S. **Aspectos econômicos da adubação**. Porto Alegre: Faculdade de Agronomia da UFRGS, 1970. 14p. (Boletim técnico, 6)

GUEDES, R.M.M. **Enxofre e nitrogênio na água da chuva e enxofre atmosférico na região metropolitana de Porto Alegre (RS), Brasil**. 1985. 117f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1985.

HAGSTROM, G.R. Fertilizer sources of sulfur and their use. . In: SULFUR in agriculture. Madison : ASA : CSSA :SSSA , 1986. p.567-581. (Agronomy monograph, 27).

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.

HINGSTON, R.J; POSNER, A.M; QUIRK, J.P. Anion adsorption by goethite and gibbsite I. The role of the proton in determining adsorption envelopes. **Journal of Soil Science**, Crawley, v.23, p.177-192, 1972.

HOROWITZ, N. **Oxidação e eficiência agrônômica do enxofre elementar em solos do Brasil**. 2003. 109f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE. **Sulphur deficiency**. Disponível em: [http://www.knowledgebank.irri.org/ricedoctor\\_mx/Fact\\_Sheets/DeficienciesToxicities/Sulfur\\_Deficiency.htm](http://www.knowledgebank.irri.org/ricedoctor_mx/Fact_Sheets/DeficienciesToxicities/Sulfur_Deficiency.htm). Acesso em: 20 jan 2007.

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.

KAMPRATH, E.J.; JONES, U.S. Plant response to sulfur in the southeastern United States. In: SULFUR in agriculture. Madison : ASA : CSSA :SSSA , 1986. p.323-343. (Agronomy monograph, 27).

KELLOG, W.W.; CADLE, R.D.; ALLEN, E.R.; LAZRUS, A.L.; MARTELL, E.A. The sulfur cycle. **Science**, Washington, v. 175, p.587-596, 1972.

KOCHHANN, R.; ANGHINONI, I.; MIELNICZUK, J. **Adubação fosfatada no Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. In: ADUBAÇÃO fosfatada no Brasil. Brasília: [s.n], 1982. p. 29-60.

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).

KRUPA,S.V.; TABATABAI, M.A. Measurement of sulfur in the atmosphere and in natural waters. . In: SULFUR in agriculture. Madison : ASA : CSSA : SSSA , 1986. p.491-548. (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#t2>>. Acesso em: 16 set 2005.

LIU, C. Soil sulphur status and sulphate fertilizer requirements in Southern China. In: CURRENT and future plant nutrient sulphur requirements, availability and commercial issues for china. Calgary, CAN : PRISM Sulphur Corporation; Washington , DC : TSI, 1995. p.1-13.

LOBATO, E. **Adubação fosfatada em solos da região centro-oeste**. In: ADUBAÇÃO fosfatada no Brasil. Brasília: [s.n], 1982. p. 201-240.

LOPES, A.S. Produção e demanda de fertilizantes nitrogenados e sulfatados: Tendências e desafios. In: NITROGÊNIO e enxofre na agricultura brasileira. Piracicaba : Potafos, 2006. p.1-2 (Encarte Técnico, n. 114).

LOPES, M.C.B.; ROSSO, A.F.; LOPES, S.I.G.; CARMONA, P.S.; LEITES, A.; ULBRICH, A. LOUZANO, L.C. Irga 422 CL: a nova cultivar desenvolvida pelo programa de melhoramento genético do Instituto Rio Grandense do Arroz para o sistema de produção clearfield. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 3.; REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 25., 2003. Balneário Camboriú. **Anais...Balneário Camboriú**, 2003. p.3-5.

MACHADO, M.O. **Adubação e calagem para a cultura do arroz irrigado no Rio Grande do Sul**. Pelotas: EMBRAPA-CPATB, 1993. 63p. (Boletim de pesquisa, 2).

MACHADO, M.O.; PÖTTKER, D. **Adubação mineral (NPK) de arroz irrigado em solos de Santa Catarina**. Florianópolis: EMPASC, 1979. (Datilografado).

MALAVOLTA, E. **Nitrogênio e enxofre nos solos e culturas brasileiras**. São Paulo: Centro de Pesquisa e Promoção do Sulfato de Amônio, 1982. 59p. (Boletim Técnico, 1).

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; ROSOLEM, C.A.; KLIEMANN, H.J.; FAGERIA, N.K.; GUIMARÃES, P.T.G.; MALAVOLTA, M. Sulphur in brazilian agriculture. **Sulphur in agriculture**, Washington, v.11, p.2-5, 1987.

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.

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.

MEHLICH, A; Influence of sorbed hydroxyl and sulfate on liming efficiency, pH and conductivity. **Soil Science Society American Proceedings**, Madison, v.28, p.496-499, 1964.

MIELNICZUK, J. Adubação do Trigo no Brasil. In: OSÓRIO, E.A. (Ed.) **Trigo no Brasil**. Campinas : Fundação Cargill, 1982. p. 291-317.

MOREIRA, F.; SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2002. p. 338-334.

MUZILLI, O.; LANTMANN, A.F.; TORNERO, M.T. Reposas do trigo a fósforo e potássio como base de interpretação das análises de solo para a adubação da cultura no Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.3, p.93-96, 1979.

NASCIMENTO, J.A.L.; MORELLI, M. Enxofre em solos do Rio Grande do Sul. I – Formas no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.4, p.131-135, 1980.

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.

NEPTUNE, A.M.L.; TABATABAI, M.A.; HANWAY, J.J. Sulphur fractions and carbon-nitrogen-phosphorus-sulphur relationship in some Brazilian and Iowa soils. **Soil Science Society American Proceeding**, Madison, v.39, n.1, p.51-55, 1975.

NOGGLE, J.C.; MEAGHER, J.F.; JONES, U.S. Sulfur in the atmosphere and its effects on plant growth. . In: SULFUR in agriculture. Madison : ASA : CSSA : SSSA , 1986. p.251-278. (Agronomy monograph, 27).

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**, Oxford, v.34 p.1425– 1438, 2002.

OLSON, R.A.; REHM, G.W. Sulfur in precipitation and irrigation waters and its effects on soil and plants. . In: SULFUR in Agriculture. Madison : ASA : CSSA : SSSA , 1986. p. 279-293. (Agronomy monograph, 27).

OSORIO F<sup>o</sup>, B. D. **Dinâmica de enxofre no sistema solo e respostas das culturas à adubação sulfatada**. 2006. 75f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

PARFITT, R.L.; SMART, R.S.C. The mechanism of sulfate absorption of iron oxides. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 42, p. 48-50,1978.

PATELLA, J.F. Ação do sulfato de amônio na cultura do arroz irrigado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 9., 1963, Fortaleza. **Anais...Fortaleza**, 1963. 7p. Mimeografado.

PATRICK, W.H.; REDDY, C.N. **Chemical changes in rice soils**. **Soils & Rice**. Los Banos, Philippines : International Rice Research Institute, 1978. p.361 – 379.

PONNAMPERUMA, F.N. Chemical kinetics of wetland rice soils relative to soil fertility. In: IRRI (Ed). **Wetland soils**: characterization, classification and utilization. Los Banos, Philippines : [s.n.], 1984. p.71-89.

PULVER, E.; CARMONA, L.C. **Reduzindo as lacunas de produtividade em arroz irrigado na Venezuela e Rio Grande do Sul, Brasil**. Cachoeirinha: IRGA, RS, 2003. p.9-54.

PULVER, E.; CARMONA, L.C.; CARMONA, F.C. Tratamento de sementes como estratégia de manejo para altas produtividades. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 4.; REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 26., 2005, Santa Maria. **Anais...Santa Maria**, 2005. v 2, p.129-131.

RAIJ, B van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação de calagem para o estado de São Paulo**. 2ed. Campinas: Instituto Agrônomo/Fundação IAC, 1997. 285p. (Boletim técnico, 100).

RAIJ, B. van; FEITOSA, C.T.; CARMELLO, A.C.Q. A Adubação fosfatada no Estado de São Paulo. In: ADUBAÇÃO fosfatada no Brasil. Brasília: [s.n], 1982. p. 103-136.

RESURRECCION, A. ; MAKINO,A. ; BENNET,J. ; MAE, T. Effects of sulphur nutrition on the growth and photosynthesis of rice. **Soil Science and Plant Nutrition**, Tokio, v.47, p.611-620, 2001.

RIOBUENO, C.M. Respuesta de FEDEARROZ 2000 a la fertilización con azufre. **Revista Arroz**, Bogotá, v.51, p.85-87, 2003.

SCHLINDWIEN, J. A. **Calibração de métodos de determinação e estimativa de doses de fósforo e potássio em solos sob o sistema plantio direto**. 2003. 169f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

SCIVITTARO, W.B.; MACHADO, M.O. **Adubação e calagem para a cultura do arroz irrigado**. In: GOMES, A.S.; MAGALHÃES, A.M. **Arroz Irrigado no Sul do Brasil**. Brasília : Embrapa, 2004. cap.9, p.259.

SIMS, J.T. Soil fertility evaluation. In: SUMMER, M.E. **Handbook of soil science**. New York, 1999. p. D-113- D-153.

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.

TABATABAI, M.A. Sulphur oxidation and reduction in soils. In. METHODS of soil analysis, part 2: Microbiological and Biochemical properties. Madison: SSSA, 1993. p. 1067-1078. (SSSA Book Series, 5).

TAKAHASHI, J. **Natural supply of nutrients in relation to plant requirements**. Los Banos : International Rice Research Institute, 1964. p.287-290.

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).

THOMPSON, J.F. ; SMITH, I.K. ; MADISON,J.T. Sulfur metabolism in plants. In: SULFUR in agriculture. Madison : ASA : CSSA :SSSA , 1986. p.57-116. (Agronomy monograph, 27).

TISDALE, S.L.; NELSON, W.L; BEATON, J.D. **Soil fertility and fertilizers**. 5ed. New Jersey: Macmillan,1993. 634p.

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).

TRUDINGER, P.A. Chemistry of the sulfur cycle. In: SULFUR in agriculture. Madison : ASA : CSSA : SSSA , 1986. p.1-22. (Agronomy monograph, 27).

WAINWRIGHT, M. Sulfur oxidation in soils. **Advances in agronomy**, San Diego, CA, v.37, 349-396, 1984.

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.

