

**Universidade de São Paulo  
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Balço de nitrogênio e enxofre no sistema solo-cana-de-açúcar no ciclo de  
cana-planta**

**Isabela Bologna-Campbell**

**Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em  
Agronomia. Área de concentração: Solos e Nutrição de  
Plantas**

**Piracicaba  
2007**

**Isabela Bologna-Campbell**  
**Engenheiro Agrônomo**

**Balanco de nitrogênio e enxofre no sistema solo-cana-de-açúcar no ciclo de cana-planta**

Orientador:  
Prof. Dr. **PAULO CESAR OCHEUZE TRIVELIN**

Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em  
Agronomia. Área de concentração: Solos e Nutrição de  
Plantas

**Piracicaba**  
**2007**

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Bologna-Campbell, Isabela

Balanço de nitrogênio e enxofre no sistema solo-cana-de-açúcar no ciclo de  
cana-planta / Isabela Bologna-Campbell. - - Piracicaba, 2007.  
112 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2007.  
Bibliografia.

1. Adubação 2. Cana-de-açúcar 3. Enxofre 4. Isótopo 5. Nitrogênio  
6. Relação solo-planta I. Título

CDD 633.61

**“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”**

Aos meus amados pais,  
**Renato e Lúcia Helena**, pela oportunidade da vida, amor incondicional, dedicação sem igual e esforços sem limites

**OFEREÇO.**

Aos meus irmãos,  
**Marcio e Samantha**, exemplos de caráter, amizade e verdadeira definição de família

Ao meu marido  
**Adriano**, pelo companheirismo, paciência, equilíbrio e amor acima de tudo

**DEDICO.**

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Paulo Cesar Ocheuze Trivelin, verdadeiro orientador, primeiramente pela amizade e dedicação, também pelos ensinamentos sem limites e exemplos de caráter e ética profissional;

Aos professores Dr. Paulo Leonel Libardi, Jairo Antônio Mazza e Francisco Antônio Monteiro, pelas críticas e sugestões apresentadas no exame de qualificação;

À Prof<sup>a</sup>. Dra. Sônia Maria De Stefano Piedade, pela ajuda nas análises estatísticas;

Ao Conselho do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas (ESALQ/USP) e Conselho Nacional de Pesquisa (CNPQ), pela oportunidade e concessão de bolsa de estudos para realização deste curso;

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo Auxílio a Pesquisa (Processo FAPESP N<sup>o</sup>: 2003/13371-5);

Ao Centro de Pesquisa e Promoção Sulfato de Amônio (SN-Centro), pelo financiamento de parte do projeto;

À Estação Experimental do Pólo Regional Centro Sul (APTA 15) e seus funcionários, pela concessão da área experimental e apoio na realização do trabalho;

Aos pesquisadores da Apta Regional Centro Sul Dra. Raffaella Rossetto e Dr. Edmilson José Ambrosano, pelo auxílio no desenvolvimento do projeto;

Aos professores do Laboratório de Isótopos Estáveis (CENA/USP), Dr. José Albertino Bendassolli, Dr. Jefferson Mortatti e Dr. Helder de Oliveira, pelos ensinamentos e transmissão de conhecimentos;

A todos os funcionários e estagiários do Laboratório de Isótopos Estáveis (CENA/USP), pela ajuda constante para a realização do trabalho e harmoniosa convivência;

Aos amigos André Cesar Vitti, Carlos Eduardo Faroni, Anderson Lange, Henrique Junqueira Franco, Tatiele Fenilli, Virgínia Damin e Rafael Otto, pela amizade, convívio e troca de experiências;

Para todas as pessoas que contribuíram de todas as formas durante a realização deste trabalho.

**MUITO OBRIGADA**

## SUMÁRIO

RESUMO -----	6
ABSTRACT -----	7
1 INTRODUÇÃO -----	8
2 DESENVOLVIMENTO -----	10
2.1 Revisão bibliográfica -----	10
2.1.1 Cana-de-açúcar: importância econômica e perspectivas -----	10
2.1.2 A cana-de-açúcar e a necessidade de nitrogênio -----	11
2.1.3 Colheita sem despalha a fogo: mudanças no manejo da adubação nitrogenada -----	12
2.1.4 Aproveitamento pela cana-de-açúcar do N-fertilizante e do N-mineralizado dos resíduos culturais -----	15
2.1.5 Perdas de nitrogênio no solo por lixiviação -----	18
2.1.6 A cana-de-açúcar e a necessidade de enxofre -----	19
2.1.7 Panorama atual da fertilização com enxofre na cana-de-açúcar -----	21
2.1.8 Mineralização do enxofre dos resíduos da cultura -----	22
2.1.9 Perdas de enxofre do sistema solo-cana-de-açúcar -----	25
2.1.10 Sinergia de absorção entre N e S -----	26
2.1.11 Uso do isótopo <sup>34</sup> S em estudos de balanço do nutriente -----	28
2.2 Material e métodos -----	29
2.2.1 Caracterização química e física do solo -----	29
2.2.2 Delineamento experimental e tratamentos -----	31
2.2.3 Montagem dos vasos -----	34
2.2.4 Calagem e incorporação dos resíduos culturais -----	35
2.2.5 Adubações e plantio -----	35
2.2.6 Tratos culturais e condução da cultura -----	36
2.2.7 Coleta da solução percolada no solo -----	39
2.2.8 Colheita do experimento -----	40
2.2.9 Cálculos de balanço isotópico ( <sup>15</sup> N e <sup>34</sup> S) -----	41
2.2.10 Análise dos resultados -----	42
2.3 Resultados e discussão -----	43

2.3.1 Solução percolada pela terra dos vasos -----	43
2.3.2 Perda de nitrogênio ( $^{15}\text{N}$ ) por lixiviação -----	46
2.3.3 Perda de enxofre ( $^{34}\text{S}$ ) por lixiviação -----	50
2.3.4 Acúmulo de massa de matéria seca na cana-de-açúcar -----	57
2.3.5 Acúmulo de nitrogênio e enxofre na cana-de-açúcar -----	59
2.3.6 Produção e qualidade tecnológica dos colmos -----	66
2.3.7 Utilização pela cana-de-açúcar do $^{15}\text{N}$ -fertilizante e $^{15}\text{N}$ -resíduo cultural -----	69
2.3.8 Efeito residual no solo do $^{15}\text{N}$ -fertilizante e $^{15}\text{N}$ -resíduo cultural -----	78
2.3.9 Recuperação total do $^{15}\text{N}$ -fertilizante e $^{15}\text{N}$ -resíduo cultural no sistema solo-cana-de-açúcar -----	80
2.3.10 Utilização pela cana-de-açúcar do $^{34}\text{S}$ -fertilizante -----	82
2.3.11 Efeito residual no solo do $^{34}\text{S}$ -fertilizante -----	86
2.3.12 Recuperação total do $^{34}\text{S}$ -fertilizante no sistema solo-cana-de-açúcar -----	87
2.4 Considerações finais -----	89
3 CONCLUSÕES -----	92
REFERÊNCIAS -----	93
ANEXOS -----	109

## RESUMO

### Balanco de nitrogênio e enxofre no sistema solo-cana-de-açúcar no ciclo de cana-planta

O trabalho teve por objetivo avaliar o aproveitamento e a distribuição do nitrogênio e do enxofre adicionado ao solo como fertilizante no sistema solo-cana-de-açúcar (cana-planta), utilizando-se os isótopos estáveis  $^{15}\text{N}$  e  $^{34}\text{S}$ . Objetivou-se também avaliar a contribuição do nitrogênio mineralizado dos resíduos culturais marcados em  $^{15}\text{N}$  e incorporados ao solo, numa condição próxima a de reforma de canavial sem despalha a fogo. Foram quantificadas as perdas por lixiviação de N e S proveniente do solo e dos fertilizantes, com verificação da resposta em produção e qualidade da cana-planta à adubação com N e S no plantio, e realizado o balanço final do N e S no sistema solo-cana-de-açúcar. A pesquisa foi desenvolvida na Estação Experimental Apta 15 em Piracicaba/SP, com o uso de vasos plásticos de 220 L preenchidos com aproximadamente 250 kg de solo de textura arenosa. Foram realizados, simultaneamente, dois experimentos em delineamento experimental de blocos casualizados com quatro repetições. O primeiro experimento constituiu-se de um fatorial completo 4 X 2 (quatro doses de N: 0, 1,2, 2,4 e 3,6 g N vaso<sup>-1</sup> e duas doses de S: 0 e 2,1 g S vaso<sup>-1</sup>) e com aplicação de fertilizantes marcados isotopicamente ( $^{15}\text{N}$ - 10% em átomos e  $^{34}\text{S}$ - 9,5% em átomos) e resíduos culturais (folhas secas, ponteiros e raízes + rizomas) sem marcação isotópica. O segundo experimento constituiu-se de cinco tratamentos com a combinação dos níveis de N e S, com a diferença de terem recebido resíduo cultural com marcação isotópica ( $^{15}\text{N}$ - 0,827% em átomos). Na camada superficial de terra (0-25cm) foram adicionados os restos culturais e o calcário. Após a calagem foi realizada a aplicação dos tratamentos e o plantio com o transplante de três gemas por vaso da cultivar de cana-de-açúcar SP 80-3280. Os experimentos tiveram duração de 16 meses. O aumento na extração de N, proporcionado pelo aumento das doses de N-fertilizante resultou em sinergismo na extração de S. Nas condições do trabalho, com limitação da nutrição nitrogenada da cana-planta, a fertilização com S associada à de N não resultou em efeito sinérgico na produtividade da cultura; entretanto houve resposta em produtividade às doses crescentes de N, sem haver resposta à aplicação de S. A lixiviação de S (S-fertilizante e S-nativo do solo) diminuiu com o aumento das doses de N. O balanço final para o N indicou aproveitamento pelas plantas de 35% do N-fertilizante e 14% dos resíduos culturais, com efeito residual do N dessas fontes de 34 e 75% do N respectivamente. O N não contabilizado no sistema foi de 10 e 31% , respectivamente, para as fontes N-resíduo cultural e N-fertilizante, o que se atribuiu a possíveis perdas de amônia por volatilização do solo e pela parte aérea e, também, a desnitrificação. Para o balanço final de S verificou-se aproveitamento de 32% do S-fertilizante pelas plantas, com efeito residual no solo de 43% da fertilização. O S não contabilizado no sistema atingiu valor máximo de 10% do total aplicado, sendo atribuído à perda por volatilização de  $\text{SO}_2$  pela parte aérea da cana-de-açúcar.

Palavras-chave:  $^{15}\text{N}$ ;  $^{34}\text{S}$ ; Balanço isotópico; Adubação de plantio



## ABSTRACT

### Nitrogen and sulfur balance in the soil-sugarcane system during the plant cane cycle

This work's objective was to evaluate the use and distribution of nitrogen and sulfur added to the soil as fertilizers in the soil-sugarcane system (plant cane), using the stable isotopes  $^{15}\text{N}$  and  $^{34}\text{S}$ . The study also aimed to evaluate the contribution of nitrogen mineralized from sugar cane crop residues labeled with  $^{15}\text{N}$  and incorporated into the soil, in a condition similar to that found in the renovation of a sugarcane plantation without burning the trash. Losses of N and S from the soil and from the fertilizers via leaching were quantified. Sugarcane responses in terms of yield and plant cane quality to N and S fertilization at planting were determined, and the N and S final balances in the soil-sugarcane system were calculated. The research was conducted at the Apta 15 Experiment Station in Piracicaba/SP, using 220 L-capacity plastic pots filled with approximately 250 kg of a sandy-textured soil. Two experiments were conducted simultaneously in a random block experimental design with four replicates. The first experiment consisted of a full 4 X 2 factorial arrangement (four N doses: 0, 1.2, 2.4, and 3.6 g N pot<sup>-1</sup> and two S doses: 0 and 2.1 g S pot<sup>-1</sup>) and application of isotopically labeled fertilizers ( $^{15}\text{N}$ - 10% in atoms and  $^{34}\text{S}$ - 9.5% in atoms) and crop residues (dry leaves, shoots and roots + rhizomes) without isotopic labeling. The second experiment consisted of five treatments involving those N and S level combinations, except that they received isotopically labeled crop residues ( $^{15}\text{N}$ - 0.827% in atoms). Crop residues and lime were added to the soil surface layer (0-25cm). The treatments were applied after liming, and planting was accomplished by transplanting three buds per pot of sugarcane cultivar SP 80-3280. The experiments lasted 16 months. The increased N extraction provided by increased fertilizer N doses resulted in S-extraction synergism. In the conditions of this study, under nitrogen nutrition limitation in plant cane, S fertilization in association with N fertilization did not result in a synergistic crop productivity effect; however, there was a productivity response to increasing N doses, without response to S application. S leaching (fertilizer S and native S from the soil) decreased as N doses increased. The final N balance indicated a 35% utilization by plants of fertilizer-N and 14% of crop residue-N, with residual effects in those sources of 34 and 75% N, respectively. The unaccounted N in the system were 10 and 31%, respectively, for crop residue-N and fertilizer-N sources, which were attributed to ammonia losses by volatilization from the soil and via the above-ground part of the plant, and to denitrification. A 32% utilization of fertilizer-S by the plants was verified in the final S balance, with a residual effect in the soil of 43% of fertilization. S not accounted for in the system reached a maximum value of 10% of the total applied, attributed to losses by  $\text{SO}_2$  volatilization via the above-ground part of the sugarcane plants.

Keywords:  $^{15}\text{N}$ ;  $^{34}\text{S}$ ; Isotopic balance; Planting fertilization

## 1 INTRODUÇÃO

A cultura da cana-de-açúcar desempenha papel de destaque no agronegócio brasileiro, representando a indústria sucroalcooleira cerca de 2% das exportações nacionais, além de gerar quantidade significativa de empregos e contribuir de maneira efetiva para o crescimento do mercado interno de bens de consumo. As perspectivas para o setor sucroalcooleiro são promissoras em médio prazo, principalmente devido à quebra dos subsídios do açúcar europeu e a conquista de novos mercados consumidores. Aliado a isso, a crescente preocupação da sociedade mundial em relação às condições do ambiente, em especial da atmosfera terrestre, têm levado a reduções do uso dos combustíveis fósseis, responsáveis pela emissão de gases poluentes, e uso cada vez maior de fontes de energia renováveis, caso do álcool. Neste contexto, a produção agrícola brasileira de cana-de-açúcar provavelmente acompanhará o crescimento da demanda mundial por açúcar e álcool. A estimativa da produção agrícola de cana-de-açúcar para o ano safra de 2006/2007 é de 470 milhões de toneladas em área plantada de 6,2 milhões de hectares, o que representa uma produtividade média de  $76 \text{ t ha}^{-1}$ , valor este muito distante do potencial produtivo das variedades cultivadas no país, o que faz com que as pesquisas se direcionem em busca de solucionar as causas desse déficit produtivo.

Nas diversas regiões canavieiras do Brasil, a disponibilidade adequada de nutrientes minerais no solo é considerada um dos fatores de maior limitação à produtividade da cultura, com destaque para o nitrogênio, podendo-se ainda considerar em muitos casos, que a utilização deste nutriente pode ser reduzida pela carência de enxofre, ficando implícito uma sinergia entre ambos.

O nitrogênio no solo possui características de elevada dinâmica, sendo sua disponibilidade governada por fatores intrínsecos ao manejo adotado para o sistema. É devido a essa elevada dinâmica que a resposta da cana-planta à adubação nitrogenada de plantio é uma questão ainda não muito bem definida. Aliado a isso, tem-se a reforma de canavial sem despalha a fogo, com permanência no solo dos resíduos da cultura, como um dos fatores de influência no manejo do nutriente para a cana-de-açúcar. Dessa forma, o estudo das reais contribuições dos diversos compartimentos de nitrogênio no solo, para a nutrição e produção da cana-de-açúcar, é extremamente importante na elucidação da dinâmica do elemento. Para isso, o uso de fertilizantes e resíduos culturais marcados em  $^{15}\text{N}$ , adiciona um passo a mais nas pesquisas da dinâmica do nitrogênio no sistema solo-cana-planta.

No que se refere ao enxofre, observa-se de modo geral pouca preocupação com seu fornecimento para a cultura, o que é confirmado pelo reduzido número de estudos que envolvem a adubação e a nutrição por enxofre na cana-de-açúcar. Um dos motivos que contribuem para a ausência de pesquisas com o nutriente é que provavelmente suas necessidades estão sendo supridas indiretamente por outras vias, tais quais a gessagem e uso de resíduos orgânicos (vinhaça e torta de filtro). Entretanto, com o manejo nutricional visando altas produtividades, o sistema será limitado pelo nutriente que estiver presente em quantidade aquém da necessária, o que para o caso do enxofre há grande possibilidade de ocorrência, principalmente em solos arenosos e com baixos teores de matéria-orgânica, ou nos sistemas com elevada adição de nitrogênio, uma vez que o aumento no fornecimento de N implica na maior utilização de S pelas plantas. Dessa forma, o uso do isótopo de enxofre ( $^{34}\text{S}$ ) no estudo da dinâmica do nutriente no sistema solo-cana-planta, adiciona de modo inovador conhecimentos que resultam, sem dúvida nenhuma, na otimização do uso do nutriente pela cana-de-açúcar.

Pelo exposto, o presente trabalho de pesquisa tem por objetivos: (a) avaliar o aproveitamento e a distribuição do nitrogênio e do enxofre adicionado ao solo como fertilizante, no sistema solo-cana-de-açúcar, utilizando-se os isótopos estáveis  $^{15}\text{N}$  e  $^{34}\text{S}$ ; (b) avaliar a real contribuição do nitrogênio mineralizado dos resíduos culturais marcados em  $^{15}\text{N}$  e incorporados ao solo na reforma de canavial sem despalha a fogo; (c) quantificar as perdas por lixiviação de nitrogênio e enxofre proveniente do solo e dos fertilizantes; (d) verificar a resposta em produção e qualidade da cana-planta à adubação com N e S no plantio; (e) realizar o balanço do N e S no sistema solo-cana-de-açúcar, por meio do uso de fertilizantes- $^{15}\text{N}$  e  $^{34}\text{S}$  e resíduo cultural- $^{15}\text{N}$ .

## **2 DESENVOLVIMENTO**

### **2.1 Revisão bibliográfica**

#### **2.1.1 Cana-de-açúcar: importância econômica e perspectivas**

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com área plantada de 5,9 milhões de hectares e colheita de cerca de 430 milhões de toneladas na safra 2005/2006, o que reflete conseqüentemente, no país maior produtor mundial de açúcar e álcool. No agronegócio brasileiro a indústria sucroalcooleira desempenha papel de destaque, representando cerca de 2% das exportações nacionais e gerando, em 2003, divisas da ordem de US\$ 1,4 bilhões (COMPANHIA NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO, 2006a).

Devido à elevada demanda externa por açúcar e álcool, na safra 2006/2007 prevê-se crescimento de 5% na produção de cana-de-açúcar. Estima-se que no mercado internacional de açúcar haja déficit de 5 milhões de toneladas. No caso do etanol, a demanda internacional também é crescente, pois vários países estão tentando substituir o derivado de petróleo MTBE (metil-tércio-butil-éter) como combustível na gasolina, e no cenário nacional, o uso cada vez maior dos chamados carros bicombustíveis impulsionam o consumo de álcool. Na distribuição da produção nacional, espera-se que na safra 2006/2007, por volta de 88% do álcool seja destinado ao mercado interno, em oposição a 69% do açúcar que deverá ser destinado à exportação. Para suprir a crescente demanda da cana-de-açúcar e seus subprodutos, 15 novas unidades produtoras devem entrar em operação em 2006 e somar-se às 370 já existentes no país (AGÊNCIA DE NOTÍCIAS ÁRABE-BRASIL, 2006). Neste contexto, a produção agrícola brasileira de cana-de-açúcar, provavelmente, acompanhará o crescimento da demanda mundial por açúcar e álcool e o primeiro levantamento de previsão de safra 2006/2007 realizado pela Companhia Nacional de Abastecimento prevê uma estimativa da produção agrícola de cana-de-açúcar de 469,8 milhões de toneladas, com área plantada de 6,2 milhões de hectares, o que representa uma produtividade média de 76 t ha<sup>-1</sup> (COMPANHIA NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO, 2006b). Essa produtividade está distante do potencial produtivo das variedades cultivadas em solo brasileiro, fazendo com que as pesquisas se direcionem para solucionar as causas desse déficit produtivo.

### 2.1.2 A cana-de-açúcar e a necessidade de nitrogênio

A grande importância do nitrogênio para a cana-de-açúcar diz respeito ao fato de ela ser uma planta de metabolismo de carbono do tipo C<sub>4</sub>, caracterizado por altas taxas de fotossíntese líquida e eficiência na utilização do nitrogênio e da energia solar, sendo altamente eficiente na produção de fotoassimilados. Como o nitrogênio é parte constituinte de todos os aminoácidos, proteínas e ácidos nucleicos, participando direta ou indiretamente de vários processos bioquímicos, a sua carência promoverá a diminuição na síntese de clorofila, e aminoácidos essenciais, e também da energia necessária à produção de carboidratos e esqueletos carbônicos, refletindo diretamente no desenvolvimento e rendimento da cultura (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997).

No solo, o nitrogênio disponível às plantas é suprido pela mineralização da matéria-orgânica, tanto a nativa como a recém incorporada, pela fixação biológica e pela adição de fertilizantes nitrogenados, e no ciclo da cana-planta deve-se também considerar como fonte de nitrogênio o nutriente contido no tolete de plantio (colmo-semente) e, para o ciclo das soqueiras, as reservas em rizomas e raízes (TRIVELIN, 2000).

Apesar de todo o conhecimento existente em relação ao manejo do nitrogênio no sistema solo-cana-de-açúcar, uma questão ainda não está devidamente esclarecida, ou seja, o conceito que se tem da baixa resposta do ciclo agrícola de cana-planta à adubação nitrogenada. Verifica-se, na literatura, que grande número de experimentos com cana-planta não apresentaram resposta em produtividade ao nitrogênio, o que se têm atribuído à fixação biológica do N atmosférico; às perdas por lixiviação do N-fertilizante; ao vigor do sistema radicular da cana-planta comparada ao de soqueiras; às condições climáticas, como temperatura e pluviosidade; à melhoria da fertilidade do solo após a reforma dos canaviais, associada à calagem, ao preparo mecânico e à incorporação de restos da cultura anterior (AZEREDO et al., 1986; CARNAÚBA, 1989; ORLANDO FILHO et al., 1999; URQUIAGA; CRUZ; BODDEY, 1992;). Carneiro; Trivelin e Victoria (1995) procuraram demonstrar que o conteúdo de nitrogênio no colmo-semente também pode contribuir para a nutrição nitrogenada da cana-de-açúcar e, juntamente com os demais fatores que disponibilizam o nitrogênio à cultura, justificaria, em parte, a falta de resposta da cana-planta à fertilização nitrogenada. Outros fatores, tais como variedades responsivas a nitrogênio e atendimento aos limites críticos de disponibilidade de nutrientes no solo também

podem ser citados como justificativas à falta de resposta da cana-planta a adubação nitrogenada. A respeito deste último fator, pode-se destacar que as maiorias das avaliações em que não se obteve resposta a nitrogênio foram desenvolvidas antes do uso do gesso (fonte de S) no Estado de São Paulo. Não seria o caso de ser questionado se a falta de resposta da cana-planta a fertilização nitrogenada não é devido ao fornecimento inadequado de enxofre ao solo?

### **2.1.3 Colheita sem despalha a fogo: mudanças no manejo da adubação nitrogenada**

Um dos principais fatores que reflete no manejo da adubação nitrogenada e, conseqüentemente, na resposta da cana-planta ao nitrogênio é a colheita sem despalha a fogo. Durante muito tempo quase toda área cultivada com cana-de-açúcar no Brasil esteve submetida à queima previamente à colheita. Entretanto, a partir do ano de 1997, por força de legislação, a colheita de cana queimada no Estado de São Paulo passou a ser substituída gradualmente pela colheita de cana sem despalha a fogo (“cana-crua” ou “cana verde”). Atualmente, aproximadamente 33% dos canaviais na região Centro-Sul são colhidos sem queima (INFOSUCRO, 2003).

Os canaviais colhidos sem a queima preservam sobre o solo os resíduos culturais que modificam as propriedades físico-químicas e biológicas do solo e, conseqüentemente, a disponibilidade de nitrogênio à cultura. Como principais efeitos da manutenção da cobertura morta ou “mulch” no solo pode-se citar: aumento na infiltração de água no solo, diminuição na temperatura do solo e na erosão e evapotranspiração edáfica, melhoria na estrutura do solo e CTC, além de servir como fonte de nutriente após sua mineralização (OLIVEIRA et al., 1999a).

A produção de palha de um canavial sob colheita mecanizada inclui folhas, bainhas e ponteiros, além de quantidade variável de colmos, podendo variar de 10 a 30 t ha<sup>-1</sup>ano<sup>-1</sup> de matéria seca (MS). Esse material contém em torno de 40 a 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, e metade desses valores como S, que podem vir a ser disponibilizados à cultura por ação de microrganismos do solo (ABRAMO FILHO et al., 1993; OLIVEIRA et al., 1999b; TRIVELIN; VICTORIA; RODRIGUES, 1995).

A colheita da cana-de-açúcar sem queima da palha tem sido empregada de modo intensivo e com resultados positivos há vinte anos na Austrália (WOOD, 1991). No Brasil, em experimento em Cruangi (PE), com despalha manual, Urquiaga et al. (1991) verificaram que, das 74 t ha<sup>-1</sup> de

palha depositada na superfície do solo, somente 6 t ha<sup>-1</sup> permaneceram como resíduo, cobrindo o solo, após 5 anos, enquanto que no sistema com queima houve acúmulo de apenas 0,4 t ha<sup>-1</sup> de material residual. Esses resultados indicam que 81% da palha foi degradada e, possivelmente, mineralizada pelos microrganismos do solo, evidenciando um processo relativamente rápido nas condições do nordeste brasileiro. A média de produtividade de cinco soqueiras de cana-de-açúcar sem queima (67 t ha<sup>-1</sup>), superou em 10% a da cana-de-açúcar com queima, sendo observado que nos anos mais secos ou de irregular distribuição de chuvas, o sistema sem queima foi 25% superior.

Outro fator a ser considerado sobre a manutenção dos resíduos da colheita sobre o solo é que esse é utilizado, juntamente com outros fatores, como explicação para a ausência de resposta à adubação nitrogenada de plantio. Essa hipótese considera que a planta absorveria o N mineralizado da palha, entretanto, para validar a afirmação se faz necessário desconsiderar o mecanismo de imobilização de N nativo do solo ou adicionado pelo fertilizante quando da adição de resíduo cultural de elevada relação C:N, relação essa em torno de 100 para a palhada residual de cana-de-açúcar, que possui, em média, 390 a 450 g kg<sup>-1</sup> de C e 4,6 a 6,5 g kg<sup>-1</sup> de N (NG KEE KWONG et al., 1987; RIPOLI et al. 1991; TRIVELIN; VICTORIA; RODRIGUES, 1995).

Com a intensa imobilização de nitrogênio proporcionada pela adição ao solo de resíduo cultural de elevada relação C:N, a expressão da resposta da cana-planta à adubação nitrogenada de plantio poderá ocorrer, uma vez que adiciona-se ao sistema N mineral prontamente disponível para a absorção pela planta e pelos microrganismos decompositores, os quais utilizam o N como fonte de energia para iniciar suas atividades de decomposição.

A intensidade de mineralização da matéria-orgânica adicionada ao solo depende de diversos fatores, tais como: tipo de solo, teor de matéria-orgânica e N-total, relação C:N, teor de lignina e polifenóis do material incorporado, tempo de uso do solo, pH, temperatura, umidade, suprimento de nutrientes inorgânicos e interações solo-planta (BLACK, 1968; JANSSON; PERSSON, 1982; MYERS et al., 1994).

Os complexos orgânicos, tais como o ácido húmico, acumulam-se no solo devido ao seu elevado grau de recalcitrância e resistência ao ataque microbiano, existindo uma série de outros fatores que controlam a cinética de transformação da matéria orgânica em N-inorgânico (JANZEN; KUCEY, 1988). De forma geral, após a adição de material orgânico ao solo poderá ocorrer a imobilização ou mineralização do elemento pela biomassa microbiana, sendo que os

dois processos ocorrem simultaneamente, e a quantidade de nitrogênio do material em decomposição é que determinará qual deles será predominante (CASSMAN; MUNNS, 1980).

Para os resíduos de cana-de-açúcar, Gava et al. (2002) e Oliveira et al. (1999a), observaram reduzida mineralização de nitrogênio no período de um ano agrícola, disponibilizando no solo pequena quantidade de N. Para os nutrientes presentes no material vegetal na forma iônica ou ligados a compostos de alta solubilidade, sua liberação é elevada e rápida (NG KEE KWONG et al., 1987; OLIVEIRA et al. 2002b; JANZEN; KUCEY, 1988). Desse modo, a contribuição da palhada para a nutrição da cana-de-açúcar deverá ser pequena em curto prazo, uma vez que a decomposição de resíduos de alta relação C:N estabelece uma competição entre os vegetais, por meio da absorção radicular, e os microrganismos do solo (JINGGUO; BAKKEN, 1987). A baixa contribuição da mineralização da palhada na nutrição nitrogenada da cana-de-açúcar, em apenas um ano agrícola, foi confirmada por Gava et al. (2002), trabalhando com palha marcada em  $^{15}\text{N}$ , em que a parte aérea da cultura acumulou apenas  $2,4 \text{ kg ha}^{-1}$  de N do resíduo, sendo esta quantidade disponibilizada, em sua maioria, no final do ciclo da cana-de-açúcar.

Tendo em vista esses aspectos, a maior mudança no sistema da adubação nitrogenada proporcionada pela colheita sem despalha a fogo, excluindo-se o manejo das fontes nitrogenadas que não foram abordados por não serem relevantes nesse trabalho, pode ser atribuída à redução, em longo prazo, da quantidade de N da adubação mineral. Embora os resíduos culturais deixados sobre a superfície do solo apresentem baixa quantidade de nitrogênio, quando comparada à reserva do solo, as colheitas sucessivas sem despalha a fogo devem contribuir, com o tempo, para o maior acúmulo de N no solo. Estudos de simulação realizados na Austrália indicaram que a palhada de cana-de-açúcar deixada sobre a superfície do solo, por um período de 20 anos, pode resultar em um processo lento e gradual na redução da adubação em até  $40 \text{ kg ha}^{-1}$  de N (VALLIS et al., 1996). Graham; Haynes e Meyer (2002) citaram que os resíduos da cana-de-açúcar depositados sucessivamente sobre o solo contribuem não apenas para o incremento da matéria-orgânica do solo, mas também no N imediatamente mineralizável e na relação N mineral: N total na superfície do solo.



#### **2.1.4 Aproveitamento pela cana-de-açúcar do N-fertilizante e do N-mineralizado dos resíduos culturais**

Na maioria dos trabalhos com uso de  $^{15}\text{N}$ -fertilizante, a recuperação do N pela cana-de-açúcar foi de aproximadamente 40%, o que pode estar associado ao efeito residual do fertilizante no solo devido sua elevada imobilização (COURTAILLAC et al., 1998; NG KEE KWONG et al., 1986) e também às perdas do N no sistema solo-cana-de-açúcar-atmosfera, tais como as perdas por desnitrificação (TRIVELIN, 2000), lixiviação (OLIVEIRA et al., 1999c), volatilização da amônia (TRIVELIN et al., 1997) e por meio das perdas gasosas de N pela parte aérea da cana-de-açúcar (HOLTAN-HARTWING, BOCKMAN, 1994 e TRIVELIN et al., 2002a).

O baixo aproveitamento do nitrogênio do fertilizante ainda pode estar associado à subestimativas na sua determinação, uma vez que na maioria das experimentações sua determinação é realizada apenas no final do ciclo da cultura, por ocasião da colheita, podendo ter ocorrido perdas do  $^{15}\text{N}$  assimilado pelas plantas ao longo do ciclo. Essas perdas podem, em parte, ocorrer tanto pelas raízes, por exudação, como pela parte aérea, por volatilização. Resultados da subestimativa na determinação do aproveitamento do  $^{15}\text{N}$ -fertilizante foram observados por Trivelin, Rodrigues e Victoria (1996), uma vez que o acúmulo do N-fertilizante foi 1,8 vezes maior para a cana cortada no início da safra (ciclo de 7 meses) em relação ao final da safra (ciclo de 10 meses).

Diversos trabalhos desenvolvidos no Brasil com recuperação do  $^{15}\text{N}$ -fertilizante (sulfato de amônio, uréia e aquamônia) na cana-de-açúcar demonstram que a recuperação está entre 0,2 a 54% do N em cana-planta e soqueiras (BITTENCOURT; FAGANELLO; SALATA, 1986; CAMARGO, 1989; CARNAÚBA, 1989; OLIVEIRA, 1999; RUSCHEL et al., 1978; SALCEDO; SAMPAIO, 1984; SAMPAIO; SALCEDO; BETTANY, 1984 e 1987; TRIVELIN; VICTORIA; RODRIGUES, 1995; VITTI, 1998).

Estudos da recuperação do nitrogênio da palhada com o uso de resíduo vegetal marcado com  $^{15}\text{N}$  foram realizados para a cultura da cana-de-açúcar, nos ciclos de rebrota (soqueiras), portanto, com a permanência da palhada sobre a superfície do solo, sem incorporação. Ng Kee Kwong et al. (1987) nas Ilhas Maurício, utilizaram palhada de cana-de-açúcar marcada com  $^{15}\text{N}$  depositada sobre a superfície do solo e verificaram, após 18 meses de permanência no campo, que a recuperação pela cana-de-açúcar foi de 11 a 14% do nitrogênio da palhada, representando

esses valores menos que 10% do N contido na palhada, sendo que 74 a 83% do N da na palhada permaneceu na matéria-orgânica do solo. Chapman, Hayson e Saffigna (1992) também utilizaram palha de cana-de-açúcar marcada com  $^{15}\text{N}$  e observaram, para as condições da Austrália, que 5% do N-total da palhada foi recuperado na cana-de-açúcar em um ano. Gava et al. (2005) avaliando a contribuição do  $^{15}\text{N}$ -fertilizante (uréia) e do  $^{15}\text{N}$  mineralizado da palhada deixada sobre a superfície do solo em soqueira de cana-de-açúcar, nas condições do Estado de São Paulo, observaram que do N-total acumulado na parte aérea da soqueira, 10 a 16% foi absorvido do fertilizante e, em média, 4% do nitrogênio mineralizado do resíduo cultural, sendo a eficiência de utilização do nitrogênio da uréia pela soqueira, em média 17% e o da palhada 8%. Também nas condições no Estado de São Paulo, Vitti (2003) obteve resultados muito próximos aos de Gava et al. (2005).

Para o ciclo de cana-planta não existe na literatura trabalho que contabilize a real contribuição do N mineralizado do resíduo cultural (raízes, rizomas e palhada), incorporados ao solo na reforma do canavial, no nitrogênio acumulado pela cultura e conseqüente efeito na produtividade. Um dos trabalhos que mais se aproxima desse propósito foi desenvolvido por Vitti (1998) e Trivelin et al. (2002b) em lisímetros com 250 kg de solo arenoso. Os autores verificaram que a cana-planta respondeu à adubação nitrogenada (doses equivalentes a 0, 30, 60 e 90 kg ha<sup>-1</sup> de N-uréia) em produção de colmos e rendimento de açúcar, com resposta linear em produção de matéria-seca e acúmulo de N-total na parte subterrânea, parte aérea e na planta toda, não havendo efeito do tipo de resíduo cultural incorporado ao solo previamente ao plantio (simulação de colheita com e sem despalha a fogo). Em relação à menor e maior dose, constataram ainda que a produção de matéria-seca e o acúmulo de nitrogênio foram, respectivamente, de 29 e 37% superior na parte aérea, de 72 e 70% na parte subterrânea e, 37 e 45% na planta toda. Independente das doses aplicadas à recuperação do  $^{15}\text{N}$ -fertilizante foi de 54%, entretanto, foi verificado que o N absorvido da uréia- $^{15}\text{N}$  representou, na média dos tratamentos, somente 11% do acumulado na planta toda, evidenciando a importância de outras fontes no N assimilado pela cana-planta, tais como o mineralizado do solo ou dos resíduos culturais. Trivelin et al. (2002b) também determinaram que a exigência do nutriente para a produção de colmos foi de 2,4 e 2,1 g de N por kg de colmo, respectivamente, na maior (90 kg ha<sup>-1</sup> de N) e menor (30 kg ha<sup>-1</sup> de N) dose de nitrogênio, considerando o conteúdo de nitrogênio na planta (parte aérea e subterrânea). Levando em conta apenas o nitrogênio acumulado na parte aérea esses índices passaram a 1,6 e

1,7 g de N por kg de colmo, respectivamente, na maior e menor dose. Korndörfer et al. (1997) contabilizando o nitrogênio acumulado na parte aérea, obtiveram, em experimento de campo, o índice médio de 1,4 g de N por kg de colmo, para quatro cultivares de cana-de-açúcar. Observa-se desses índices, que para um rendimento de 100 t ha<sup>-1</sup> de colmos, a exigência de nitrogênio pela cana-planta (N acumulado na planta: parte aérea e sistema radicular) situa-se entre os limites de 140 e 240 kg ha<sup>-1</sup> de nitrogênio, valores estes superiores às doses recomendadas de nitrogênio no plantio de cana-de-açúcar, que para o Estado de São Paulo é de 30 kg ha<sup>-1</sup> de N, a ser aplicado no sulco de plantio, e de 30 a 60 kg ha<sup>-1</sup> de N em cobertura, 30 a 60 dias após o plantio, em função da meta de produtividade (ESPIRONELLO et al., 1996).

A ausência de um comportamento padrão da cana-de-açúcar à utilização do N aplicado no plantio é comprovada em literatura. Em levantamento bibliográfico realizado por Azeredo et al. (1986), em 80% dos 135 experimentos desenvolvidos em diferentes regiões canavieiras do Brasil não foram observadas respostas à fertilização com nitrogênio em cana-planta. Morelli et al. (1997) recomendaram dose de 40 kg ha<sup>-1</sup> de N, exclusivamente no sulco de plantio, mesmo obtendo resposta à adubação de cana-planta em 20% de seus experimentos, em solos distróficos e de textura arenosa. Korndörfer et al. (1997) obtiveram resposta da cana-planta às doses de 30, 60 e 120 kg ha<sup>-1</sup> de N em solos distróficos de textura média no Triângulo Mineiro. Orlando Filho et al. (1999) conseguiram respostas da cana-planta às doses de 60 e 120 kg ha<sup>-1</sup> em solo eutrófico do Estado de São Paulo, e Penatti; Donzelli e Forti (1997), que realizaram experimentos em vários tipos de solo, de Neossolos a Latossolos, recomendaram com base na margem de contribuição agroindustrial (R\$ ha<sup>-1</sup>) a dose de 50 kg ha<sup>-1</sup> de nitrogênio.

Segundo Trivelin et al. (2002b), a cana-planta ao mesmo tempo em que responde em produção a doses crescentes de nitrogênio, acumula mais N de outras fontes que não àquelas do fertilizante. Esses resultados indicam que outras fontes contribuem na nutrição nitrogenada da cultura, podendo-se destacar o N mineralizado da matéria-orgânica do solo e, possivelmente a fixação biológica do N<sub>2</sub> atmosférico (URQUIAGA, CRUZ; BODDEY, 1992), ou, ainda, a absorção da amônia da atmosfera pela folhagem (HOLTAN-HARTWING; BOCKMAN, 1994).

Como as doses de nitrogênio atualmente recomendadas para a cana-planta estão aquém das reais exigências da cultura, e considerando-se, em adição, que a imobilização microbiana e as perdas do nitrogênio do solo indisponibilizam o nutriente à cultura, em especial no sistema com manutenção de palhada e em solo de baixa ou média fertilidade, é notório que a cana-de-açúcar,

no ciclo de cana-planta, na condição de carência de N, não teria como expressar toda a sua potencialidade produtiva. Tendo em vista os aspectos apresentados, se faz necessário estudar as reais contribuições do N-fertilizante e do N-mineralizado do resíduo cultural incorporado ao solo, na resposta da cana-planta em produção, acúmulo de N e qualidade tecnológica.

### **2.1.5 Perdas de nitrogênio no solo por lixiviação**

A perda de um nutriente em profundidade no solo ocorre quando um elemento é arrastado no perfil do solo, juntamente com a água, para fora do ambiente de exploração do sistema radicular de uma planta, o que poderá causar várias conseqüências, desde a redução na eficiência da adubação, queda na fertilidade do solo até a contaminação do lençol freático (BOLOGNA et al., 2006).

O modo e a intensidade da lixiviação são diretamente influenciados pelos fatores morfoclimáticos e pelo sistema de manejo adotado (OLIVEIRA et al., 2002a). Os fatores que influenciam diretamente a massa total e a relação dos íons percolados no solo são: textura, capacidade de troca catiônica (CTC) e aniônica (CTA); dose do fertilizante, solubilidade dos sais, sua afinidade pelos sítios de adsorção do solo e presença de íons acompanhantes; composição dos resíduos culturais incorporados ao solo; intensidade de aproveitamento dos nutrientes da solução do solo pelas plantas e microrganismos e, por último, o fator de influência direta, o volume de chuvas e regime hídrico do solo, o qual influenciará o volume da solução drenada no solo (NG KEE KWONG; DEVILLE, 1984).

A determinação da quantidade de N perdido por lixiviação pode ser realizada pelos métodos da extração da solução do solo por cápsulas porosas (CAMARGO, 1989), coleta de solução percolada em colunas de solo (WANG; ALVA, 1996), coleta de solução percolada em lisímetros (NG KEE KWONG; DEVILLE, 1984), uso da técnica TDR (Time Domain Reflectometry) (KACHANOSKI; PRINGLE; WARD, 1992) e por meio de uso de cálculos estimados (REICHARDT; LIBARDI; URQUIAGA, 1982) e modelos matemáticos de previsão de lixiviação (THORBURN; MEIER; PROBERT, 2005). Todas as estimativas apresentadas possuem suas vantagens e desvantagens, mas especificamente no uso de lisímetros, a maior limitação do método consiste na alteração da estrutura do solo por ocasião de sua coleta e montagem, entretanto a possibilidade de se coletar todo o volume de solução drenada e

quantificar seu conteúdo de nitrogênio torna a quantificação da perda de N por lixiviação mais exata (NG KEE KWONG; DEVILLE, 1984).

Estimativas da quantidade de N perdido por lixiviação por plantas de cana-de-açúcar foram apresentadas por Reichardt, Libardi e Urquiaga (1982), utilizando para cálculo a evapotranspiração e precipitação, concluindo que a cada 1 mm de chuva há lixiviação de 1 mm de  $\text{NO}_3^-$ , assim para 600 mm de água considerando a evapotranspiração menos a precipitação, o  $\text{NO}_3^-$  estaria a 60 cm de profundidade no solo e passível de absorção pelas raízes da cana-de-açúcar. Nesse mesmo trabalho foram observadas perdas de N próximas a  $6 \text{ kg ha}^{-1}$  quando uma precipitação de 1500 mm por ano e com nível de adubação de  $90 \text{ kg ha}^{-1}$  de N.

Oliveira et al. (1999c) constaram perda média acumulada de  $4,5 \text{ kg ha}^{-1}$  de N, com cana-de-açúcar cultivada em lisímetros contendo aproximadamente 250 kg de terra arenosa, mesmo quando considerada a aplicação máxima de  $90 \text{ kg ha}^{-1}$  de N. Valor ainda mais baixo foi observado por Padovesse (1988), para o nível de adubação de  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  de N em cana-de-açúcar, sendo a perda de apenas  $0,5 \text{ kg ha}^{-1}$  de N.

Fenilli (2006) trabalhando com balanço de  $^{15}\text{N}$  na cultura do café observou perda de aproximadamente  $6,5 \text{ kg ha}^{-1}$  a 1 metro de profundidade, representando 2,3 % de recuperação do fertilizante, quando da aplicação de  $280 \text{ kg ha}^{-1}$  de N na forma de sulfato de amônio. Os motivos apresentados para a baixa ocorrência de lixiviação foram os parcelamentos nas aplicações do fertilizante e a característica do solo argiloso em apresentar maior retenção de água e, conseqüentemente, menor condutividade hidráulica e drenagem.

### **2.1.6 A cana-de-açúcar e a necessidade de enxofre**

O enxofre nas plantas encontra-se, em sua maior parte, nos aminoácidos essenciais cisteína e metionina e sua deficiência pode interferir na síntese de proteínas reguladoras, essenciais para a manutenção da atividade celular. O elemento apresenta, ainda, outras funções nos vegetais: como sulfato é ativador enzimático; como  $\text{SH}^-$  é grupo ativo de enzimas e coenzimas (ácido lipóico, tiamina e biotina); na fotossíntese participa da constituição de clorofila, da absorção do  $\text{CO}_2$ , na atividade da RuBisCo e da reação de fosforilação; é essencial na fixação do  $\text{N}_2$  atmosférico em leguminosas noduladas (KROUSE; MAYER; SCHOENAU, 1996; MALAVOLTA, 1979). Na forma de glutatona, composto precursor de fitoquelatinas, tem ação

antioxidante e desintoxicante, agindo como quelado e indisponibilizando alguns metais pesados em plantas superiores (MARSCHNER, 1995).

Os sintomas de deficiência de enxofre assemelham-se ao de nitrogênio, no entanto, como o S é muito pouco móvel no floema, os sintomas aparecem nas folhas mais novas. Os teores totais variam na faixa de 0,1 a 0,5% da matéria seca e a necessidade da maioria das culturas está entre 10 a 70 kg ha<sup>-1</sup> de S, sendo mais elevadas em culturas como a alfafa (*Mendicago sativa* L.) e soja (*Glicyne Max* L. Merril) (TABATABAI, 1986).

A exigência da cana-de-açúcar em S é menor do que a observada para o N. Segundo Malavolta (1994) para a produção de 100 toneladas de colmos por hectare são necessários uma quantidade acumulada de 40 a 50 kg de S. Uma amplitude maior de extração foi observada por Silva e Casagrande (1983) que apontaram para a mesma produção, extração de 16 a 50 kg de S.

No solo, os compostos de enxofre têm origem natural e antrópica, existindo quatro formas principais de entrada de S no solo, segundo Krouse, Mayer e Schoenau (1996): o S chega ao solo por deposição seca, como SO<sub>2</sub>, enxofre elementar (S<sup>0</sup>) e sulfato mineral, aerossóis de sulfato, e por deposição pela chuva (úmida) de sulfato (SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>). A origem de ambas as deposições pode ser vulcânica, do "spray" marinho, biológica e antrópica (combustões de biomassas e de combustíveis fósseis, processamento do gesso e de fundições). Essas deposições podem ser elevadas em locais próximos a áreas industriais (> 80 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de S) e em zonas remotas estimam-se valores de 2-15 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de S, quantidade essa que representa menos que 10% do S contido na vegetação e nas camadas superficiais no solo. A intemperização da rocha de origem tem importância como fonte de S em solos jovens e naqueles localizados em áreas remotas e distantes de fontes industriais e antrópica, sendo principais fontes de S na rocha mãe os minerais contendo pirita (sulfeto de ferro). Nos solos aerados ocorrem minerais contendo sulfato (oxidado) enquanto nos anóxicos predomina a forma de sulfeto (reduzido). As aplicações de fertilizantes e corretivos ao solo, tais como sulfato de amônio (24,2% de S), superfosfato simples (11-12% de S), salitre do Chile (21% de S) e gesso agrícola (13% de S) adicionam a maior parte do enxofre prontamente disponível às plantas. Os resíduos orgânicos em geral também contêm S, tais como resíduos vegetais (como exemplo, torta de filtro e vinhaça), esterco animais e camas de estábulos.

O enxofre total no solo encontra-se 90% na fração orgânica, o qual se torna disponível para absorção pelas plantas como S mineral ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) após mineralização, principalmente por bactérias do grupo *Thiobacillus* ssp (TABATABAI; BREMNER, 1972).

No solo o S orgânico pode ser fracionado e dividido em duas formas principais: (a) compostos não ligados a carbono, encontrado nos resíduos vegetais, abrangendo principalmente os compostos com ligação C-O-S (ésteres de sulfato) e C-N-S (ácido sulflâmico), onde os átomos de S e C são separados por O e N; (b) compostos ligados a carbono (C-S), tais como os aminoácidos metionina e cisteína, entre outros (TZI-TZIBOY, 1998).

A absorção do S pelos vegetais ocorre na forma de  $\text{SO}_4^{2-}$  por meio do sistema radicular, entretanto, o elemento pode ser absorvido, em pequenas quantidades, pelas folhas na forma de  $\text{SO}_2$  e aminoácidos (SANTOS et al., 1981).

### **2.1.7 Panorama atual da fertilização com enxofre na cana-de-açúcar**

A importância do enxofre para a cana-de-açúcar tem sido abordada há algum tempo. Armbruster (1986) já alertava para a possibilidade de ocorrência da deficiência de S nos canaviais brasileiros, principalmente naqueles cultivados sobre solo arenoso de baixo teor de matéria orgânica, devido à substituição cada vez maior de fontes que contêm S, pelas chamadas impropriamente de “concentradas”, sem S na sua formulação, caso da uréia e do superfosfato simples. Malavolta (1996) cita ainda outros fatores para o S ser um nutriente cada vez mais limitante da alta produtividade, tais como: redução da deposição de S atmosférico provinda das chuvas, redução das reservas de S do solo em consequência das perdas de matéria orgânica devido à mineralização e à erosão, plantio em solos arenosos com baixos teores de S e em regiões de elevada pluviosidade.

De modo geral, o S tem sido negligenciado em estudos que envolvem a adubação e nutrição da cana-de-açúcar. Um dos motivos que contribuem para a ausência de pesquisa envolvendo o nutriente refere-se, provavelmente, ao fato que as necessidades de S da cultura estão sendo supridas indiretamente por meio de outras vias que não a da adubação, visando o fornecimento de S, tais como gessagem e uso de resíduos orgânicos (vinhaça e torta de filtro), que contêm o nutriente. Entretanto, em áreas com ausência do emprego da gessagem e dos resíduos orgânicos como fonte de nutrientes, bem como àquelas com queima anterior a colheita, a

deficiência de S pode acentuar-se, chegando a limitar a produtividade da cultura, ou até mesmo restringir a resposta à adubação com N.

O trabalho que melhor caracteriza o efeito do S na produtividade da cana-de-açúcar foi realizado por Vitti et al. (1992), em que foram observados aumentos de produção de açúcar de até 27% em 19 colheitas da cultura, concluindo que a aplicação de 30 e 15 kg ha<sup>-1</sup> de S são suficientes para alcançar a máxima produção de colmos para o ciclo da cana-planta e soca, respectivamente. Mais recentemente, Demattê (2005) recomenda que a aplicação de 60 kg ha<sup>-1</sup> de S é suficiente para fornecer o elemento durante todo o ciclo da cultura.

Na Índia, os estudos de resposta à adubação sulfatada em cana-de-açúcar são mais comuns. Shukla e Menhi (2002) estudando o efeito de doses de N (150, 225 e 300 kg ha<sup>-1</sup>) e S (0, 30 e 60 kg ha<sup>-1</sup>) nos índices de qualidade tecnológica da cana-de-açúcar não observaram efeito desses fatores nos parâmetros analisados. Shinde (2005) avaliou a resposta da cultura a níveis de 0, 20, 40, 60 e 80 kg ha<sup>-1</sup> de S com as fontes de enxofre S elementar e gesso, observando influência positiva de doses de S no aumento de produtividade, sem afetar a qualidade tecnológica, com ausência de influência das fontes nos parâmetros avaliados. Nesse trabalho o autor recomendou a fertilização com 60 kg ha<sup>-1</sup> de S como sendo a preferencial, usando para isso cálculos de retorno de investimento. Tiwari (2006) avaliando a resposta da cana-de-açúcar à adubação com S, nos níveis de 0, 20, 40, 60 e 80 kg ha<sup>-1</sup>, observaram aumentos de produtividade e rendimento de açúcar nas doses acima de 40 kg ha<sup>-1</sup> e melhoria na qualidade tecnológica e maiores absorções de N e K pela planta na dose de 60 kg ha<sup>-1</sup>.

### **2.1.8 Mineralização do enxofre dos resíduos da cultura**

A mineralização do enxofre dos resíduos de colheita da cana-de-açúcar, igualmente para o nitrogênio, é dependente de vários fatores, dentre eles a relação C:S do resíduo e dos fatores que afetam a atividade microbiana, tais como pH, temperatura e oxigênio. Segundo Barrow (1960) resíduos que apresentam relação C:S menor que 200 haverá predominância do processo de mineralização, para C:S por volta de 400 predominará a imobilização e C:S entre 200 e 400 ocorrerá ambos os processos.



Considerando-se a decomposição de resíduos da cultura da cana-de-açúcar que apresenta média de relações C:S maiores que 400 (OLIVEIRA et al. 1999a; 1999c), espera-se que o processo de predominância durante as reações de mineralização seja a imobilização.

Devido à similaridade entre os processos de mineralização do N e S, admitia-se que suas taxas de conversão de N/S orgânico a N/S mineral eram parecidas e estavam relacionadas diretamente às quantidades encontradas dos nutrientes na matéria orgânica do solo (WHITE, 1959). Entretanto, observações que a intensidade de mineralização do S nem sempre acompanhava a intensidade de mineralização do N, podendo ser ora maior ora menor, levou a explicação de que as quantidades de N e S mineralizadas não estão associadas diretamente aos teores desses elementos no solo, e que maiores teores de N mineralizado não implicam necessariamente na mesma ocorrência para o S, pois ambos os processos de mineralização são distintos e possuem taxas diferenciadas (TABATABAI; AL-KHAFAJI, 1980).

Uma das principais diferenças entre a mineralização do N e a do S, quer seja do nativo do solo ou do incorporado com adição de resíduos culturais, consiste no fato que frações de S orgânico são passíveis de mineralização sem o intermédio da biomassa microbiana, ou seja, por meio de processos bioquímicos, via hidrólise enzimática de frações sulfuradas do tipo éster (SAKADEVAN; HEDLEY; MACKAY, 1993). Segundo Silva et al. (1999) a menor dependência da biomassa microbiana para a mineralização do enxofre orgânico sugere que a intensidade de mineralização do S é menos dependente do que o N, da disponibilidade de carbono do solo, sugerindo ser a relação C:N mais importante para a mineralização do N do que a C:S para a mineralização do S.

Esse mecanismo é mais bem explicado por McGill e Cole (1981), em que os autores citam que a mineralização do S ocorre por duas vias: a biológica e a bioquímica. A mineralização biológica é mediada por microrganismos que degradam compostos de S ligados a C, o que resulta em fontes de C e  $\text{SO}_4^{2-}$ ; a mineralização bioquímica ocorre quando o nível de  $\text{SO}_4^{2-}$  inorgânico no solo está muito baixo a ponto de não sustentar o requerimento por S pelos microrganismos mineralizadores. Nesse estudo o S- $\text{SO}_4^{2-}$  resultante da mineralização biológica inibiu a mineralização bioquímica, o que explica a maior importância dos processos bioquímicos em solos deficientes em S. A mineralização bioquímica dos compostos de ésteres de carbono (C-O-S) ganha importância uma vez que no solo são encontrados grande número de compostos de S com esse tipo de ligação. As enzimas que hidrolisam esses compostos estão presentes

naturalmente nos solos e suas maiores fontes são as bactérias e os fungos, havendo, inclusive, a liberação pelo sistema radicular das plantas (FITZGERALD, 1976).

Zhou et al. (1999) incubando vários solos em sistema aberto a 30°C por 28 semanas verificaram que os compostos de S ligado a carbono representavam a maior fonte de S orgânico mineralizado, o que indica que o uso da variável S ligado a C talvez seja a mais adequada para estimar o grau de mineralização de S nos solos. Nesse experimento o grau de correlação observado entre S mineralizado e S ligado a C foi de 0,892 ( $p < 0,01$ ) e de 0,808 ( $p < 0,01$ ) para a variável S orgânico total no solo.

Tratando-se da degradação dos resíduos culturais da cana-de-açúcar em condições de campo na região de Ribeirão Preto/SP, Oliveira et al. (1999a) observaram que os resíduos que permaneceram sobre o solo por um ano agrícola tiveram redução da massa de material seco de aproximadamente 22%, originária principalmente da degradação nas quantidades de hemicelulose e conteúdo celular. O enxofre e o nitrogênio tiveram pouca liberação da palhada em um ano agrícola, 11 e 1 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, correspondente a degradações de 11 e 17%. O nutriente liberado em maior quantidade da biomassa foi o K (56 kg ha<sup>-1</sup>), e correspondente a 85% do existente no início. A explicação para a grande liberação de K deve-se ao fato de esse elemento não fazer parte de compostos da planta, sendo de fácil liberação da célula por estar presente na forma iônica. Esses resultados apontam para a grande conservação do S nos restos culturais e, conseqüentes, baixas taxas de mineralização e fornecimento de S para o sistema solo-planta, após 12 meses de avaliação. Em outro experimento, Oliveira et al. (1999b) também trabalhando com degradação de resíduo cultural de cana-de-açúcar, em sistema de lisímetros na região de Piracicaba/SP, por um período de 12 meses, observaram valores maiores de degradação da palhada, cerca de 70% de redução de massa de material seco, com liberação superior a 65% do S contido inicialmente no resíduo. A maior liberação do S dos resíduos no sistema de lisímetros é explicada pelos autores como decorrência da grande influência da irrigação para o aumento da lixiviação do nutriente na palhada de cana.

As baixas taxas de mineralização do enxofre e nitrogênio encontradas nos resíduos culturais da cana-de-açúcar (palhada) no período de um ano agrícola (12 meses) são especialmente importantes na manutenção desses elementos no solo. Outro fator a ser considerado é que a existência de competição entre os microrganismos degradadores e a absorção

radicular pelas plantas pelo N e S mineral serve como explicação para a importância da adubação com N e S no sistema de colheita de cana-de-açúcar sem queima prévia a colheita.

### **2.1.9 Perdas de enxofre do sistema solo-cana-de-açúcar**

As maiores perdas de enxofre do sistema solo-cana-de-açúcar são decorrentes da queima dos resíduos culturais e da lixiviação do nutriente do ambiente de exploração radicular. A prática de se queimar a cana-de-açúcar previamente à colheita causa perdas de mais de 95%, na forma de dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>). Considerando que somente uma pequena parte poderá retornar ao canavial por meio da deposição seca e úmida, admite-se que a cultura da cana-de-açúcar, no manejo com queima, contribui para o esgotamento da reserva de S dos solos (VITTI et al., 1989).

O enxofre é considerado um elemento com alto potencial de lixiviação devido sua baixa capacidade de retenção no solo, sendo que a maior parte do SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> retido pelo solo é passível de remoção por meio de sucessivas extrações com água (CURTIN; SYERS, 1990). O potencial de lixiviação do sulfato é altamente influenciado pela textura do solo e volume de água drenado pelo mesmo. Estimativas de perda do elemento por lixiviação já eram realizadas em meados dos anos 60, e um dos trabalhos pioneiros de lixiviação de S foi realizado por Jones; Martin e Willians (1968) em que 80% do S aplicado no solo, na forma de gesso, foi perdido durante um ano de cultivo em solos com baixa capacidade de adsorção.

O alto potencial de lixiviação de enxofre foi constatado por Riley; Zhao e MacGrath (2002) estudando a lixiviação do elemento, durante 3 anos consecutivos, em sistema de lisímetros formados por monólitos de solo não desestruturado e cultivado com gramíneas. Foram observadas perdas acumuladas de enxofre de 35 kg ha<sup>-1</sup> no tratamento sem aplicação de S e 83 kg ha<sup>-1</sup> no tratamento com aplicação de 50 kg ha<sup>-1</sup> na forma de sulfato de amônio, sendo que mais 90% do total lixiviado nesse tratamento ocorreram nos primeiros 200 mm de drenagem. A alta quantidade de S lixiviado evidencia perdas do elemento além daquelas adicionadas por meio do fertilizante, incluindo perdas do S orgânico mineralizado no solo e o depositado pelas chuvas durante o período experimental (22 kg ha<sup>-1</sup>).

O elevado grau de lixiviação do enxofre, além de provocar perdas do elemento no sistema solo-planta, ocasionará diminuição na eficiência do uso do nutriente aplicado via fertilização, e ainda, conforme citado por Slide, Roose e Shanklin (2000), ocorrência de elevadas concentrações

de  $\text{SO}_4^{2-}$  em aquíferos subterrâneos (de 400 a 900  $\text{mg L}^{-1}$ ), o que resultará em uma possível contaminação da água, ou seja, presença de teores de  $\text{SO}_4^{2-}$  acima dos padrões de potabilidade, que segundo a Agência de Proteção do Meio Ambiente dos Estados Unidos (EPA) situa-se em torno de 250  $\text{mg L}^{-1}$ .

### 2.1.10 Sinergia de absorção entre N e S

Uma das melhores definições das relações existentes entre os elementos da nutrição mineral das plantas, incluindo o N e o S, é citada por Prasard e Power (1997), com a definição que os nutrientes se relacionam de maneira interativa, sendo a interação existente entre dois elementos positiva (sinérgica) ou negativa (antagônica), o que depende da expressão do efeito combinado dos fatores serem maiores ou menores que a soma de seus efeitos isolados.

Relacionando o nitrogênio e o enxofre tem-se uma interação sinérgica, a qual foi comprovada por Dubey e Khan (1993)<sup>1</sup> citado por Prasard e Power (1997) usando-se a resposta de produção em grãos de mostarda a fertilização com N e S. Nesse experimento a soma da produção de grãos quando submetida aos efeitos isolados dos nutrientes (0,99  $\text{t ha}^{-1}$ ) foi menor quando comparada à adição conjunta dos nutrientes (1,2  $\text{t ha}^{-1}$ ).

A sinergia de absorção entre N e S também foi observada por Fageria e Singh (1982) em plantas de trigo. Nesse estudo os autores constataram que a aplicação de S proporcionou aumento na absorção de N pela planta, sendo o contrário também observado (adição de N e aumento na absorção de S). A sinergia recíproca observada entre esses elementos é explicada pelos autores como resultado da estimulação da absorção aniônica ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) em resposta ao incremento na absorção catiônica ( $\text{NH}_4^+$ ).

---

<sup>1</sup>DUBEY, O.P.; KHAN, R.A. Effect of nitrogen and sulfur on dry matter, grain yield and nutrient content at different growth stages of mustard (*Brassica juncea* L.) under irrigate vertisol. **Indian Journal of Agronomy**, Delhi, n.38, p.270-276, 1993.

Vale et al. (1993) observaram maior eficiência de utilização do nitrogênio com o aumento nas doses de S aplicada em plantas de milho, com ocorrência de correlação significativa ( $R^2=0,98$ ,  $p<0,001$ ) entre o teor de  $S-SO_4^{2-}$  no solo e a eficiência de utilização do N. Segundo Stewart e Porter (1969) a adição de N em condições de deficiência de S pode resultar no acúmulo de formas não protéicas de N, implicando em ausência de respostas sobre a produção de matéria-seca e acúmulo de N protéico. Armbruster (1986) cita que o S, juntamente com o N, P e K, é um dos elementos mais importantes para a obtenção de altos níveis de produtividade, sendo que sua exigência está intimamente relacionada com as quantidades de N aplicada, o que para a cana-de-açúcar torna-se ainda mais importante devido à alta exigência em N.

A intrínseca relação entre o N e S diz respeito ao fato que a relação N:S ideal nos tecidos vegetais é de 12-15:1, ou seja, para a obtenção da máxima produção de matéria seca e proteínas é exigido 1 parte de S para 12 a 15 partes de N.

Para a cultura da cana-de-açúcar, estudos de Franco et al. (2005) revelaram efeito direto de doses de N no acúmulo de enxofre pela cana-de-açúcar, principalmente no sistema radicular, sendo observada relação N:S próxima a 2, independentemente da parte da planta avaliada. Esses resultados sugerem a ocorrência de efeito sinérgico da adubação nitrogenada na nutrição em enxofre pela cana-de-açúcar.

A ocorrência de acúmulo de S, entre outros nutrientes, no sistema radicular (rizomas e raízes) observada por Franco et al. (2005) sugere ser esse um mecanismo de translocação de nutrientes como garantia de melhor vigor do sistema radicular para a rebrota do próximo ciclo, motivo pelo qual a cana-de-açúcar deva ser considerada cultura perene e a denominação de semi-perene seja usada apenas para designar a renovação periódica dos canaviais. Resultados de acúmulo de nutrientes nas raízes e rizomas como constituição de reserva orgânica e nutricional da planta, a fim de sustentar a rebrota do ciclo subsequente foram citadas anteriormente por Camargo (1989), Malavolta (1994) e Trivelin et al. (1988).

Nacionalmente são raros os trabalhos que abordam a nutrição por N e S em cana-de-açúcar e seus efeitos na produção e qualidade tecnológica e menor, ainda, são aqueles que tratam da interação desses fatores. Em estudos realizados na Índia, com N e S em cana-de-açúcar, foi possível observar a sinergia entre esses dois elementos. Choudhary e Sinha (2001) avaliando a aplicação de matéria-orgânica (0, 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>), nitrogênio (50, 100, 150 e 200 kg ha<sup>-1</sup>) e enxofre (0 e 25 kg ha<sup>-1</sup>), observaram efeito da matéria-orgânica e do N no aumento de produção

de matéria-seca e açúcar, sendo que o S não afetou a produção de açúcar, entretanto aumentou a disponibilidade de S no solo e a absorção de N e S pelas plantas.

Devido à relevância da abordagem da nutrição com S na cultura, o uso da técnica isotópica com o uso do isótopo  $^{34}\text{S}$  é de grande valia para o estudo da interação entre N e S e, principalmente, na realização do balanço do elemento no sistema solo-cana-de-açúcar.

### **2.1.11 Uso do isótopo $^{34}\text{S}$ em estudos de balanço do nutriente**

Devido às diversas fontes que podem fornecer enxofre ao sistema solo-planta é necessário à utilização de técnicas analíticas que permitam avaliar a contribuição do S proveniente do fertilizante. O uso da técnica isotópica tem sido de grande valia na elucidação de aspectos relacionados ao metabolismo do enxofre em plantas, ou mesmo, em avaliações da utilização deste nutriente por culturas. Nesse sentido, o radioisótopo  $^{35}\text{S}$  foi de grande utilidade em pesquisas envolvendo o nutriente (ARORA; HUNDAL; SEKHON, 1990; LAL; DRAVID, 1990; SHARMA; KAMATH, 1991). Entretanto, existe uma tendência mundial de utilizar, quando possível, técnicas não radioativas em pesquisas com traçador isotópico, especialmente em condições de campo.

O enxofre apresenta quatro isótopos estáveis:  $^{32}\text{S}$ ,  $^{33}\text{S}$ ,  $^{34}\text{S}$  e  $^{36}\text{S}$ , com abundância natural de 95,00; 0,76; 4,22 e 0,014 átomos % respectivamente (WEAST, 1969). Os primeiros estudos com o uso do traçador isotópico  $^{34}\text{S}$  na avaliação de eficiência de utilização de fertilizantes (EUF) foram desenvolvidos por Hamilton et al. (1991) e Awonaike, Danso e Zapata (1993).

No Brasil, desde o início dos anos 90, estão sendo realizados pela equipe do Laboratório de Isótopos Estáveis do CENA/USP, trabalhos inéditos com o isótopo estável de enxofre:  $^{34}\text{S}$  (BENDASSOLLI; TRIVELIN; CARNEIRO JÚNIOR, 1997; CARNEIRO JÚNIOR, 1998; TRIVELIN et al., 2002c). Teixeira et al. (2002) compararam os isótopos de enxofre:  $^{34}\text{S}$  (estável) e  $^{35}\text{S}$  (radioativo) na avaliação da utilização pela planta do enxofre aplicado ao solo obtiveram resultados confiáveis com  $^{34}\text{S}$ . Em 2004 foi também concluído um trabalho com a utilização do isótopo  $^{34}\text{S}$  para estudo de balanço de enxofre nas culturas de milho, soja e alfafa (TEIXEIRA, 2004).

Em continuidade a esses trabalhos estão sendo desenvolvidos no CENA/USP projetos financiados pela FAPESP que exploram a mesma temática, sendo eles: “Determinação de  $^{34}\text{S}$  em

amostras de solos por espectrometria de massas” (Projeto de doutorado, processo FAPESP 03/03241-7); “Metodologia para análise isotópica de  $^{34}\text{S}$  (% em átomos de  $^{34}\text{S}$ ) em amostras de solos, a partir de S-total e S- $\text{SO}_4^{-2}$  disponível, por espectrometria de massas” (Auxílio à pesquisa FAPESP, processo 00/0088-0). A definição dos procedimentos analíticos por esses projetos, permitirá, em futuros estudos, a avaliação do enxofre ( $^{34}\text{S}$ ) nos diversos compartimentos do sistema solo-planta.

## **2.2 Material e métodos**

A pesquisa foi desenvolvida na Estação Experimental do Pólo Regional Centro-Sul (APTA 15), em Piracicaba/SP, com as seguintes coordenadas geográficas: latitude de 22° 42'30'' sul, longitude de 47° 38'00'' leste e 546 metros de altitude.

### **2.2.1 Caracterização química e física do solo**

Utilizou-se de vasos plásticos de 220 litros, com diâmetros de 0,40 e 0,60 m na parte superior e inferior, respectivamente, e 0,90 m de altura, preenchidos com aproximadamente 250 kg de terra de um Neossolo Quartzarênico coletado em área da Rodovia Samuel de Castro Neves (SP-147), km 179-180, em Piracicaba/SP, o qual possuía cana-de-açúcar como cultura de implantação. As características químicas e físicas do solo constam das Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Características químicas da terra de preenchimento dos vasos

pH (CaCl <sub>2</sub> )	4,1	CTC (mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	32,3
M.O (g dm <sup>-3</sup> )	4	V (%)	22,6
P resina (mg dm <sup>-3</sup> )	5	S-SO <sub>4</sub> (mg dm <sup>-3</sup> )	5
K (mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,3	S-total (mg dm <sup>-3</sup> )	31
Ca (mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	5	Cu (mg dm <sup>-3</sup> )	0,2
Mg (mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	2	Fe (mg dm <sup>-3</sup> )	17
H+Al (mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	25	Zn (mg dm <sup>-3</sup> )	0,9
Al (mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	7	Mn (mg dm <sup>-3</sup> )	2,2
SB (mmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	7,3	B (mg dm <sup>-3</sup> )	0,15

pH - CaCl<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup> (RAIJ et al., 2001)

M.O. – Matéria orgânica, método colorimétrico (RAIJ et al., 2001)

P - Extração por resina trocadora de íons e determinação por colorimetria (RAIJ et al., 2001)

S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> - Ca(H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub> 0,01 mol L<sup>-1</sup> (RAIJ et al., 2001)

S-total – oxidação alcalina com NaHCO<sub>3</sub> e Ag<sub>2</sub>O (ROSSETE et al., 2004)

K – Extração por resina trocadora de íons e determinação por fotometria de chama (RAIJ et al., 2001)

Ca e Mg – Extração por resina trocadora de íons e determinação por espectrometria de absorção atômica (RAIJ et al., 2001)

H+Al – Determinação por potenciometria em solução tampão SMP (RAIJ et al., 2001)

Al – KCl 1mol L<sup>-1</sup>

B – BaCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O 0,005 mol L<sup>-1</sup> em microondas (RAIJ et al., 2001)

Cu, Fe, Mn, Zn – DTPA-TEA pH 7,3 (RAIJ et al., 2001)

Tabela 2 – Caracterização física da terra de preenchimento dos vasos

Argila	Silte	Areia total	Areia grossa	Areia fina
<0,02mm	0,053-0,002mm		2,00-0,210mm	0,210-0,053mm
-----g kg <sup>-1</sup> -----				
122	8	870	630	240



### 2.2.2 Delineamento experimental e tratamentos

Foram realizados, concomitantemente, dois experimentos em delineamento experimental de blocos casualizados com quatro repetições. Os fatores de estudo do primeiro experimento constituíram-se de um fatorial completo 4 X 2, sendo: quatro níveis de N (0, 1,2, 2,4 e 3,6 g N vaso<sup>-1</sup>, equivalendo a 0, 40, 80 e 120 kg de N ha<sup>-1</sup> respectivamente) e dois níveis de S (0 e 2,1 g S vaso<sup>-1</sup>, equivalendo a 0 e 70 kg de S ha<sup>-1</sup>). Os tratamentos que compõem o fatorial completo foram constituídos pela aplicação de fertilizantes marcados isotopicamente (<sup>15</sup>N e <sup>34</sup>S) e de resíduos culturais (folhas secas, ponteiros e raízes + rizomas), sem marcação isotópica, simulando reforma de canavial sem despalha a fogo (Tabela 3).

Tabela 3 - Tratamentos do primeiro experimento de fatorial completo (4 X 2), com fertilizantes marcados com <sup>15</sup>N e <sup>34</sup>S e resíduo cultural sem marcação isotópica

Tratamento	Dose de N <sup>1</sup>	Dose de S <sup>1</sup>	Fonte de N	Fonte de S
-----g vaso <sup>-1</sup> -----				
1	0	2,1	-	2,1 g de S-K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
2	1,2	2,1	1,2 g de N-( <sup>15</sup> NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> <sup>34</sup> SO <sub>4</sub>	1,26 g de S-( <sup>15</sup> NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> <sup>34</sup> SO <sub>4</sub> e 0,84 g de S-K <sub>2</sub> <sup>34</sup> SO <sub>4</sub>
3	2,4	2,1	1,83 g de N-( <sup>15</sup> NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> <sup>34</sup> SO <sub>4</sub> e 0,57 g de N-CO( <sup>15</sup> NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	2,1 g de S-( <sup>15</sup> NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> <sup>34</sup> SO <sub>4</sub>
4	3,6	2,1	1,83 g de N-( <sup>15</sup> NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> <sup>34</sup> SO <sub>4</sub> e 1,77 g de N-CO( <sup>15</sup> NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	2,1 g de S-( <sup>15</sup> NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> <sup>34</sup> SO <sub>4</sub>
5	0	0	-	-
6	1,2	0	1,2 g de N-CO( <sup>15</sup> NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	-
7	2,4	0	2,4 g de N-CO( <sup>15</sup> NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	-
8	3,6	0	3,6 g de N-CO( <sup>15</sup> NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub>	-

<sup>(1)</sup> Para cálculo das doses dos fertilizantes com N e S em g vaso<sup>-1</sup> levou-se em consideração a dose desejada em kg ha<sup>-1</sup> e calculou-se sua equivalência em g vaso<sup>-1</sup>, tendo como base a área superficial do vaso, ou seja, 0,283 m<sup>2</sup>.

O segundo experimento foi desenvolvido conjuntamente ao primeiro e constitui-se de cinco tratamentos com a combinação dos níveis de N e S, com a diferença de terem recebido resíduo cultural com marcação isotópica ( $^{15}\text{N}$ ), a fim de avaliar a contribuição desse material na nutrição mineral da cana-planta. Nas Tabelas 3 e 4 estão detalhados os tratamentos, com o uso das fontes: uréia ( $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ ), sulfato de amônio ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ) e sulfato de potássio ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ).

Nos tratamentos com fertilizante marcado em  $^{15}\text{N}$  e  $^{34}\text{S}$ , as fontes sulfato de amônio e/ou uréia tiveram marcações aproximadas de 10% em átomos de  $^{15}\text{N}$  e 9,5% em átomos de  $^{34}\text{S}$  para o sulfato de potássio e/ou sulfato de amônio. Os fertilizantes marcados em  $^{15}\text{N}$  e  $^{34}\text{S}$  foram produzidos no Laboratório de Isótopos Estáveis, CENA/USP, Piracicaba/SP.

Tabela 4 – Tratamentos do segundo experimento, com combinação das doses de N e S, resíduo cultural marcado em  $^{15}\text{N}$  e fertilizantes sem marcação isotópica

Tratamento	Dose de N <sup>1</sup>	Dose de S <sup>1</sup>	Fonte de N	Fonte de S
-----g vaso <sup>-1</sup> -----				
1	0	0	-	-
2	0	2,1	-	2,1 g de $\text{K}_2\text{SO}_4$
3	1,2	2,1	1,2 g de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	1,26 g de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ e 0,84 g de $\text{K}_2\text{SO}_4$
4	2,4	2,1	1,83 g de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ e 0,57 g de $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	2,1 g de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$
5	3,6	2,1	1,83 g de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ e 1,77 g de $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$	2,1 g de $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$

<sup>(1)</sup> Para cálculo das doses dos fertilizantes com N e S em g vaso<sup>-1</sup> levou-se em consideração a dose desejada em kg ha<sup>-1</sup> e calculou-se sua equivalência em g vaso<sup>-1</sup>, tendo como base a área superficial do vaso, ou seja, 0,283 m<sup>2</sup>.

Para simulação de reforma de canavial com colheita sem despalha a fogo, todos os vasos receberam quantidade de 600 g de matéria seca (MS) por vaso de resíduo cultural, nas seguintes proporções: 84 g vaso<sup>-1</sup> de ponteiros, 258 g vaso<sup>-1</sup> de rizomas + raízes e 258 g vaso<sup>-1</sup> de folhas secas. Estes valores foram tomados por base às produções médias de resíduos culturais obtidas por Abramo Filho et al. (1993), Camargo (1989), Trivelin; Victoria e Rodrigues (1995) e Vitti (2003), as quais correspondem à quantidade equivalente a 25 t ha<sup>-1</sup>, nas seguintes proporções médias: 5 t ha<sup>-1</sup> de ponteiros, 10 t ha<sup>-1</sup> de rizomas + raízes e 10 t ha<sup>-1</sup> de folhas secas, sendo considerado para o cálculo da aplicação dos resíduos vegetais a área do vaso, ou seja, 0,283 m<sup>2</sup>.

As características químicas dos resíduos culturais sem e com marcação isotópica e incorporados à terra dos vasos constam na Tabela 5.

Tabela 5 – Característica química dos resíduos culturais sem e com marcação em <sup>15</sup>N e incorporados à terra dos vasos para simulação de reforma de canavial sem queima

Parte da cana-de-açúcar	N	S	C	N:S	C:N	C:S
-----g kg <sup>-1</sup> -----						
<i>Resíduo cultural sem marcação isotópica em <sup>15</sup>N</i>						
Folha seca	4,2	0,8	364,7	5:1	87:1	456:1
Ponteiro	10,1	1,6	356,7	35:1	35:1	223:1
Rizoma + raiz	7,6	1,0	338,3	45:1	45:1	338:1
<i>Resíduo cultural com marcação isotópica em <sup>15</sup>N</i>						
Folha seca	4,1	1,0	364,8	4:1	89:1	365:1
Ponteiro	7,2	2,0	360,5	4:1	50:1	180:1
Rizoma + raiz	6,3	1,1	357,1	6:1	57:1	357:1

A quantidade total de nitrogênio adicionado ao sistema por meio da incorporação dos resíduos culturais correspondeu a  $4,0 \text{ g vaso}^{-1}$  de N, tanto para os resíduos sem marcação isotópica quanto para os com marcação em  $^{15}\text{N}$ , sendo que a abundância isotópica média dos resíduos marcados e incorporados foi de 0,827 % em átomos de  $^{15}\text{N}$ .

Os resíduos culturais foram grosseiramente triturados e misturados ao solo dos vasos a uma profundidade de 0-0,25 m, juntamente com o calcário. A variedade de cana-de-açúcar utilizada para geração dos resíduos foi a SP 81-3250, sendo o material marcado obtido de experimento prévio no ano de 1998 e o não marcado colhido em campo no ano de instalação do experimento (2004).

### **2.2.3 Montagem dos vasos**

Os vasos foram instalados em local sem cobertura, a semelhança do realizado e descrito por Trivelin et al. (2002a, 2002b). Foi instalado em cada vaso, na sua parte inferior, um sistema de drenagem constituído por uma camada de 0,10 m de brita zero previamente lavada, coberta por manta de drenagem tipo Bidim, que permitiu o recolhimento da solução percolada no solo por meio de uma saída lateral feita com cano plástico de aproximadamente 5 mm de diâmetro. A terra de preenchimento dos vasos foi previamente peneirada (peneira de malha 2 mm) para remoção de material orgânico (folhas, raízes, etc.) presentes no solo de origem.

Após a instalação do sistema de drenagem foram colocadas duas camadas de terra, a primeira de 0,40 m, composta por duas de 0,20 m de altura, com aproximadamente 92 kg de terra cada uma, devidamente compactada a fim de se obter uma densidade aproximada de  $1,6 \text{ g dm}^{-3}$ . A segunda camada, referente à porção representativa da camada arável do solo, compreendeu uma faixa de 0,25 m de altura, com aproximadamente 70 kg de solo e densidade de  $1,4 \text{ g dm}^{-3}$ , na qual foram adicionados o calcário e os resíduos culturais para simulação de reforma de canavial sem queima.

### 2.2.4 Calagem e incorporação dos resíduos culturais

O cálculo da necessidade de calagem foi realizado por meio da equação recomendada pela Copersucar (PENATTI; FORTI, 1994).

$$NC = [30 - (Ca + Mg) / 10 * PRNT] * 100 \quad (1)$$

onde:

NC = necessidade de calcário ( $t\ ha^{-1}$ );

Ca + Mg = soma de cálcio + magnésio ( $mmol_c\ dm^{-3}$ )

PRNT = poder relativo de neutralização total do calcário

A calagem foi realizada com correção para a quantidade de terra representativa da camada arável, neste caso 70 kg, usando-se o fator de correção (f) de 1,25 para a profundidade de 0,25 m. Foram aplicados, no total, 105 g vaso<sup>-1</sup> de calcário dolomítico, PRNT 91, que foi incorporado à última camada de terra dos vasos (70 kg) juntamente com os resíduos culturais grosseiramente triturados.

### 2.2.5 Adubações e plantio

Aproximadamente 30 dias após a adição do corretivo e dos resíduos culturais ao solo foram implantados os tratamentos e a adubação de plantio (fósforo e potássio). Os adubos de plantio foram colocados no fundo da cova a 0,20 m de profundidade.

O plantio foi realizado na primeira quinzena de maio de 2004, com o transplante de três gemas de cana-de-açúcar por vaso, da cultivar SP 80-3280, obtidas de mini-toletes tratados quimicamente com o fungicida triadimenol ( $0,6\ g\ L^{-1}$ ) e inseticida deltametrina ( $2\ mL\ L^{-1}$ ).

A cultivar escolhida para o plantio (SP 80-3280) apresenta características de boa produtividade, média exigência em fertilidade, bom perfilhamento e alto teor de sacarose, representando cerca de 3% da área plantada com cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, segundo o censo da Copersucar de 2004, e com previsão de expansão de sua utilização devido ao bom desempenho em áreas com colheita mecanizada (NUNES JÚNIOR, 2005).

A característica do sistema de cultivo adotado para a experimentação, ou seja, vasos com aproximadamente 250 kg de terra, tem como particularidade o confinamento e a elevada exploração do volume de terra dos vasos pelas raízes das plantas. Devido a esses fatores optou-se em calcular as quantidades de fósforo e potássio para a adubação de plantio com base na elevação nos níveis dos elementos no solo e na quantidade extraída pela cana-de-açúcar, obtida anteriormente, no mesmo sistema de plantio, segundo Vitti (1998) e Oliveira (1999), a fim de se evitar qualquer limitação nutricional ao desenvolvimento da cultura.

Foram aplicados em cada vaso 5,6 g de fósforo na forma de superfosfato triplo (SPT), em parcela única, e 12 g de potássio, metade da dose como cloreto de potássio (KCl) no plantio e o restante como silicato de potássio em cobertura cinco meses após a primeira aplicação.

#### **2.2.6 Tratos culturais e condução da cultura**

Aos três meses de desenvolvimento da cultura foi realizada fertilização com micronutrientes. Para tanto foram aplicadas as seguintes quantidades na forma de produto comercial quelatizado, a fim de se evitar interações entre os elementos e a matéria-orgânica da camada superficial dos vasos: 130 mg vaso<sup>-1</sup> de B, 126 mg vaso<sup>-1</sup> de Cu, 126 mg vaso<sup>-1</sup> de Fe, 21 mg vaso<sup>-1</sup> de Mo, 208 mg vaso<sup>-1</sup> de Mn e 287 mg vaso<sup>-1</sup> de Zn. A aplicação foi realizada na forma de solução em uma única parcela.

Na fase inicial de desenvolvimento da cultura (cinco meses após o plantio) optou-se por complementar a adição de cálcio e magnésio feita pela calagem por meio da aplicação de sais de cálcio (cloreto de cálcio) e magnésio (cloreto de magnésio). A reaplicação desses elementos foi necessária devido à característica de confinamento das plantas, com menor volume de solo a ser explorado pelas raízes e também a possibilidade de lixiviação dos elementos no sistema, já que os vasos possuíam um sistema de drenagem e coleta da solução percolada no solo para períodos de chuva excedente a capacidade de campo. As aplicações de cálcio e magnésio foram realizadas por meio de soluções e parceladas em três aplicações, totalizando 28 g vaso<sup>-1</sup> de Ca e 9,5 g vaso<sup>-1</sup> de Mg.

Durante o desenvolvimento da cana-de-açúcar, o único tratamento fitossanitário realizado foi a aplicação de formicida (10 meses após o plantio), com o uso do princípio ativo clorpirifós na dose de 10mL por vaso.

Foram retiradas e armazenadas as folhas secas que por ventura poderiam destacar-se da planta com o intuito de não perder este material, o qual foi contabilizado ao final do experimento para balanço de  $^{15}\text{N}$ . Para evitar tombamento das plantas foi realizado o tutoramento das mesmas por meio de amarrão em “varais” confeccionados com arames (Figura 1).



Figura 1 - Vista da área experimental com sistema de amarrão das plantas e uso de tensiômetro

A umidade do solo foi monitorada por tensiômetros instalados na terra dos vasos, a uma profundidade de 0,40 m, em total de quatro por bloco (Figura 1). As irrigações foram realizadas sempre que a tensão estivesse na faixa de 500-600 mmHg, o que representou uma capacidade de água disponível (CAD) de 118-92 mm ou em média 30 L de água. A irrigação foi realizada com a aplicação de uma lâmina de 25 mm, correspondente a 7 L de água por vaso.

A tensão que indicava o momento de irrigação foi calculada por meio da curva de retenção de água do solo de preenchimento dos vasos. As irrigações foram realizadas com o intuito de manter a CAD na faixa de 100-125 mm, o considerado ideal para culturas perenes. A água de irrigação foi constantemente analisada a fim de monitorar suas concentrações de nitrogênio e enxofre, elementos de estudo da pesquisa (Tabela 6).

A pluviosidade e registros de temperaturas máxima e mínima diárias foram obtidos de estação meteorológica da Estação Experimental do Pólo Regional Centro-Sul, localizada a menos de 1 km do local do experimento.

Tabela 6– Determinação de enxofre e nitrogênio na água utilizada para irrigação dos vasos<sup>1</sup>

Data da coleta	S-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> +NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>
	-----mg L <sup>-1</sup> -----		
Junho/2004	< 0,50	< 0,10	2,60
Setembro/2004	< 1,50	< 0,10	1,78
Novembro/2004	< 1,50	< 0,10	1,81
Fevereiro/2005	< 1,00	< 0,10	1,65
Abril/2005	<1,00	< 0,10	1,84

<sup>(1)</sup> Elementos determinados por espectrometria de emissão atômica com plasma induzido (ICP-AES) no Laboratório de Química Analítica (CENA/USP).



### 2.2.7 Coleta da solução percolada no solo

A coleta da solução percolada no solo foi realizada sempre após chuvas que ultrapassassem a capacidade de retenção de água da terra dos vasos e que atingisse o dreno dos vasos (Figura 2).



Figura 2 - Sistema de drenagem e recolhimento da solução percolada na terra dos vasos

A solução percolada das parcelas de cada tratamento foram recolhidas em recipientes de 5 L, contabilizada sua massa por meio de pesagem, homogeneizada e sub-amostrada em frascos de 500 mL, os quais eram enviados ao laboratório de Isótopo Estáveis (CENA/USP) para realização das seguintes determinações nas soluções coletadas: N-total ( $\text{N-NH}_4^+$  e  $\text{N-NO}_2^- + \text{NO}_3^-$ ), pelo método de destilação a vapor (CANTARELLA; TRIVELIN, 2001) e N-total para determinações isotópicas de  $^{15}\text{N}$ , conforme Keeney e Nelson (1982); S- $\text{SO}_4^{2-}$  pelo método da turbidimetria (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997) e S-total para determinações isotópicas de  $^{34}\text{S}$ , conforme Carneiro Júnior (1998).

A quantidade de N-total e S- $\text{SO}_4^{2-}$  percolada no solo durante o período experimental (maio/2004 a setembro/2005) foi calculada multiplicando-se, em cada coleta, a massa da solução percolada pela quantidade dos elementos determinados.

### **2.2.8 Colheita do experimento**

A colheita do experimento foi realizada em setembro de 2005, 16 meses após o plantio. As plantas de cada parcela foram subdivididas nas seguintes partes: folhas secas, colmos, ponteiros (folhas verdes, cartucho e palmito) e parte subterrânea (raízes e rizomas). Para separação da parte subterrânea das plantas, os vasos plásticos foram divididos em duas profundidades, 0-0,40 e 0,40-0,80 m. As raízes e rizomas foram separados da terra dos vasos de forma manual e posteriormente lavadas em água para retirar a terra aderida a massa das raízes e rizomas.

Após a subdivisão, cada parte teve sua massa úmida determinada por pesagem para o cálculo de material úmido (natural) por parcela e produtividade ( $\text{g vaso}^{-1}$ ), no caso dos colmos, sendo a seguir grosseiramente triturado em moenda tipo forrageiras e subamostrada.

As subamostras foram secas a  $65^\circ\text{C}$  em estufa ventilada e após atingirem massa constante foi determinada a umidade. As subamostras foram finamente moídas em moinho tipo Willey, onde obteve-se o material para as determinações de N-total,  $^{15}\text{N}$ , S-total e  $^{34}\text{S}$ .

Nas amostras de colmo triturado em moenda tipo forrageira também foram separadas subamostras para realização da análise tecnológica, no Laboratório de Análise Tecnológica da Estação Experimental do Pólo Regional Centro-Sul (Piracicaba/SP), com caracterização dos seguintes parâmetros: açúcares redutores do caldo extraído (ARCE), concentração de sólidos

solúveis ou Brix refratométrico do caldo extraído (BrixCE), teor de fibra (F), teor de sacarose expresso por Pol do caldo extraído (PolCE) e Pol da cana (PolCana), seguindo metodologia descrita por Sturion e Fernandes (1979).

A terra de preenchimento dos vasos de cada parcela foi amostrada em duas profundidades, 0-0,40 e 0,40-0,80m. Em cada profundidade toda a terra foi homogeneizada e determinada a massa úmida total, sendo posteriormente subamostrada uma quantidade de aproximadamente 1000g, a qual foi utilizada para as determinações de umidade a 105°C e N e S totais e seus respectivos isótopos ( $^{15}\text{N}$  e  $^{34}\text{S}$ ).

No material vegetal e no solo, as determinações de N-total e  $^{15}\text{N}$  foram realizadas em espectrômetro de massas acoplado a analisador automático 20-20 ANCA-SL, da Europa Scientific, Crewe, UK (BARRIE; PROSSER, 1996). O S-total foi realizado usando-se a metodologia descrita por Rossete et al. (2004), com uso de oxidação alcalina e posterior determinação pelo método de turbidimetria (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997). O isótopo de enxofre ( $^{34}\text{S}$ ) foi determinado em espectrômetro de massas ATLAS MAT, modelo CH4, usando o método de preparo de amostras desenvolvido por Carneiro Júnior (1998).

### 2.2.9 Cálculos de balanço isotópico ( $^{15}\text{N}$ e $^{34}\text{S}$ )

A recuperação (RN) do N-fertilizante e N-resíduo cultural, na solução percolada no solo, planta ou solo foi calculada por meio das equações:

$$N_{pf} = [(A - C)/(B - C)] NT \quad (2)$$

$$RN (\%) = (N_{pf}/N_{af}) 100 \quad (3)$$

significando: RN - recuperação percentual do N-fonte (fertilizante ou resíduo cultural) na planta, solo ou na solução do solo;  $N_{pf}$  - N na planta, solo ou na solução do solo proveniente da fonte (fertilizante ou resíduo cultural); A - abundância de N (% de átomos) da planta, solo ou solução do solo; B - abundância de N (% de átomos) da fonte (fertilizante ou resíduo cultural); C - abundância natural de  $^{15}\text{N}$  (0,366% de átomos); NT - conteúdo de N da planta, solo ou solução do solo ( $\text{mg vaso}^{-1}$ );  $N_{af}$  - quantidade (dose) de N-fonte aplicada ( $\text{mg vaso}^{-1}$ ).

A recuperação (RS) do S-fertilizante ( $^{34}\text{S}$ ) na planta, solo ou na solução do solo, foi calculada por meio das equações:

$$\text{Spf} = [(A - C)/(B - C)] \text{ST} \quad (4)$$

$$\text{RS (\%)} = (\text{Spf}/\text{Saf}) 100 \quad (5)$$

significando: RS - recuperação percentual do S- fertilizante na planta, solo ou na solução do solo; Spf - S na planta, solo ou na solução do solo proveniente do fertilizante; A - abundância de  $^{34}\text{S}$  (% de átomos) da planta, solo ou solução do solo; B - abundância de  $^{34}\text{S}$  (% de átomos) do fertilizante; C - abundância natural de  $^{34}\text{S}$  (4,22 % de átomos); ST - conteúdo de S na planta, solo ou solução do solo ( $\text{mg vaso}^{-1}$ ); Saf - quantidade (dose) de S-fertilizante aplicado ( $\text{mg vaso}^{-1}$ ).

#### 2.2.10 Análise dos resultados

Os resultados foram submetidos à análise de variância em delineamento de blocos casualizados, utilizando o teste de F de Fisher e Snedecor, ao nível de 90% de confiança. Posteriormente para as causas de variação significativas, aplicou-se o teste de significância de Tukey ( $p < 0,10$ ) para comparar o efeito do fator adição de enxofre, e a análise de regressão, para verificar o efeito das doses de N e a sinergia na absorção de S. Para as quantidades de água drenada e de nutriente lixiviado foram realizadas correlações.

## 2.3 Resultados e discussão

### 2.3.1 Solução percolada pela terra dos vasos

Entre maio de 2004 a setembro de 2005, a quantidade de água que entrou no sistema totalizou 2071,8 mm, quer seja pela precipitação pluvial ou por irrigações em períodos de ausência de chuva. Nessas condições, os fatores disponibilidade de água e temperatura ambiente não foram limitantes ao desenvolvimento da cana-de-açúcar, sendo a quantidade mensal de água recebida pela cultura e temperatura média mensal, indicadas na Figura 3.

A quantidade média de solução percolada por vaso foi de  $261,6 \pm 4,0$  mm (média geral  $\pm$  desvio padrão da média) (Tabela 7). Descontando-se o valor médio de solução percolada da quantidade total de água adicionada ao sistema, tem-se uma estimativa do valor médio de utilização de água pela cultura, ou seja, a evapotranspiração. Neste experimento observaram-se valores médios de utilização de água de  $1.810,2 \pm 4,1$  mm, considerado adequado para a cultura da cana-planta de ano e meio. De acordo com Planalsucar (1979) em condições de campo na região de Araras, Estado de São Paulo, a evapotranspiração real em cana-planta de ano atingiu valores de 1.377 mm de consumo de água.

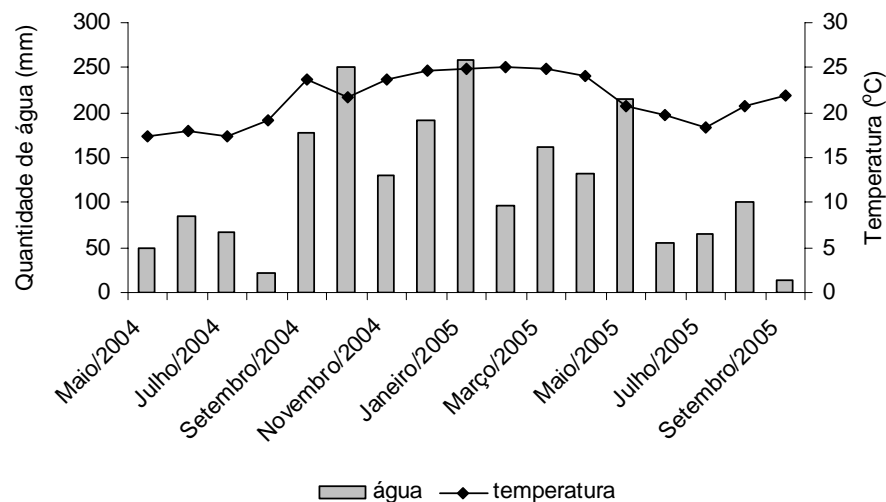


Figura 3 - Quantidade mensal de água recebida pela cultura (barras) e temperatura média mensal (linha), entre maio/2004 a setembro/2005

Ambos os fatores, solução percolada e evapotranspiração, não foram afetados pelo aumento das doses de nitrogênio, bem como pela aplicação ou não de enxofre (Tabela 7). Esperava-se que com o aumento das doses de nitrogênio houvesse maior consumo de água pelas plantas, o que refletiria em maior evapotranspiração e por consequência em menor quantidade de água drenada nos vasos. O nitrogênio devido à característica de estimular maior desenvolvimento vegetativo e exploração radicular, por meio de maior síntese de clorofila, aminoácidos essenciais, carboidratos e esqueletos carbônicos, promoveria maior utilização de água com o aumento das doses de N (MALAVOLTA; VITTI; OLIVEIRA, 1997).

Tabela 7 - Quantidade de solução drenada e evapotranspiração, em função do aumento nos níveis de fertilização com nitrogênio e da aplicação de enxofre, no período de 16 meses. Média de 13 coletas de solução

Dose de N ----- mg vaso <sup>-1</sup> -----	Solução drenada ----- mm -----	Evapotranspiração <sup>1</sup>
0	257,7	1814,1
1200	254,2	1817,6
2400	272,8	1798,9
3600	261,5	1810,1
Média	261,6	1810,2
F doses de N	0,3 <sup>ns</sup>	0,3 <sup>ns</sup>
F doses de S	2,5 <sup>ns</sup>	2,5 <sup>ns</sup>
F interação N x S	2,7 <sup>ns</sup>	2,7 <sup>ns</sup>
C.V. (%)	17,0	2,5

<sup>(1)</sup>Evapotranspiração = quantidade de água que entrou no sistema (chuvas + irrigações) – quantidade de água que saiu do sistema pela drenagem dos vasos;  
ns = não-significativo a 10%.

A inexistência de resposta (Tabela 7) às variáveis solução drenada e evapotranspiração com o aumento dos níveis de N é explicada pela ocorrência de uma chuva de 134,2 mm em apenas 24h, no dia 25 de maio de 2005, que gerou a 13ª e última coleta de solução lixiviada, com volume aproximado de 25% de toda solução drenada no período de 16 meses. A chuva, nesse dia, foi o maior volume de água recebido pelos vasos em um curto período de tempo, provocando drenagem média de 48 mm. A água drenada nesse curto período de tempo provocou um efeito de “mascaramento” da resposta dos fatores ao aumento nas doses de N, o que é confirmado na Tabela 8.

Tabela 8 - Quantidade de solução drenada e evapotranspiração, em função do aumento nos níveis de fertilização com nitrogênio e da aplicação de enxofre, no período de 12 meses. Média de 12 coletas de solução

Dose de N ----- mg vaso <sup>-1</sup> -----	Solução drenada ----- mm -----	Evapotranspiração <sup>1</sup>
0	217,5	1423,3
1200	232,8	1407,9
2400	167,9	1472,9
3600	184,2	1456,6
Média	200,6	1440,2
F doses de N	4,9*	4,9*
F doses de S	0,2 <sup>ns</sup>	0,2 <sup>ns</sup>
F interação N x S	0,9 <sup>ns</sup>	0,9 <sup>ns</sup>
F doses de N-linear	7,6*	7,6*
R <sup>2</sup>	0,51	0,51
C.V.(%)	18,9	2,6

(1) Evapotranspiração = quantidade de água que entrou no sistema (chuvas + irrigações) – quantidade de água que saiu do sistema pela drenagem dos vasos;

\* e ns = significativo e não-significativo a 10%, respectivamente.

Deve ser considerando que nessa época a cana-de-açúcar já havia passado pela fase de máximo crescimento (outubro e abril para a cana de ano e meio) e se encontrava em maturação, apresentando menor absorção de água, nutrientes e baixos índices de evapotranspiração (CASAGRANDE, 1991). Nesta tabela, desconsiderada a última coleta de solução, fica demonstrado o efeito linear de doses de N. A fertilização com S não influenciou, nas condições do trabalho, as variáveis consideradas, demonstrando não ser o elemento fator primordial para o maior desenvolvimento das plantas e, conseqüentemente, proporcionar maior consumo de água, reduzindo a solução drenada (Tabela 7 e 8).

### **2.3.2 Perda de nitrogênio ( $^{15}\text{N}$ ) por lixiviação**

No período experimental não ocorreram perdas mensuráveis por lixiviação de nitrogênio derivado do fertilizante ( $^{15}\text{N}$ ) e do resíduo cultural ( $^{15}\text{N}$ ). O N total lixiviado médio correspondeu a 13,1 mg vaso<sup>-1</sup>, equivalendo a 0,44 kg ha<sup>-1</sup> de N calculado com base na área do vaso, sendo originado, provavelmente, do N nativo do solo ou dos resíduos culturais.

Cerca de 70% de todo o nitrogênio perdido por lixiviação foi quantificado nas duas primeiras coletas da solução, realizadas nos meses de junho e julho de 2004, quando as plantas se apresentavam em início de desenvolvimento vegetativo e do sistema radicular (Figura 4). Nesse período, logo após a brotação da cana-de-açúcar, as chuvas tiveram intensidade de 152 mm, representando 14% do volume total de solução percolada em todo o período experimental (ANEXO A). Esse fato aliado ao pequeno desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar, nesse estágio, resultou na perda observada de N por lixiviação, após 16 meses.

Outro fator a ser considerado refere-se aos drenos preferenciais de escoamento da água entre a parede interna dos vasos e a terra de preenchimento, que ainda não se encontravam ocupado pelo sistema radicular das plantas, ocasionando o arraste de N por esse espaço juntamente com a água (NG KEE KWONG; DEVILLE, 1984).



O aumento das doses de N bem como a aplicação ou não de enxofre não influenciou nas perdas do elemento por lixiviação (Figura 4). Esse fato confirma a elevada imobilização inicial do N-fertilizante nos sítios de sorção microbiológico o que é corroborado pela recuperação média do  $^{15}\text{N}$ -fertilizante no sistema solo-planta da ordem de 70%, sendo aproximadamente 35% desse N recuperado no solo (itens 2.3.9 e 2.3.8).

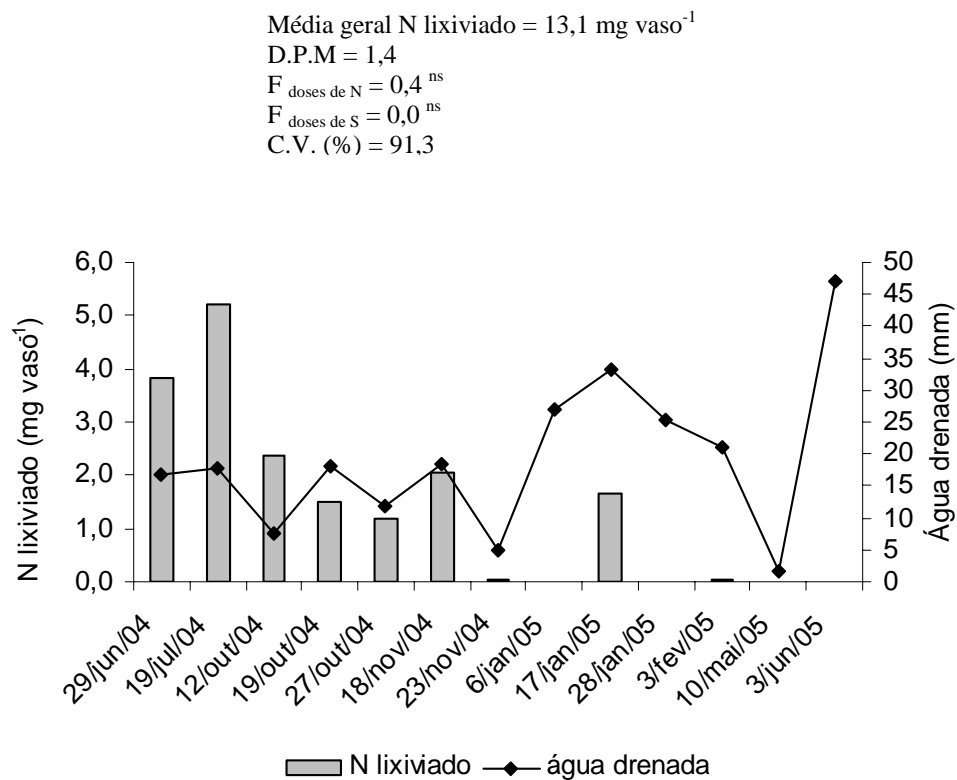


Figura 4 – Nitrogênio lixiviado (mg vaso<sup>-1</sup>) e quantidade de solução (água) drenada (mm). Média geral para os tratamentos T1 ao T8 do experimento 1

O valor médio de N lixiviado de aproximadamente  $0,44 \text{ kg ha}^{-1}$  é considerado muito baixo para solo arenoso, sendo ainda menor que o valor obtido por Oliveira et al. (2002a), trabalhando como o mesmo sistema de cultivo em lisímetros. No estudo de Oliveira et al. (2002a), com cana-de-açúcar crescida em vasos de 250 L, os autores verificaram perda média de  $4,5 \text{ kg ha}^{-1}$  de N, não havendo efeito do tipo de resíduo cultural incorporado ao solo (simulação de reforma de canavial com ou sem queima de restos culturais) e das doses de N sobre o total de N lixiviado, mesmo quando da adição da dose máxima equivalente a  $90 \text{ kg ha}^{-1}$  de N. O valor médio de lixiviação de N quantificado no trabalho de Oliveira et al. (2002a) foi 10 vezes maior que o encontrado neste experimento, sendo observada lixiviação de 53% de todo o N logo nas três primeiras semanas após o plantio, cerca de  $2,4 \text{ kg ha}^{-1}$  de N, após chuvas de 137 mm. Os fatores que podem ter influenciado em maior lixiviação no trabalho de Oliveira et al. (2002a) podem ser atribuídos à época de plantio da cana-de-açúcar (janeiro), com maiores índices pluviométricos que favoreceu às maiores perdas iniciais de N, aliado ao menor período de cultivo (11 meses), quando comparado ao plantio de cana de ano e meio (16 meses) neste trabalho, em época de menor pluviosidade (maio). Portanto, a maior lixiviação de nitrogênio após o plantio, em ambos os trabalhos, foi resultado de menor desenvolvimento radicular e, conseqüente, menor exploração do volume da terra dos vasos, com reflexos no menor aproveitamento do N e maior lixiviação do nutriente.

No trabalho de Ng Kee Kwong e Deville (1984), desenvolvido em lisímetros cultivados com cana-de-açúcar, não ocorreram perdas de N por lixiviação, mesmo em condições de elevada precipitação média anual, 1300 e 3200 mm, em duas regiões das Ilhas Maurício. O fato foi atribuído à imobilização microbiológica e também ao movimento mais lento de  $\text{NO}_3^-$  em relação ao da água percolada. Outros estudos avaliando a lixiviação de N pela técnica com  $^{15}\text{N}$  também não constataram perda do N-fertilizante, entre eles o de Padovesse (1988) e Salcedo; Sampaio e Carneiro (1988). Quando ocorreram, como é o caso do trabalho de Coelho et al. (1991), a perda por lixiviação foi pequena. Basanta (2004) fazendo uso de extratores de solução de solo e tensiometria e fertilização de  $63 \text{ kg ha}^{-1}$  de N, observou perdas menores que 1% do nitrogênio derivado do fertilizante a 50 cm de profundidade em solo argiloso (55% de argila).

Não houve correlação positiva entre a quantidade de nitrogênio lixiviada e o volume de solução drenada (ANEXO B), evidenciando não haver influência entre estes dois fatores, mesmo considerado o maior nível de aplicação de N, equivalente a  $120 \text{ kg ha}^{-1}$  de N. Correlação positiva

entre esses fatores foi obtida por Thorburn; Meier e Probert et al. (2005) utilizando modelos matemáticos para estimar a perda de N por lixiviação em cana-de-açúcar. Os autores observaram que elevada correlação ( $r = 0,70$ ) entre o  $\text{N-NO}_3^-$  lixiviado ( $\text{kg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$ ) e a quantidade de chuva (mm) ocorreu apenas quando a fertilização nitrogenada ultrapassou  $250 \text{ kg ha}^{-1}$ , sugerindo que aplicações de nitrogênio abaixo desse nível provavelmente resultaria em lixiviações reduzidas de N.

Muchovej e Newman (2004), avaliando a lixiviação de N em solos arenosos da Flórida (EUA) cultivados com cana-de-açúcar e a possibilidade de contaminação do lençol freático por  $\text{NO}_3^-$ , verificaram correlação significativa ( $r = 0,55$ ;  $p = 0,0001$ ) entre a quantidade de N-nitrato de amônio aplicado e o aumento na concentração de  $\text{NO}_3^-$  nas águas subterrâneas. Em função desses resultados os autores recomendaram o parcelamento da adubação nitrogenada quando superior a  $70 \text{ kg ha}^{-1}$  de N, justificado pela textura do solo (extremamente arenosa) e pelo regime hídrico com média mensal superior a 200 mm nos meses de junho-setembro, época da fertilização nitrogenada.

A perda de N por lixiviação é utilizada, em alguns casos, como explicação para a ausência de resposta da cana-planta à adubação nitrogenada de plantio (DEMATTE, 1997). Entretanto, o mecanismo que predomina no solo para o N da fertilização é o de elevada imobilização, principalmente em solos com grande aporte de resíduos vegetais, caso da cana-de-açúcar colhida mecanicamente sem queima prévia.

Nas regiões brasileiras de plantio de cana-de-açúcar a preocupação com a perda do nitrogênio por lixiviação parece ser um tanto quanto inconsistente, por vários fatores, podendo-se destacar as condições intrínsecas à cultura, com característica de elevada capacidade de exploração do solo pelo sistema radicular, às baixas quantidade de N tradicionalmente aplicadas na cultura como fertilizante, principalmente em cana-planta, às condições de regime hídrico das regiões canavieiras, com boa distribuição das chuvas, e mais recentemente, a adoção da técnica de conservação dos resíduos culturais sobre o solo, com colheita sem despalha a fogo, em que a ocorrência de imobilização do nitrogênio pelo resíduo de elevada relação C:N torna o sistema conservativo para o nitrogênio.

### 2.3.3 Perda de enxofre ( $^{34}\text{S}$ ) por lixiviação

A perda acumulada de enxofre ( $\text{S-SO}_4^{2-}$ ) na solução percolada no solo dos vasos durante o período experimental, em função dos níveis de fertilização nitrogenada e da aplicação ou não de enxofre, consta da Tabela 9.

Tabela 9 – Quantidade de  $\text{S-SO}_4^{2-}$  total, enxofre derivado do fertilizante (QSdff), S lixiviado de outras fontes e porcentagem de S lixiviado do fertilizante, durante o período experimental, em função dos níveis de fertilização nitrogenada e da aplicação ou não de enxofre. Média de 4 repetições

Dose de N	$\text{S-SO}_4^{2-}$ total		QSdff <sup>1</sup>	Lixiviação de outras fontes <sup>2</sup>	Lixiviação da fonte fertilizante <sup>3</sup>
	Com S (A)	Sem S (B)	(C)	(D = A-C)	
	mg vaso <sup>-1</sup>				%
0	2660,8	868,0	1067,9	1592,9	51,0
1200	2600,6	859,6	1076,3	1524,3	51,0
2400	1665,2	649,7	609,2	1056,0	29,0
3600	1522,6	625,1	405,5	1117,1	19,0
Média	1431,4		789,7	1322,6	37,5
F doses de N	3,4*		4,8*	-	4,8*
F doses de S	47,0*		-	-	-
F interação N x S	1,4 <sup>ns</sup>		-	-	-
F doses de N-linear	8,9*		12,7*	-	12,9*
R <sup>2</sup>	0,87		0,89	-	0,89
C.V.(%)	39,2		40,0	-	39,1

<sup>(1)</sup> QSdff = Quantidade de enxofre lixiviado derivado da fonte fertilizante;

<sup>(2)</sup> Lixiviação de outras fontes = quantidade de S lixiviado de outras fontes (nativo do solo, mineralização dos resíduos, deposição via úmida, etc.) com aplicação de S mineral;

<sup>(3)</sup> Lixiviação da fonte fertilizante = % do enxofre do fertilizante perdido por lixiviação;

\* e ns: significativo e não-significativo a 5%, respectivamente.

Com a aplicação de S e nas doses 0 e 1200 mg vaso<sup>-1</sup> de N, a quantidade total de S lixiviado foi maior que a quantidade total fornecida pela adubação com S (2100 mg vaso<sup>-1</sup>), evidenciando perdas do S mineralizado do solo e/ou do resíduo cultural incorporado ao solo e também do enxofre incorporado via deposição úmida (chuvas).

A estimativa da quantidade total de S presente na terra de preenchimento dos vasos, e passível de perda por lixiviação, após oxidação a sulfato, pode ser feita adotando-se alguns critérios. A quantidade de S-total presente no solo, estimado pela quantidade média de terra utilizada para preenchimento dos vasos, de 250 kg e teor médio de S-total de 31 mg dm<sup>-3</sup>, resulta em 7750 mg vaso<sup>-1</sup> de S-total. Em relação à adição dos resíduos culturais, é sabido da aplicação de folhas secas, raízes e rizomas e ponteiros, nas quantidades de 258, 258 e 84 g vaso<sup>-1</sup>, respectivamente, para simulação de reforma de canavial sem queima. Utilizando-se concentrações médias de cada parte adicionada, tem-se a aplicação de 490,2 mg vaso<sup>-1</sup> de S. Outra forma de entrada de enxofre no sistema é via deposição úmida (chuvas), que para a região de Piracicaba estima-se ser de 16,5 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (BORTOLETTO JÚNIOR, 2004), o que resultou para as precipitações durante o período experimental, em adições de aproximadamente 443 mg vaso<sup>-1</sup> ou 15,4 kg ha<sup>-1</sup> de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. No total tem-se 10783,2 mg vaso<sup>-1</sup> de S suscetível à lixiviação, caso não se considere as interações do S no solo, a absorção pela planta e o grau de mineralização dos resíduos culturais adicionados.

Na ausência de aplicação de enxofre a maior perda foi de 868 mg vaso<sup>-1</sup> de S (Tabela 9) para o tratamento sem adição de N mineral, que representou lixiviação de apenas 10% de todo o S presente no solo, considerada todas as vias de adição de S e excluída a fertilização.

Comparando-se o S lixiviado de outras fontes dos tratamentos com aplicação de S mineral (D=A-C) com o S lixiviado dos tratamentos sem S-fertilizante (B), verifica-se que a adição de S-mineral ao solo potencializa a lixiviação do nutriente de outras fontes em 76% a mais que na condição sem fertilização (Tabela 9). Esse fato pode ser atribuído a maior intensidade de mineralização do S-orgânico pela microbiota do solo quando da aplicação de S mineral ao solo. O enxofre da fertilização representa uma fonte prontamente disponível para consumo dos microrganismos, proporcionando o estreitamento da relação C:S, que nesse caso encontrava-se em torno de 340:1 devido à adição dos resíduos culturais de elevada relação C:S, com reflexos no estímulo à mineralização. Essa inferência ganha sustentação na teoria de mineralização biológica e bioquímica do S, proposta por Mc Gill e Cole (1981). Nesse trabalho, os autores citam que em

condições de baixo nível de  $\text{SO}_4^{2-}$  no solo a mineralização biológica, que apresenta grau de eficiência maior, é inibida, pois os baixos níveis de S no solo não são capazes de sustentar o requerimento por S pelos microrganismos.

O aumento nas doses de N influenciou tanto na diminuição das perdas de S por lixiviação nos tratamentos com aplicação de S, quanto naqueles sem aplicação de S, demonstrando que o N proporcionou maior aproveitamento do S da fertilização mineral e também do mineralizado do solo e/ou resíduos culturais.

O maior efeito da fertilização com N na redução da lixiviação de fontes de S ocorreu no QSdff comparativamente ao S do solo (B) de 43 e 28 % para o maior e menor nível de N respectivamente. Esses resultados dão indicação que o aumento nas doses de N influenciou no melhor aproveitamento do S, tanto do solúvel aplicado via fertilização, quanto do nativo ou mineralizado do solo, sendo a única diferença existente no grau de influência ser maior naquele enxofre mais facilmente passível de perda, ou seja, o adicionado pela fertilização.

Uma possível explicação para que o aumento nas doses de N reflita em menor quantidade de S perdido por lixiviação consiste no fato do nitrogênio proporcionar maior desenvolvimento vegetativo e radicular, proporcionando maior exploração do volume de solo e, conseqüentemente, maior absorção e utilização dos nutrientes presentes no solo, entre eles o enxofre.

Em estudos realizados por Franco et al. (2005) com cana-de-açúcar, houve efeito direto do aumento das doses de N no acúmulo de enxofre pela planta (parte aérea e sistema radicular), sugerindo que a adubação nitrogenada auxilia no melhor aproveitamento do enxofre mineral do solo, diminuindo as possibilidades de perda do elemento por lixiviação.

Com o uso da técnica isotópica com o isótopo  $^{34}\text{S}$  é possível quantificar quanto, do total do S lixiviado, é proveniente do fertilizante marcado. Na Tabela 9 observa-se maiores valores de recuperação no S lixiviado (51%) nas doses de N de 0 e 1200 mg vaso<sup>-1</sup>, o que indica maiores perdas do S aplicado via fertilização.

A recuperação média observada para a lixiviação foi de 37,5% (Tabela 9), evidenciando elevada perda do nutriente por arraste em profundidade no solo, e se somada a recuperação média encontrada no sistema solo-planta (70%, item 2.3.12), demonstra haver excelentes resultados de recuperação no sistema solo-planta para o enxofre adicionado via fertilização.

O aumento nas doses de N proporcionou diminuição linear significativa ( $p > 0,006$ ) na quantidade de enxofre derivada da fonte fertilizante (QSdff, mg vaso<sup>-1</sup>) (Tabela 9), reflexo da

maior utilização de S pelas plantas, nas maiores doses de N, conforme os resultados de acúmulo de S na planta (item 2.3.5), que corroboram com os observados por Franco et al. (2005). Extrapolando os valores de perda de S do fertilizante para quantidades equivalentes a  $\text{kg ha}^{-1}$ , tem-se na ausência de aplicação de N as maiores perdas, cerca de  $36 \text{ kg ha}^{-1}$  de S dos  $70 \text{ kg ha}^{-1}$  aplicados, sendo observada redução na lixiviação de S em 37% com a maior dose de N, com perda de  $13 \text{ kg ha}^{-1}$  de S.

A respeito da correlação existente entre quantidade de solução drenada e S-total e S-fertilizante lixiviados, verifica-se que houve correlação positiva entre as grandezas, em ambos os casos, indicando que a quantidade de S perdida por lixiviação é dependente da quantidade de água drenada pelo solo (Figura 5).

Resultados semelhantes foram obtidos por Korentajer; Byrnes e Hellums (1984) que verificaram que as perdas de S por lixiviação são dependentes do volume de água percolado pelo solo e da quantidade de S aplicada, e também que a maior absorção do S pelas plantas, proporcionado pelo crescimento vegetativo, refletem em menores quantidades de S perdido por lixiviação.

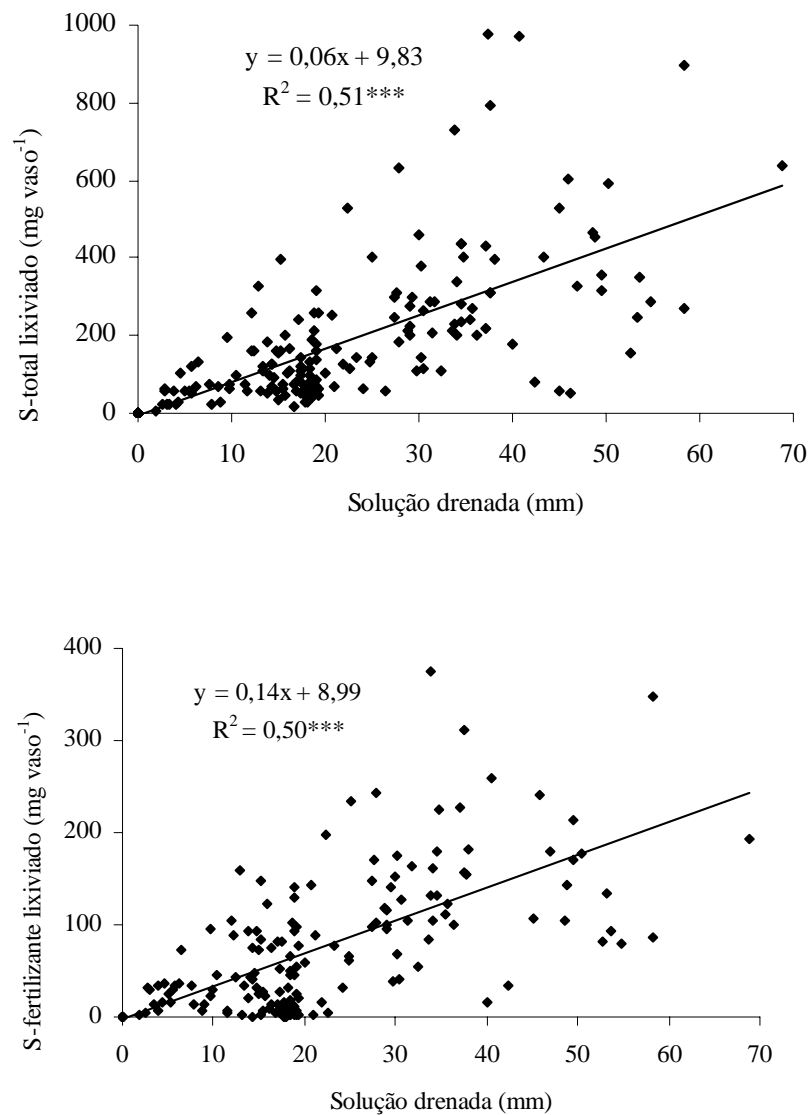


Figura 5 – Enxofre (Y) em função de quantidade de solução drenada (X). Pontos de correlação: 208, significando todas as amostragens de drenagem dos tratamentos T1 ao T4 do experimento 2, durante o período experimental. \*\*\* : significativo a 1%



A correlação da quantidade de solução drenada acumulada (mm) e o S-total lixiviado acumulado ( $\text{mg vaso}^{-1}$ ), em cada nível de fertilização com nitrogênio, indicou coeficiente de determinação altamente significativo ( $R^2 = 0,99^{***}$  em todas as curvas) (Figura 6).

A curva da maior dose de N ( $3,6 \text{ g vaso}^{-1}$ ) em relação à testemunha ( $0 \text{ g vaso}^{-1}$ ) apresentou redução de 43% do S-total lixiviado e redução de 4% no volume de solução drenada acumulada, podendo-se inferir uma vez mais, que o aumento nas doses de N reduziu o S-total lixiviado, tanto o S do solo, quanto o adicionado pela fertilização (Figura 6).

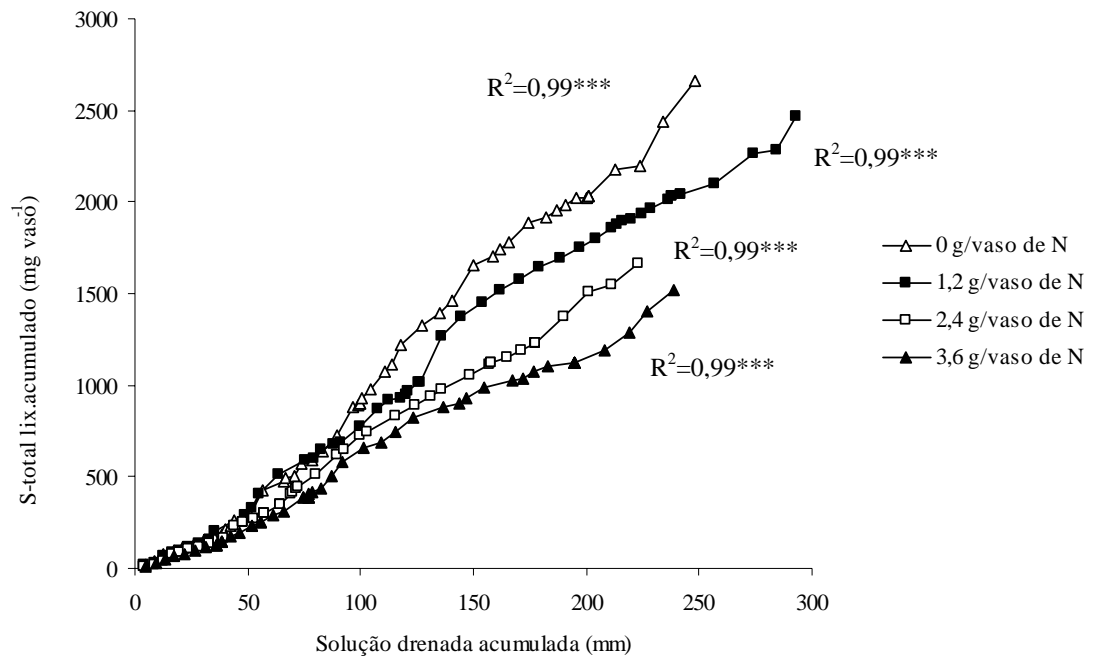


Figura 6 – Correlação entre solução drenada acumulada (mm) e S-total lixiviado acumulado ( $\text{mg vaso}^{-1}$ ). Total de 13 coletas com média de 4 repetições dos tratamentos T1 ao T4 do experimento 2 ( $R^2 = 0,99^{***}$  para todas as curvas e significativo a 1%)

Outro fator que influenciou na perda de S por lixiviação é a textura do solo e sua capacidade de adsorção de sulfatos. Foi demonstrado por Dias et al. (1994), avaliando a lixiviação de S em colunas de solo de 40 cm de altura, que as soluções lixiviadas que continham maiores concentrações de S provinham de solos arenosos, apesar de terem recebido 43% menos quantidade de S que os solos argilosos. O mesmo resultado foi verificado anteriormente por Singh; Abrahamsen e Stuants (1980), em condições de campo, revelando que a quantidade de S-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> lixiviada apresenta relação inversa à capacidade de adsorção de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> pelos solos.

Pode-se concluir que a perda de S por lixiviação representa grande preocupação, principalmente em solos com baixa capacidade de adsorção aniônica. Entretanto, outro reflexo da perda de S, e não menos importante, foi observado por Dias et al. (1994), em que a movimentação dos cátions trocáveis Ca e Mg estiveram associadas à movimentação de sulfato, ou seja, juntamente com a lixiviação de S há arraste e conseqüente perda de Ca e Mg em profundidade, como cátions acompanhantes.

Conforme verificado, o potencial de lixiviação do enxofre em solos de textura arenosa é alto, e torna-se ainda mais preocupante para a cultura da cana-de-açúcar quando se considera que a prática mais comum de fornecimento do nutriente (S), e muitas vezes a única, ocorre na reforma do canavial, com a realização da gessagem. Nessas condições, em que ainda não se tem a cultura estabelecida ou posteriormente essa ainda apresentará baixo desenvolvimento radicular com conseqüente baixa exploração e aproveitamento do S solúvel adicionado ao solo, o potencial de lixiviação será ainda maior, principalmente nos chamados plantio de cana-de-ano, realizado nos meses de chuva para a região Centro-Sul do Estado de São Paulo. A questão torna-se ainda mais importante se forem consideradas áreas de colheita com despalha a fogo, onde 95% do enxofre contido nos resíduos culturais e que seriam revertidos ao sistema após sua mineralização, é volatilizado e perdido para a atmosfera na forma de gases de S. Dessa forma, o manejo do fornecimento do enxofre para a cultura da cana-de-açúcar deve ser revisto, dando-se prioridade para a aplicação do nutriente em épocas de maior desenvolvimento radicular e vegetativo das plantas (soqueiras), ou seja, quando houver capacidade de absorção do nutriente pelas plantas, reduzindo assim o potencial de perda, os custos do fornecimento não bem sucedido e melhorando o aproveitamento do enxofre pelas plantas de cana-de-açúcar.

### 2.3.4 Acúmulo de massa de matéria seca na cana-de-açúcar

A Tabela 10 apresenta os resultados de acúmulo de massa de matéria seca na parte aérea (ponteiro+folhas secas+colmo), parte subterrânea (raízes+rizomas) e planta toda, assim como a relação parte aérea/parte subterrânea na colheita final da cana-de-açúcar, em função dos níveis de adubação com nitrogênio (0, 1,2, 2,4 e 3,6 g vaso<sup>-1</sup>) e da aplicação ou não de enxofre (2,1 e 0 g vaso<sup>-1</sup>).

Com o aumento das doses de nitrogênio houve aumento no acúmulo de massa de matéria seca na parte aérea (PA), subterrânea (PS) e planta toda, mas não se constatou efeito para o enxofre. Em relação a maior dose e a dose zero, têm-se um o maior acúmulo, sendo de 56% na parte aérea, 37% na parte subterrânea e 53% na planta toda, demonstrando que o aumento nos níveis da fertilização com N influenciou em maior desenvolvimento da parte aérea.

Tabela 10 – Acúmulo de massa de matéria seca (g vaso<sup>-1</sup>) na parte aérea (PA), parte subterrânea (PS), planta toda e relação PA/PS, em função dos níveis de nitrogênio e de enxofre

Dose de N	Parte aérea <sup>1</sup>	Parte subterrânea <sup>2</sup>	Planta toda	Relação PA/PS <sup>3</sup>
-----g vaso <sup>-1</sup> -----				
0	1404,7	260,0	1664,7	5,7
1,2	1599,7	319,4	1924,4	5,2
2,4	1982,4	298,8	2283,3	6,8
3,6	2190,5	356,5	2547,0	6,3
F doses de N	54,3**	3,2*	48,0**	2,7 <sup>ns</sup>
F doses de S	0,4 <sup>ns</sup>	0,4 <sup>ns</sup>	0,6 <sup>ns</sup>	0,1 <sup>ns</sup>
F interação NxS	1,7 <sup>ns</sup>	1,3 <sup>ns</sup>	1,7 <sup>ns</sup>	1,1 <sup>ns</sup>
F doses de N-linear	160,1**	7,2**	143,4**	3,3 <sup>ns</sup>
R <sup>2</sup>	0,98	0,74	0,99	-
C.V (%)	7,6	20,5	7,5	20,3

<sup>(1)</sup> Parte aérea = ponteiro + folhas secas + colmos;

<sup>(2)</sup> Parte subterrânea = raízes + rizomas;

<sup>(3)</sup> PA/PS = relação parte aérea/parte subterrânea;

\*, \*\* e ns = significativo a 5 e 1% e não-significativo, respectivamente.

Resultados diferentes foram observados por Trivelin et al. (2002b), em cana-planta de ano, com maior acúmulo de matéria seca entre a maior dose ( $2,7 \text{ g vaso}^{-1}$  de N) e a testemunha de 29, 70 e 36%, respectivamente, na parte aérea, parte subterrânea e planta toda. No trabalho desenvolvido por Trivelin et al. (2002b), o efeito das doses de nitrogênio foi mais efetivo no acúmulo de massa seca na parte subterrânea da cana-de-açúcar. A provável explicação para a influência das doses de N no acúmulo de massa seca nas raízes e rizomas nesses dois experimentos pode ser atribuída ao tempo de cultivo (11 meses e 16 meses, respectivamente). No trabalho de Trivelin et al. (2002b), as plantas foram mantidas em campo por um período de 11 meses (cana-planta de ano). Pode-se inferir, nessas condições, que não houve tempo de as plantas expressarem o mecanismo fisiológico, intrínseco da cultura, de formação da parte aérea e posterior redirecionamento das reservas formadas na parte aérea para a subterrânea (raízes e rizomas). A rebrota da cultura após a colheita é dependente das reservas orgânica e nutricional em raízes e rizomas (CAMARGO, 1989; MALAVOLTA, 1994). A ausência de redirecionamento das reservas para a parte subterrânea fez com que a quantidade de massa seca acumulada fosse influenciada diretamente pelo aumento no nível da adubação nitrogenada, por isso o acréscimo de 70% observado entre a maior dose e o zero de aplicação de N.

O contrário desse mecanismo, nas condições do experimento com ciclo de crescimento de 16 meses (cana-planta de ano e meio), ocorreu translocação de reservas para a parte subterrânea, com redução da influência direta das doses de N na massa de matéria seca, e menor diferença (37%) entre a maior dose e a testemunha. Outro fator a ser considerado e que afetaria diretamente o acúmulo de massa seca na parte subterrânea é a característica de menor perfilhamento da variedade utilizada neste experimento (SP 80-3280).

A elevada relação média entre o acúmulo de matéria seca da parte aérea e da parte subterrânea (PA/PS), de cerca de 6,0 (Tabela 10), representa, segundo Silveira (1985), um indicativo de baixa disponibilidade de N à cultura. Esse fato é corroborado pela ausência de resposta à aplicação de enxofre no acúmulo de massa seca nas plantas, significando que embora com resposta ao N, esse nutriente foi o primeiro fator limitante, ou seja, a resposta ao S foi limitada pela quantidade de N disponível à cultura.

### 2.3.5 Acúmulo de nitrogênio e enxofre na cana-de-açúcar

Na Tabela 11 são apresentados os valores médios de acúmulo de nitrogênio na parte aérea, subterrânea, planta toda e planta toda menos colmos, em função das doses de N e do S. Semelhante ao observado para a variável acúmulo de matéria seca, não houve efeito da aplicação de S, com efeito linear para doses de N, no acúmulo de nitrogênio para as partes da cana-de-açúcar, evidenciando que as plantas acumularam maiores quantidades de N com o aumento nos níveis de fertilização nitrogenada, como também observado por Korndörfer et al. (1997), Oliveira (1999) e Vitti (1998).

Tabela 11 - Acúmulo de nitrogênio ( $\text{mg vaso}^{-1}$ ) na parte aérea, parte subterrânea, planta toda e planta toda menos colmos, em função dos níveis de nitrogênio e de enxofre

Dose de N	Parte aérea <sup>1</sup>	Parte subterrânea <sup>2</sup>	Planta toda	Planta toda - colmos <sup>3</sup>
----- mg vaso <sup>-1</sup> -----				
0	2454,7	744,7	3199,4	2606,3
1200	2672,3	916,5	3586,7	2925,5
2400	3395,3	896,4	4270,2	3384,4
3600	3778,3	1113,5	4891,8	3919,2
F doses de N	64,5**	2,9*	39,6**	29,6**
F doses de S	1,1 <sup>ns</sup>	0,03 <sup>ns</sup>	0,8 <sup>ns</sup>	0,5 <sup>ns</sup>
F interação NxS	2,2 <sup>ns</sup>	1,5 <sup>ns</sup>	1,8 <sup>ns</sup>	1,8 <sup>ns</sup>
F doses de N-linear	186,3**	7,5**	117,3**	87,8**
R <sup>2</sup>	0,96	0,86	0,99	0,99
C.V (%)	7,1	27,4	8,4	9,2

<sup>(1)</sup> Parte aérea = ponteiro + folhas secas + colmos;

<sup>(2)</sup> Parte subterrânea = raízes + rizomas;

<sup>(3)</sup> Planta toda - colmos = resíduo da colheita mecanizada sem queima;

\*, \*\* e ns= significativo a 10%, 1% e não-significativo, respectivamente.

O maior acúmulo de N com o aumento das doses do nutriente foi resultado exclusivo do acúmulo de massa seca, uma vez que as concentrações de N nas diversas partes da planta não sofreram influência dos tratamentos, exceção feita aos colmos, que acumularam mais nitrogênio com o aumento das doses de N e S (Tabela 12). Uma possível explicação para o efeito dos tratamentos expressarem maiores concentrações de N apenas nos colmos pode estar ligada ao fato de o colmo representar o órgão da planta de máxima reserva, com o direcionamento e acúmulo dos fotoassimilados. Há de se considerar que esses resultados sugerem que a colheita dos colmos foi realizada no momento adequado de maturidade, uma vez que o maior acúmulo de N sugere não ter havido degradação de açúcares por ocasião do atraso na colheita.

Destaquem-se os baixos valores de concentração de N na parte aérea (Tabela 12) comparativamente aos do trabalho de Trivelin et al. (2002b) pelo motivo mencionado anteriormente e devido à limitação da disponibilidade de N, mesmo na dose mais elevada. Outro ponto a destacar é que no sistema radicular as concentrações de N foram menos influenciadas, o que vem confirmar ser esta parte da planta órgão de reserva para sustentar a rebrota da cultura.

Tabela 12 – Concentração de nitrogênio nas diversas partes da cana-de-açúcar em função das doses de nitrogênio e de enxofre

Dose de N	Folha seca	Ponteiro	Colmo		Raiz
			Com S	Sem S	
----- g vaso <sup>-1</sup> -----	----- g kg <sup>-1</sup> -----				
0	2,95	4,71	0,70	0,66	2,77
1,2	2,85	4,82	0,69	0,63	2,89
2,4	3,01	4,65	0,73	0,70	2,95
3,6	3,08	4,67	0,74	0,68	3,11
Média	2,98	4,71	0,71a	0,67b	2,93
F doses de N	2,0 <sup>ns</sup>	0,3 <sup>ns</sup>	3,2*		1,2 <sup>ns</sup>
F doses de S	0,0 <sup>ns</sup>	0,8 <sup>ns</sup>	10,8**		1,8 <sup>ns</sup>
F doses N-linear	-	-	5,3*		-
R <sup>2</sup>	-	-	0,56		-
C.V.(%)	6,5	8,4	6,0		12,6

\*, \*\* e ns = significativo a 5%, 1% e não-significativo, respectivamente; Médias seguidas de letras distintas na mesma linha diferem entre si estatisticamente.

Do total de nitrogênio acumulado na planta, aproximadamente 77% foi encontrado na parte aérea, 23% na parte subterrânea e, o mais importante, 80% na planta toda menos os colmos, ou seja, 80% de todo o N acumulado pela cana-de-açúcar é passível de permanência no solo, como resíduo de colheita, no sistema sem despalha à fogo.

A distribuição porcentual de N total acumulado nas diversas partes da planta não variaram com os tratamentos, o que demonstra que a distribuição de acúmulo de N não é influenciada pela disponibilidade ou restrição de N às plantas. Resultados semelhantes foram observados por Vitti (1998), com permanência de 80% de todo o N acumulado pela cana-de-açúcar, na forma de resíduos culturais no sistema sem queima.

Nesse caso, com a ausência de queima na colheita, cerca de 80% de todo o N acumulado pela cultura permaneceria no solo, podendo ser posteriormente disponibilizado às socas subseqüentes por meio da mineralização. Caso houvesse a queima anterior à colheita, cerca de 40% do N acumulado seria perdido do sistema com a queima das folhas secas e lançamento do N à atmosfera (CRUTZEN et al., 1979).

Em relação à menor dose, o acúmulo de N na maior dose foi 54% superior na parte aérea, 50% na parte subterrânea e 53% na planta toda, representando a parte aérea o maior incremento na acumulação de N, à semelhança do verificado com os resultados de matéria seca.

Com base nesses resultados, a adubação nitrogenada de plantio, mesmo quando não apresente resposta em produtividade, representará a forma mais adequada de manutenção do nitrogênio no sistema, proporcionando o reaproveitamento desse N pela cultura ao longo do tempo, pela mineralização dos resíduos no solo (OLIVEIRA et al., 1999c). Estudos de redução na adubação mineral com N, com a manutenção da palhada da cultura sobre o solo, realizados na Austrália por um período de 20 anos, apontam para reduções de até 40 kg ha<sup>-1</sup> de N ao longo do tempo e da estabilização do sistema (VALLIS et al., 1996).

Houve resposta significativa ao aumento dos níveis de N e da adição de S, sem interação entre os fatores, no acúmulo de enxofre nas diversas partes da cana-de-açúcar (Tabela 13).

Em relação a menor e maior dose de N e da aplicação ou não de S, observa-se maior acúmulo porcentual de aproximadamente 29 e 23% na parte aérea, 27 e 13% na parte subterrânea e 29 e 21% na planta toda. Esses resultados demonstram que o maior acúmulo de S com o aumento dos níveis de fertilização com N independem da aplicação do S mineral ao solo. A afirmativa anterior sugere que a nutrição nitrogenada da cultura está relacionada ao melhor

aproveitamento do S do solo, quer seja o mineral fornecido pela adubação, do nativo e/ou mineralizado do solo e dos resíduos culturais e, também, o depositado pelas chuvas (deposição úmida).

Tabela 13 - Acúmulo de enxofre ( $\text{mg vaso}^{-1}$ ) na parte aérea, parte subterrânea, planta toda e planta toda - colmos, em função dos níveis de nitrogênio e de enxofre

Dose de N	Parte				Planta toda -			
	Parte aérea <sup>1</sup>		subterrânea <sup>2</sup>		Planta toda		colmos <sup>3</sup>	
	Com S	Sem S	Com S	Sem S	Com S	Sem S	Com S	Sem S
----- mg vaso <sup>-1</sup> -----								
0	1491,5	1101,1	381,5	308,1	1873,0	1409,2	1093,5	841,4
1200	1568,1	1233,9	490,7	441,2	2058,9	1675,1	1292,7	1068,0
2400	1830,6	1463,1	378,6	357,7	2209,2	1814,9	1329,4	1012,5
3600	1922,8	1351,7	486,5	349,8	2409,3	1701,5	1424,7	1020,5
Média	1703,2a	1287,4b	434,3a	364,2b	2137,7a	1650,1b	1285,1a	985,6b
F doses de N	7,6***		2,9*		8,4***		8,6***	
F doses de S	42,9***		4,8**		57,5***		59,0***	
F interação NxS	0,7 <sup>ns</sup>		0,6 <sup>ns</sup>		1,4 <sup>ns</sup>		1,0 <sup>ns</sup>	
F doses de N-linear	20,0***		0,7 <sup>ns</sup>		23,3***		18,8***	
R <sup>2</sup>	0,88		-		0,92		0,73	
C.V (%)	12,0		22,6		9,6		9,7	

<sup>(1)</sup> Parte aérea = ponteiro + folhas secas + colmos;

<sup>(2)</sup> Parte subterrânea = raízes + rizomas;

<sup>(3)</sup> Planta toda - colmos = resíduo da colheita mecanizada sem queima;

\*, \*\*, \*\*\* e ns= significativo a 10%, 5% e 1% e não-significativo, respectivamente;

Médias seguidas de letras distintas na mesma linha diferem entre si estatisticamente.



Como observado para o N, do total de S acumulado na planta, cerca de 80% foi encontrado na parte aérea, 21% nos colmos e 60% na planta toda menos os colmos, porcentagens essas que foram independentes da aplicação ou não de enxofre. Os colmos acumulam maiores quantidades de S do que N, proporcionalmente ao total acumulado desses elementos, sendo um indicativo da importância do nutriente para a cultura. A permanência no solo de 60% de todo o S acumulado pela planta, no caso da ausência de queima dos restos culturais, demonstra o caráter conservativo do S no sistema sem queima e, como observado para o N, estaria passível de utilização, ao longo do tempo, após sua mineralização.

O maior acúmulo de S total, como verificado para o N, foi função exclusiva da maior produção de matéria seca (Tabela 10), uma vez que a diminuição na concentração de S nas diversas partes da planta ocorreu com o aumento nas doses de N (Tabela 14).

Tabela 14 - Concentração de enxofre ( $\text{g kg}^{-1}$ ) nas diversas partes da planta, em função das doses de nitrogênio e de enxofre

Dose de N	Folha seca		Ponteiro		Colmo		Raiz	
	Com S	Sem S	Com S	Sem S	Com S	Sem S	Com S	Sem S
--g vaso <sup>-1</sup> --	----- g kg <sup>-1</sup> -----							
0	1,30	1,09	1,26	0,97	0,86	0,69	1,40a	1,22a
1,2	1,37	1,06	1,25	1,01	0,79	0,58	1,79a	1,21b
2,4	1,26	0,94	1,23	0,78	0,71	0,63	1,28a	1,22a
3,6	1,18	0,82	1,16	0,74	0,76	0,48	1,35a	1,04b
Média	1,28a	0,98b	1,23a	0,87b	0,78a	0,60b	1,45a	1,17b
F doses de N	4,0*		3,7*		2,0 <sup>ns</sup>		8,6**	
F doses de S	38,0**		66,2**		16,0**		39,6**	
F interação NxS	0,4 <sup>ns</sup>		1,3 <sup>ns</sup>		0,8 <sup>ns</sup>		6,3**	
F doses de N-linear	10,1**		9,4**		5,4*		8,8**	
R <sup>2</sup>	0,84		0,84		0,91		0,34	
C.V.(%)	12,3		11,7		18,8		9,6	

\*, \*\* e ns = significativo a 5%, 1% e não-significativo, respectivamente;  
Valores seguidos de letras distintas na linha diferem entre si estatisticamente.

Na Tabela 14 observa-se que as concentrações de S em todas as partes da planta (folha seca, ponteiro, colmo e raiz) decresceram linearmente com as doses de N, com reposta positiva em aumento na concentração quando da aplicação de S. Em relação à reposta na concentração de S à aplicação do elemento pela fertilização ( $2,1 \text{ g vaso}^{-1}$  de S) e aumento nas doses de N era esperado aumento nas concentrações, pois uma vez disponibilizado maior quantidade de enxofre mineral prontamente solúvel, a planta absorveria desse aporte incrementando suas concentrações vegetais. Entretanto houve decréscimo nas concentrações de S com o aumento das doses de N, fato explicado por uma possível ocorrência de efeito de diluição proporcionada pelo nitrogênio. O mesmo efeito de diluição nas concentrações de S provocado pelo aumento nos níveis de fertilização com N foi observado por Batista (2002) e Bonfin-Silva (2005) em diversas partes dos capins Marandu e Braquiária.

O decréscimo nas concentrações de S nas partes das plantas resultou em maiores relações N:S, conforme apresentado nas Figuras 7 e 8, e que pode, segundo Dijshoorn e Van Wijk (1967), ser utilizada como parâmetro do estado nutricional para N e S.

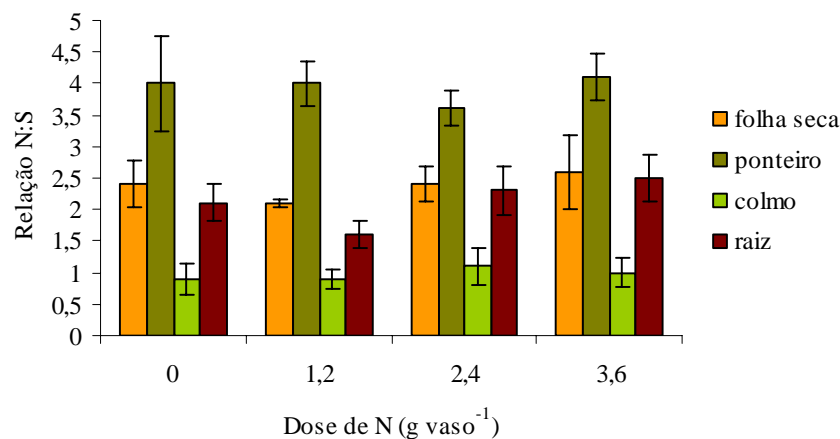


Figura 7 – Relação N:S nas diversas partes da planta em função do aumento dos níveis de nitrogênio e da aplicação de  $2,1 \text{ g vaso}^{-1}$  de enxofre. Média de 4 repetições

Na Figura 7 observa-se que a relação N:S esteve entre 4:1 para o ponteiro e 1:1 para o colmo, quando da aplicação de enxofre no solo, entretanto na ausência de aplicação de S essas relações aumentaram para 5,5:1 (ponteiro) e 1,2:1 (colmo) (Figura 8), como resultado das menores concentrações de S nos tecidos vegetais.

O colmo representou, porcentualmente, a parte da planta de maior acúmulo de matéria seca, aproximadamente 55%, e que conjuntamente possui as menores relações N:S, cerca de 1:1, ou seja, a alta produção de matéria seca reflete no estreitamento da relação N:S a valores abaixo dos níveis considerados adequados, de mesmo modo que a baixa relação N:S pode estar limitando a máxima expressão do potencial produtivo da cultura, avaliado pela produção de colmos. O inverso ocorre para o ponteiro, que representa cerca de 7% da matéria seca da planta, com relação N:S por volta de 4-5:1, valor pouco maior, porém abaixo do considerado adequado, o qual encontra-se por volta de 7-15:1, dependendo da espécie e do suprimento por enxofre (LOPES, 1998).

A importância da relação N:S também deve ser observada na adubação, sendo que o aumento da dose de N implicará no incremento da dose de S, a fim de se garantir o equilíbrio desses nutrientes na planta (MALAVOLTA, 1996).

Para a cultura da cana-de-açúcar, estudos de Franco et al. (2005) revelaram efeito direto de doses de N no acúmulo total de enxofre pela cana-de-açúcar, sendo observada relação N:S próxima a 2, independente da parte da planta avaliada.

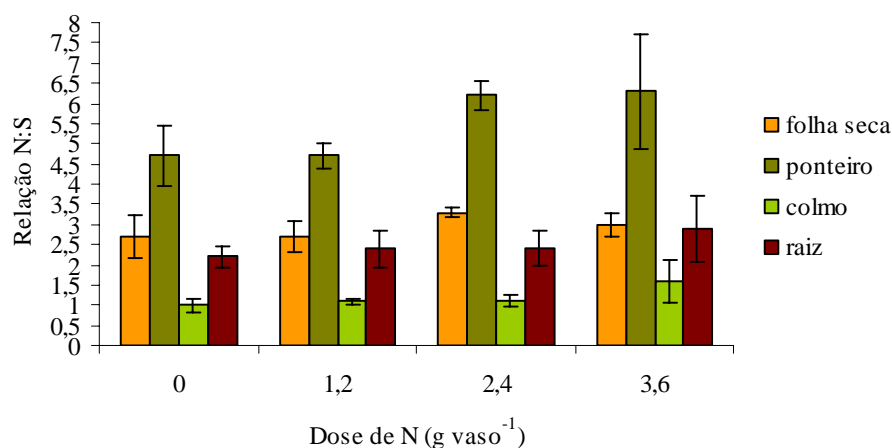


Figura 8 – Relação N:S nas diversas partes da planta em função do aumento dos níveis de nitrogênio e da ausência de aplicação de enxofre. Média de 4 repetições

Considerando os resultados de acúmulo de matéria seca, nitrogênio e enxofre pelas plantas de cana-de-açúcar pode-se, em princípio, refutar a hipótese da ocorrência de sinergia entre os nutrientes. O aumento no acúmulo de S pela planta proporcionado pelo aumento nos níveis da adubação nitrogenada é resultado exclusivo do aumento de produção de massa seca, uma vez que as concentrações de S nos tecidos vegetais decresceram linearmente. Não houve resposta à aplicação de S no acúmulo de matéria seca e nitrogênio pelas plantas (Tabelas 10 e 11 respectivamente). Pelo exposto, pode-se justificar para a falta de sinergia entre os nutrientes considerados, que as quantidades disponíveis dos nutrientes estiveram aquém das necessidades da cana-de-açúcar, especialmente o nitrogênio, pela elevada utilização pela cultura e o enxofre pelo intenso grau de lixiviação, como determinado.

### **2.3.6 Produção e qualidade tecnológica dos colmos**

A produção de colmos respondeu linearmente às doses de N, não havendo efeito para o S (Tabela 15). O aumento médio de produção da maior dose de N em relação a testemunha representou 1612 g vaso<sup>-1</sup> de colmos, o correspondente a 55%. Considerando o N total acumulado pela planta toda (parte aérea e subterrânea, Tabela 11), a exigência média do nutriente para a produção de colmos foi de 0,9 g de N por kg de colmo, sem diferença entre a maior dose de N e a testemunha, e considerando apenas o N acumulado na parte aérea o índice passaria a 0,8.

Trivelin et al. (2002b) com a variedade SP 80-1842, verificaram para o N acumulado na planta toda, índices de 2,4 e 2,1 na maior dose de N (2,7 g vaso<sup>-1</sup>) e testemunha. Quando considerado o N acumulado apenas na parte aérea, os índices passaram para 1,7 e 1,6 g N por kg de colmo nas mesmas doses avaliadas. Korndörfer et al. (1997) obtiveram, em experimento de campo e 4 cultivares de cana-de-açúcar, índice médio de 1,4 g de N por kg de colmo.

As diferenças entre os índices de utilização do nitrogênio para a produção de colmos apontam para a maior eficiência na utilização do N da cultivar utilizada neste experimento (SP 80-3280), o que é corroborado pelos índices de produção de açúcar. Na produção de 1 kg de açúcar foi utilizado aproximadamente 6 g de N para a SP 80-3280 e 15 g para a SP 80-1842 (TRIVELIN et al., 2002b).

A resposta em aumento de produtividade da cana-de-açúcar aos níveis de adubação nitrogenada de plantio observada nesse estudo serve como subsídio para esclarecer o conceito que se tem de baixa resposta da cana-planta a adubação nitrogenada de plantio (AZEREDO et al., 1986; CANTARELLA; RAIJ, 1986; ROSSIELLO, 1987), vindo a se somar aos trabalhos que observaram resposta linear em produtividade às doses de N (KORNDÖRFER et al., 1997; MUCHOW et al., 1996; TRIVELIN et al. 2002b, VITTI, 1998).

Tabela 15 – Produção de colmos, rendimento de açúcar e umidade do colmo em função das doses de nitrogênio e de enxofre

Dose de N	Produção de colmos	Rendimento de açúcar <sup>1</sup>	Umidade do colmo <sup>2</sup>
	-----g vaso <sup>-1</sup> -----	-----g vaso <sup>-1</sup> -----	-----%-----
0	2912,5	409,7	70,0
1,2	3333,1	468,2	70,0
2,4	4042,7	598,9	69,3
3,6	4524,4	643,2	69,6
F doses de N	29,3*	19,8*	0,9 <sup>ns</sup>
F doses de S	0,7 <sup>ns</sup>	0,6 <sup>ns</sup>	0,2 <sup>ns</sup>
F interação NxS	0,8 <sup>ns</sup>	1,3 <sup>ns</sup>	0,1 <sup>ns</sup>
F doses de N-linear	87,0*	57,3*	1,3 <sup>ns</sup>
R <sup>2</sup>	0,99	0,96	-
C.V (%)	10,1	13,1	1,4

<sup>(1)</sup>O rendimento de açúcar foi obtido do produto dos valores de teores de Pol da cana (PolCana) com os de produção de colmo;

<sup>(2)</sup>Umidade de colmo = [(matéria natural – matéria seca)/matéria natural] 100;

\* e ns = significativo a 1% e não-significativo, respectivamente.

Para o enxofre não houve resposta em aumento de produção de colmos com a sua aplicação. Considerando-se o S total acumulado na planta toda (Tabela 13), têm-se um índice médio de 0,6 g de S por kg de colmo quando aplicado enxofre no solo e 0,4 na ausência de aplicação. Esses índices são semelhantes aos citados por Silva e Casagrande (1983) e Malavolta (1994), de 0,2 a 0,5 g de S por kg de colmo.

Os índices tecnológicos obtidos foram considerados adequados à colheita da cana-de-açúcar, segundo Fernandes (1986). Não houve efeito dos fatores estudados (N e S) nos teores de BRIX%CA (16,2%), fibra (15,0%), PolCE (17,8%) e PolCana (14,4%), os quais qualificam a matéria-prima. Entretanto, o rendimento em açúcar aumentou linearmente com o aumento das doses de N, não sendo afetado pelo S (Tabela 15). A maior dose em relação à ausência de aplicação de N produziu 57% mais açúcar ( $\text{g vaso}^{-1}$ ), sendo observado acréscimo de 14% logo na primeira dose de N utilizada ( $1,2 \text{ g vaso}^{-1}$  de N), a qual é proporcional a aplicação de  $40 \text{ kg ha}^{-1}$  de N, quantidade menor que a oficialmente recomendada para plantio pela COPERSUCAR, que representa  $50 \text{ kg ha}^{-1}$  de N (PENATTI; DONZELLI; FORTI, 1997).

Conclui-se, portanto, que o aumento em rendimento de açúcar deveu-se à maior produção de colmos por vaso, em resposta a adubação nitrogenada de plantio, e não a melhoria na qualidade tecnológica da matéria-prima. O mesmo efeito foi observado por Azeredo et al. (1986), Korndörfer et al. (1997), Trivelin et al. (2002b) e Vitti (1998), mas são contrários aos de Silveira e Crocomo (1981), que observaram decréscimo no teor de sacarose em plantas que se desenvolveram na presença de alta concentração de nitrogênio no substrato.

A umidade do colmo não foi afetada pelas doses de N nem pelo S (Tabela 15). Trivelin; Rodrigues e Victoria (1996) verificaram, por todo o período de crescimento e maturação de soqueira de cana-de-açúcar SP 70-1143, que a umidade da parte aérea de plantas sem adubação nitrogenada foi menor que as das fertilizadas com  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  de N com uréia ou aquamônia. Segundo Silva e Casagrande (1983), o N favorece a absorção de cálcio, elemento fundamental na composição salina do citoplasma e na constituição da parede celular na forma de pectato de cálcio, resultando em maior estruturação das células e favorecendo a absorção de água, podendo afetar negativamente a qualidade tecnológica do produto (SILVA, 1983). Uma possível explicação para os resultados de umidade do colmo não terem sido afetados pelo aumento nas doses de N relaciona-se a elevada imobilização do N-fertilizante pela biomassa microbiana, em

virtude da adição ao solo de resíduos culturais de elevada relação C:N. Resultados semelhantes foram observados por Trivelin et al. (2002b) e Vitti (1998).

### 2.3.7 Utilização pela cana-de-açúcar do $^{15}\text{N}$ -fertilizante e $^{15}\text{N}$ -resíduo cultural

A utilização e a recuperação do  $^{15}\text{N}$ -fertilizante pela cana-de-açúcar não foi influenciada pela adição ou não de enxofre ( $p>0,72$ , resultado de recuperação na planta toda). Dessa forma, para os resultados de aproveitamento do N do fertilizante pela planta, avaliados pela diluição isotópica do  $^{15}\text{N}$ , foram considerados apenas os tratamentos com adição de enxofre, ou seja, T2, T3 e T4 do primeiro experimento.

Na Tabela 16 observa-se que a quantidade de nitrogênio derivado do fertilizante (QNppf), acumulada nas diversas partes da planta aumentou linearmente com as doses de N, resultado da maior utilização do N-fertilizante pela planta.

Tabela 16 – Quantidade de nitrogênio na planta proveniente do  $^{15}\text{N}$ -fertilizante (QNppf, mg vaso<sup>-1</sup>) e acumulado na cana-de-açúcar. Média de 4 repetições

Dose de N	Folha seca	Ponteiro	Colmo	Parte aérea <sup>1</sup>	Parte subterrânea <sup>2</sup>	Planta toda <sup>3</sup>
----- mg vaso <sup>-1</sup> -----						
1200	151,3	53,6	56,8	261,7	75,7	335,7
2400	425,5	130,9	189,6	746,1	182,3	928,3
3600	565,7	195,2	262,6	1023,5	323,9	1347,4
F doses de N	42,3*	61,9*	93,2*	67,3*	28,9*	60,5*
F doses de N-linear	81,7*	123,4*	181,3*	131,5*	57,5*	119,8*
R <sup>2</sup>	0,97	0,99	0,97	0,98	0,99	0,99
F doses de N-quadrático	2,8 <sup>ns</sup>	0,35 <sup>ns</sup>	5,1 <sup>ns</sup>	3,2 <sup>ns</sup>	0,4 <sup>ns</sup>	1,2 <sup>ns</sup>
C.V.(%)	17,0	14,2	12,7	13,9	23,9	15,0

<sup>(1)</sup> Parte aérea = folha seca + ponteiro + colmo;

<sup>(2)</sup> Parte subterrânea = raízes + rizomas;

<sup>(3)</sup> Planta toda = parte aérea + parte subterrânea;

\* e ns = significativo a 1% e não-significativo, respectivamente.

Considerando o acúmulo de nitrogênio na planta entre a maior e a menor dose de N, tem-se que o acúmulo foi 4 vezes maior em todas as partes avaliadas e a quantidade de nitrogênio aplicada apenas 3 vezes maior. Esses resultados demonstram que a cana-de-açúcar, ao mesmo tempo em que respondeu em produção a doses crescentes de nitrogênio (Tabela 15), acumulou mais N-fertilizante.

A distribuição do nitrogênio proveniente do fertilizante nas diversas partes da planta foi em média de 44% nas folhas secas, 22% na parte subterrânea, 19% nos colmos e 15% nos ponteiros (Tabela 16). Resultados semelhantes de distribuição foram observados por Trivelin et al. (2002b) e Vitti (1998).

A maior proporção do N-fertilizante verificada nas folhas secas indica maior absorção inicial do N-fertilizante aplicado no solo nos estádios iniciais de desenvolvimento da cultura, com maior acúmulo nas primeiras folhas emitidas e que foram as primeiras a secar, o que é corroborado por Sampaio; Salcedo e Bettany (1984) que obtiveram praticamente toda a absorção do fertilizante nitrogenado no período inicial de desenvolvimento da cana-de-açúcar (3 meses iniciais de desenvolvimento). Esses resultados demonstram a baixa capacidade da cana-de-açúcar em translocar para outros órgãos da planta, durante a senescência foliar, o N do fertilizante absorvido e assimilado nos primeiros estádios de seu desenvolvimento. Em contrapartida, as baixas porcentagens observadas no ponteiro e colmo, principalmente na menor dose de N, evidenciaram a baixa disponibilidade do N-fertilizante no final do ciclo da cultura, fase de formação desses órgãos. A baixa disponibilidade nesse período é resultante do consumo do N pela planta ou também da imobilização do N no solo (item 2.3.8).

Em relação à representatividade do N absorvido do fertilizante comparado a todo o N absorvido pela cana-planta verifica-se, na Tabela 17, que essa variou de 9,5 a 27,2%, com resposta linear para as doses de N, em todas as partes da planta. Esses resultados são maiores que os observados por Sampaio; Salcedo e Bettany (1984) com cana-planta nas condições de tabuleiro costeiro de Pernambuco, que verificaram ser a contribuição do N-uréia menor que 10% do total do N acumulado na planta toda.

Trivelin et al. (2002b) e Vitti (1998) verificaram valor máximo de 16% de Nppf em cana-planta no Estado de São Paulo. A causa para a ocorrência de maiores valores de porcentagem de acúmulo do N-fertilizante observados nesse experimento deve-se ao tipo de solo utilizado ser extremamente arenoso e, conseqüentemente, com baixos teores de N, fato que maximizou a



utilização e participação do N do fertilizante na composição nutricional final da planta. Vitti (2003) observou efeito semelhante de maior acúmulo do N-fertilizante, em cana-soca, quando da aplicação de 70 e 140 kg ha<sup>-1</sup> de N, com acúmulo na planta toda de 50% e 75%, respectivamente para a menor e maior dose, demonstrando que em solos de baixa fertilidade a cana-de-açúcar obtém resposta imediata à adubação.

A recuperação total média do N-fertilizante foi de 34,7%, com ausência de resposta para o aumento nas doses aplicadas de N-fertilizante, exceção ao colmo que mostrou resposta linear ao aumento das doses de N ( $P < 0,001$  e  $R^2 = 0,59$ ), sem variação para as demais partes da planta (Figura 9).

A recuperação média observada é considerada adequada se considerado os 10 a 40% mencionados na literatura para condições de campo (CARNAÚBA, 1989; CHAPMAN; HAYSON; SAFFIGNA, 1994; SAMPAIO; SALCEDO; BETTANY, 1984; TAKAHASHI, 1967 e 1968; TRIVELIN et al. 1995 e 1996 e VALLIS et al., 1996; WOOD, 1974; YADAV; KUMAR; VERMA, 1990). Entretanto, este valor pode ser considerado baixo se comparado aos 54% observados por Trivelin et al. (2002b) e Vitti (1998) que trabalharam com as mesmas condições de cultivo deste experimento (vasos de 250 kg de terra) e com cana-planta de ano.

Tabela 17 – Porcentagem do nitrogênio acumulado derivado do fertilizante (Nppf, %) nas diversas partes da cana-de-açúcar. Média de 4 repetições

Dose de N	Folha seca	Ponteiro	Colmo	Parte aérea <sup>1</sup>	Parte subterrânea <sup>2</sup>	Planta toda <sup>3</sup>
---- mg vaso <sup>-1</sup> ----	----- % -----					
1200	11,6	7,0	8,5	9,6	9,5	9,5
2400	24,8	16,8	21,2	22,0	20,9	21,8
3600	30,1	22,4	27,3	27,5	26,3	27,2
F doses de N	65,9**	85,6**	102,3**	86,1**	77,8**	90,3**
F doses de N-linear	124,3**	167,2**	196,6**	164,2**	149,1**	172,1**
R <sup>2</sup>	0,94	0,98	0,96	0,95	0,96	0,95
F doses de N-quadrático	7,6*	4,1 <sup>ns</sup>	8,0*	8,1*	6,6*	8,5*
C.V.(%)	10,6	11,0	9,9	10,1	10,3	9,8

<sup>(1)</sup> Parte aérea = folha seca + ponteiro + colmo;

<sup>(2)</sup> Parte subterrânea = raízes + rizomas;

<sup>(3)</sup> Planta toda = parte aérea + parte subterrânea;

\*, \*\* e ns = significativo a 5%, 1% e não-significativo, respectivamente.

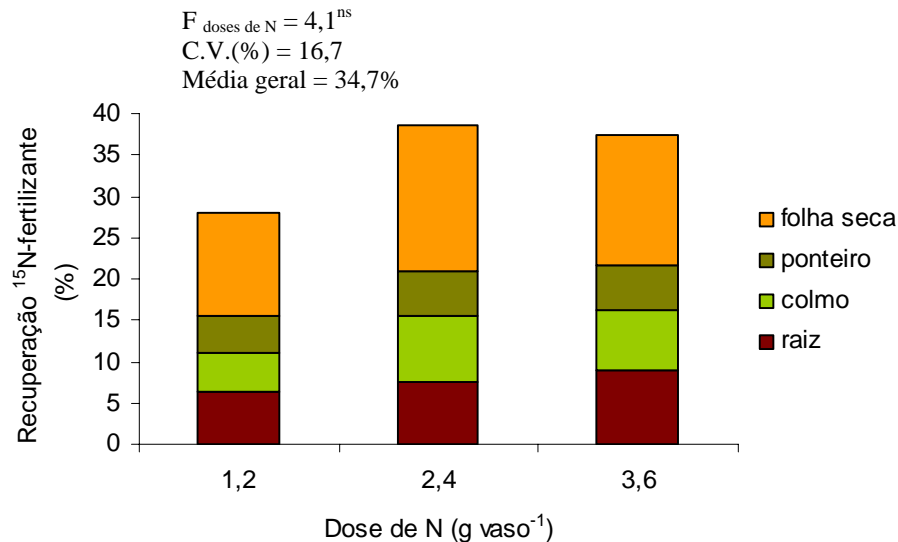


Figura 9 – Recuperação percentual do N-fertilizante aplicado ao solo na cana-de-açúcar (valores de teste F, C.V e média geral referem-se à planta toda)

Avaliando a contribuição do N mineralizado dos resíduos culturais marcado na quantidade acumulada de nitrogênio na planta toda (QNppr, mg vaso<sup>-1</sup>), sem a aplicação de nitrogênio mineral e, também, na ausência de aplicação de S ao solo (T1 e T2 do segundo experimento), é possível verificar a influência da aplicação de enxofre nesse parâmetro.

O tratamento que recebeu 2,1 g vaso<sup>-1</sup> de S (T2) acumulou 69% mais N na planta toda vindo da mineralização dos resíduos (Figura 10). A maior mineralização do nitrogênio dos resíduos culturais e, conseqüente, maior aproveitamento pela cana-de-açúcar evidencia a importância do fornecimento de enxofre ao solo para a otimização da atividade microbiológica de degradação da palhada, uma vez que a intensidade de mineralização da matéria-orgânica adicionada ao solo depende de diversos fatores, entre esses, o suprimento adequado de nutrientes inorgânicos, caso do enxofre (MYERS et al., 1994).

Ao contrário da QNppr, a quantidade de nitrogênio na planta proveniente de outras fontes (QNppo), que não a adicionada pelos resíduos culturais e pelo fertilizante, não foi afetada pela aplicação ou não de enxofre mineral ao solo ( $p > 0,29$ ), evidenciando que o S não influenciou a maior disponibilidade do N nativo do solo, o que era esperado, uma vez considerada a baixa fertilidade inicial do solo e sua textura extremamente arenosa (87% de areia total).

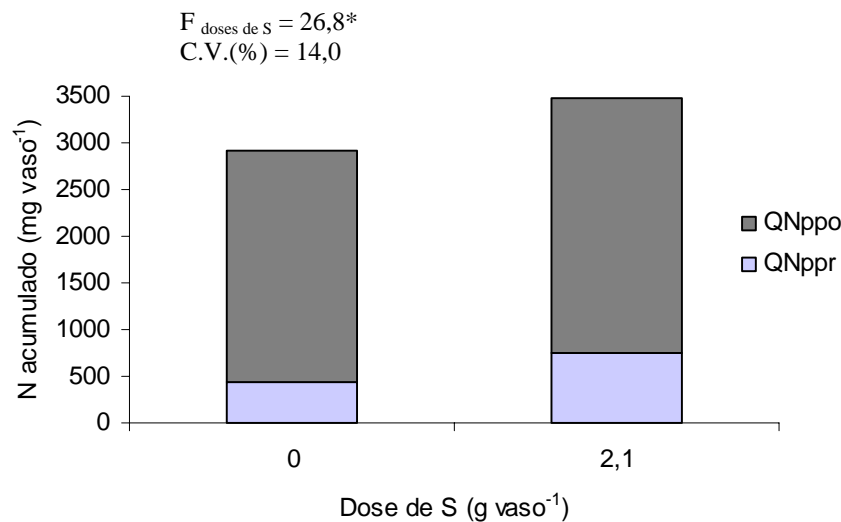


Figura 10 – Nitrogênio acumulado na planta toda (mg vaso<sup>-1</sup>), proveniente da mineralização dos resíduos culturais marcados (QNppr) e de outras fontes (QNppo), em função da aplicação ou não de enxofre. (valores de teste F e C.V. referem-se ao QNppr; \* = significativo a 5%)

Na Tabela 18 observa-se as quantidades de nitrogênio derivado do resíduo cultural incorporado ao solo (QNppr) e acumulado nas diferentes partes da cana-de-açúcar.

O aumento linear do N acumulado nas folhas secas derivado do mineralizado dos resíduos culturais, com o aumento das doses de N, demonstra a ocorrência de maior mineralização com o aumento na adição do N mineral. Esse efeito foi devido, provavelmente, ao estreitamento da relação C:N dos resíduos adicionados. É importante ressaltar que o efeito das doses de N no maior acúmulo do N-resíduo cultural é observado nas folhas secas, primeira parte da planta formada durante o processo de desenvolvimento da planta. Considerando o ponteiro, parte da planta que é fisiologicamente ativa até o final do ciclo da cultura, observa-se que esse acumulou maiores quantidades de N vindas da mineralização dos resíduos quando comparado às folhas secas. Esses resultados indicam que o N mineralizado foi disponibilizado, na sua maior parte, no final do ciclo da cultura, ou seja, o aproveitamento do nitrogênio mineralizado dos resíduos culturais ocorreu no final do ciclo da cana-de-açúcar. Até esse estágio, a planta beneficia-se do aporte de N mineral adicionado ao solo, o qual é especialmente importante para o perfilhamento da cultura.

Tabela 18 - Quantidade de nitrogênio derivado do resíduo cultural  $^{15}\text{N}$  (QNppr, mg vaso $^{-1}$ ) e acumulado na cana-de-açúcar. Média de 4 repetições

Dose de N	Folha seca	Ponteiro	Colmo	Parte aérea <sup>1</sup>	Parte subterrânea <sup>2</sup>	Planta toda <sup>3</sup>
----- mg vaso $^{-1}$ -----						
1200	89,7	243,9	150,3	501,2	82,8	588,2
2400	106,2	197,2	158,4	454,0	89,2	546,7
3600	125,7	187,2	143,9	452,6	131,8	581,8
F doses de N	10,4*	13,9*	0,8 <sup>ns</sup>	3,3 <sup>ns</sup>	8,6*	1,1 <sup>ns</sup>
F doses de N-linear	20,9*	24,3*	0,3 <sup>ns</sup>	5,0 <sup>ns</sup>	14,6*	0,04 <sup>ns</sup>
R <sup>2</sup>	0,99	0,87	-	-	0,85	-
F doses de N-quadrático	0,04 <sup>ns</sup>	3,4 <sup>ns</sup>	1,3 <sup>ns</sup>	1,5 <sup>ns</sup>	2,6 <sup>ns</sup>	2,1 <sup>ns</sup>
C.V.(%)	10,4	7,7	10,5	6,5	17,9	7,5

<sup>(1)</sup> Parte aérea = folha seca + ponteiro + colmo;

<sup>(2)</sup> Parte subterrânea = raízes + rizomas;

<sup>(3)</sup> Planta toda = parte aérea + parte subterrânea;

\* e ns = significativo a 1% e não-significativo, respectivamente.

O efeito linear decrescente de acúmulo de N observado no ponteiro com o aumento das doses de N (Tabela 18), demonstrou que para doses mais baixas de nitrogênio a participação do N da mineralização é mais importante, uma vez que a imobilização do N mineral é proporcionalmente mais intensa. O mecanismo de menor acúmulo de N no ponteiro vindo da mineralização dos resíduos culturais pode ser atribuído à ocorrência de “priming effect” negativo. O termo “priming effect” relaciona-se ao aumento do N derivado da mineralização do N do solo (matéria-orgânica nativa ou incorporada) em plantas que receberam adubação nitrogenada marcada com  $^{15}\text{N}$ . Nesse caso, a diminuição do N derivado do solo no ponteiro resultou em “priming effect”, entretanto de ocorrência negativa.

Considerando a planta toda, o acúmulo do N mineralizado do resíduo cultural não sofreu influência das doses de N, muito provavelmente devido ao efeito de diluição promovido pelas partes: folha seca e ponteiro, que tiveram comportamento antagônico devido suas características desenvolvimento diferenciado com o ciclo da cultura.

A recuperação porcentual média do N-mineralizado dos resíduos culturais incorporados ao solo foi de 14,2%, sem efeito das doses de N na mineralização e aproveitamento final do N mineralizado (Figura 11).

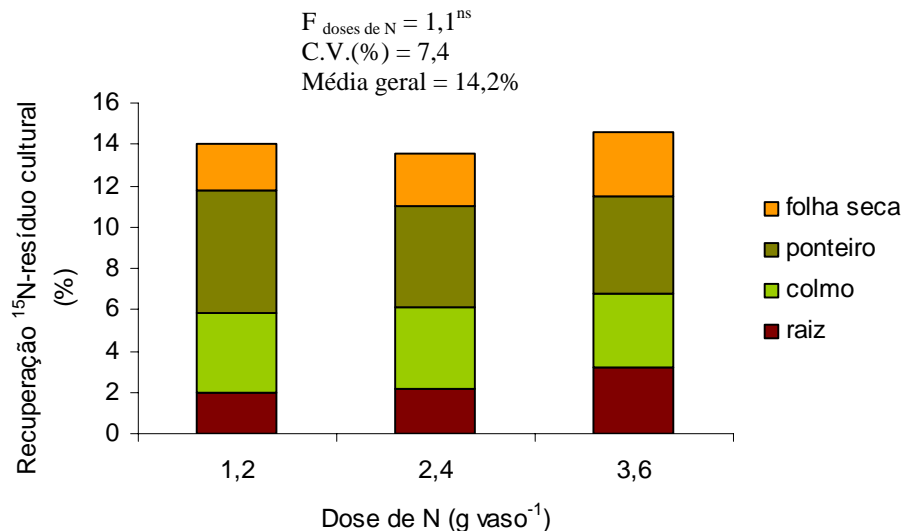


Figura 11 – Recuperação porcentual do N-mineralizado do resíduo cultural incorporado ao solo pela cana-de-açúcar (valores de teste F, de C.V. e média geral referem-se à planta toda)

O valor de recuperação média observado é considerado alto comparado ao verificado em literatura para soqueiras, uma vez não existir resultados de recuperação de N do resíduo cultural incorporado ao solo para condições de cana-planta.

A recuperação média observada para soqueiras, onde o resíduo cultural permanece sobre o solo, é da ordem de 11 a 14% (NG KEE KWONG et al., 1987), 5% (CHAPMAN; HAYSON; SAFFIGNA, 1992) e 4% (GAVA et al., 2005). Nessa experimentação, esperava-se encontrar valores um pouco maiores de recuperação do N mineralizado do resíduo cultural, uma vez que o sistema adotado foi o de simulação de reforma de canavial sem queima, com os resíduos culturais triturados grosseiramente e incorporados superficialmente, juntamente com o calcário, manejo esse que estimulou a maior mineralização e com conseqüente maior aproveitamento desse N pela cana-planta.

Considerando o N acumulado na planta toda proveniente das diferentes fontes (fertilizante, resíduo cultural e outras), em todos os níveis de fertilização nitrogenada, incluindo a ausência na aplicação, observa-se resposta linear positiva, com maior acúmulo de nitrogênio com o aumento das doses de N (Figura 12).

O compartimento que forneceu a maior parte do N acumulado nas plantas foi o denominado de “outros”, o qual inclui o N contido no solo e, possivelmente a fixação biológica de N (URQUIAGA; CRUZ e BODDEY, 1992), ou, ainda, a absorção de amônia da atmosfera pela parte aérea das plantas (HOLTAN-HARTWING; BOCKMAN, 1994). Entretanto, a maior contribuição é atribuída ao nitrogênio presente no solo, que fornece a maior parte do N acumulado nas plantas.

A quantidade de N na planta proveniente de outras fontes (QN<sub>ppo</sub>) não respondeu ao aumento nos níveis da adubação nitrogenada ( $F_{\text{dose de N}} = 1,4^{\text{ns}}$ ; C.V.=11,3%), indicando que a fertilização nitrogenada não influenciou no maior acúmulo de N das outras fontes, principalmente do solo. Resposta de maior acúmulo de N vindo do solo com o aumento das doses e N foi observada por Trivelin et al. (2002b), o qual foi caracterizado como tendo ocorrido um “priming effect”, ou seja, houve aumento do N derivado do solo em plantas que receberam adubação nitrogenada marcada com  $^{15}\text{N}$ , comparativamente àquelas sem fertilização. Nesse trabalho, como os resíduos culturais não foram marcados com  $^{15}\text{N}$ , foi considerado como N derivado do solo o N nativo mais o N de resíduos culturais.

A resposta linear positiva observada na quantidade de nitrogênio na planta proveniente do fertilizante (QNppf), com o aumento das doses de N ( $F_{\text{dose de N linear}} = 119,8^{**}$ ;  $R^2 = 0,99$ ), está indicando que com o aumento no fornecimento do N mineral há maior absorção pelas plantas do N disponibilizado pela fertilização, contribuindo para o maior acúmulo de nitrogênio nas plantas (Figura 12).

A quantidade de nitrogênio na planta proveniente dos resíduos vegetais mineralizados (QNppr) apresentou significância quadrática ( $F_{\text{dose de N quadr.}} = 6,0^{**}$ ;  $R^2 = 0,99$ ), ou seja, na ausência de aplicação de N mineral houve maior acúmulo na planta de N vindo da mineralização. Com o aumento das doses de N há decréscimo da quantidade de N absorvida da mineralização, sendo que no último nível de adubação nitrogenada ( $3,6 \text{ g vaso}^{-1}$  de N), houve tendência da planta de acumular maiores porções de N vindos da mineralização, reflexo do estreitamento da relação C:N do resíduo cultural promovido pela adição de maiores quantidade de N mineral, promovendo incentivo a mineralização dos resíduos incorporados ao solo.

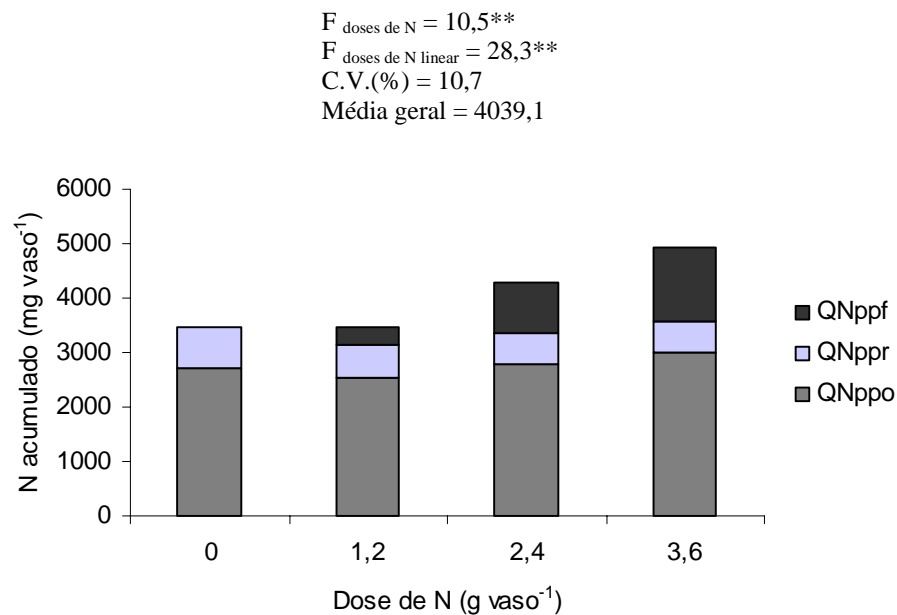


Figura 12 – Nitrogênio acumulado na cana-de-açúcar, derivado do N-fertilizante (QNppf), N-resíduo cultural (QNppr) e de outras fontes (QNppo) (os valores de teste F, de C.V. e média geral referem-se à planta toda;  $^{**}$  = significativo a 1%)

Os resultados de ausência de resposta em acúmulo de N na planta toda vindo dos compartimentos outros (QNppo) e resíduo cultural (QNppr) demonstram a não ocorrência do efeito de “pool substitution”, o qual ocorre quando o  $^{15}\text{N}$  inorgânico ocupa o lugar do N inorgânico não marcado e mineralizado da matéria-orgânica nativa do solo, que seria provavelmente suprimido daquele compartimento por meio da imobilização microbiológica (TRIVELIN et al., 2002b). Tendo em vista esses resultados, conclui-se que com o aumento dos níveis de fertilização nitrogenada, de forma geral, a cana-planta respondeu positivamente em produção de colmos e açúcar (Tabela 15), acumulando maiores quantidades de N, com maior aproveitamento do N mineralizado dos resíduos culturais incorporados ao solo na reforma do canavial.

### **2.3.8 Efeito residual no solo do $^{15}\text{N}$ -fertilizante e $^{15}\text{N}$ -resíduo cultural**

Na Tabela 19 são apresentados os valores de N total no solo, de nitrogênio no solo residual do fertilizante (Nspf), nitrogênio no solo residual do resíduo cultural (Nspr), e as recuperações percentuais do N residual do fertilizante (RF) e do resíduo cultural (RR) após 18 meses da implantação do experimento.

O N total no solo não variou com a fertilização nitrogenada, situando-se na média de 55,5 g vaso<sup>-1</sup> de N. O Nspf teve efeito linear positivo das doses, ou seja, maiores doses de N resultam em maior efeito residual da adubação. Entretanto, a recuperação percentual do fertilizante no solo foi de 34,1%, não havendo efeito da fertilização com N, significando que embora tenha havido maior efeito residual com o aumento das doses, o aproveitamento das fertilizações pelas plantas foi proporcional às doses.

Considerando-se um efeito residual de 34,1% do N aplicado pela fertilização nitrogenada de plantio, quando da aplicação de 50 kg ha<sup>-1</sup> de N, que representa a recomendação oficial para o plantio da cultura no Estado de São Paulo, têm-se 17 kg ha<sup>-1</sup> de N que poderá ser disponibilizado à soca subsequente.

O nitrogênio no solo proveniente do resíduo cultural (Nspr), bem como sua recuperação percentual não teve influência das doses de N (Tabela 19). A recuperação média do resíduo cultural foi de 75%, o que demonstra o alto poder conservativo do N da palhada no sistema, o que se leva a inferir que a fonte de N-palhada possui maior importância para o “pool” de reserva de



N-orgânico no solo em comparação a fonte fertilizante. Esses resultados revelam a contribuição dessa fonte para a manutenção ou aumento da fertilidade do solo em longo prazo.

Resultados semelhantes de elevada recuperação percentual do resíduo cultural foi observado por Gava (1999) e Gava et al. (2005), com média de 81% em soqueira de cana-de-açúcar e resíduo cultural deixado sobre a superfície do solo. Dessa forma, embora os resíduos da cultura apresentem baixo conteúdo nitrogenado quando comparado ao N contido no solo, ao longo do tempo e de sucessivas colheitas sem despalha à fogo, esses resíduos da cultura deixados no solo (incorporados na reforma do canavial ou depositados na superfície com a colheita mecânica) irão contribuir tanto no incremento nos teores de matéria-orgânica do solo, quanto no aumento nos teores de N mineralizável.

Tabela 19 – Nitrogênio total no solo e efeito residual das fontes marcadas,  $^{15}\text{N}$ -fertilizante e  $^{15}\text{N}$ -resíduo cultural. Média de 4 repetições

Dose de N	N total	Nspf <sup>1</sup>	Nspr <sup>2</sup>	RF <sup>3</sup>	RR <sup>4</sup>
----- g vaso <sup>-1</sup> -----	-----	----- mg vaso <sup>-1</sup> -----	-----	----- % -----	-----
0	58,4	-	3286,4	-	81,7
1,2	56,1	477,7	2799,6	39,8	69,6
2,4	53,3	754,1	3070,1	31,1	76,3
3,6	54,3	1116,4	2911,3	31,0	72,4
Média	55,5	782,7	3016,9	34,1	75,0
F doses de N	0,7 <sup>ns</sup>	13,4 <sup>**</sup>	1,8 <sup>ns</sup>	0,9 <sup>ns</sup>	1,9 <sup>ns</sup>
F doses de N linear	-	26,6 <sup>**</sup>	-	-	-
R <sup>2</sup>	-	0,99	-	-	-
C.V.(%)	9,9	22,4	10,3	29,9	10,3

<sup>(1)</sup> Nspf = nitrogênio residual no solo proveniente do fertilizante marcado;

<sup>(2)</sup> Nspr = nitrogênio residual no solo proveniente do resíduo cultural marcado;

<sup>(3)</sup> RF = recuperação percentual do fertilizante no solo;

<sup>(4)</sup> RR = recuperação percentual do resíduo cultural no solo;

\*\* e ns = significativo a 1% e não-significativo, respectivamente.

### 2.3.9 Recuperação total do $^{15}\text{N}$ -fertilizante e $^{15}\text{N}$ -resíduo cultural no sistema solo-cana-de-açúcar

As recuperações porcentuais totais do nitrogênio das fontes (resíduo cultural- RC e fertilizante-FT) no sistema solo-cana-de-açúcar constam da Figura 13.

Para o resíduo cultural verifica-se recuperação média de 90,4% e para o fertilizante 68,8%, independente das quantidades de N adicionadas via fertilização. A quantidade de N-resíduo cultural recuperada no sistema é superior ao fertilizante, pois o sistema considerado é mais conservativo para o elemento em questão, apresentado perdas de N ou valor não contabilizado em média de 9,6% contra 31,2% do fertilizante.

Em experimento desenvolvido por Ng Kee Kwong et al. (1987) foi observada perda de aproximadamente 9% do N aplicado via resíduo cultural marcado. Gava et al. (2005) verificaram perda de apenas 1% do N do resíduo cultural deixado sobre a superfície do solo em cana-soca.

Para o N do fertilizante no sistema solo-planta foi verificado a maior perda (31,2% em média), entretanto menores que a observado por Gava et al. (2005) de 40%, para uma dose de  $100 \text{ kg ha}^{-1}$  de N em cana-soca. A diferença nesses resultados pode ser atribuída à aplicação não-incorporada da fonte nitrogenada na cana-soca.

Considerando a perda de 31,2% do N aplicado via fertilização, para uma adubação nitrogenada de plantio de cerca de  $100 \text{ kg ha}^{-1}$ , têm-se  $31,2 \text{ kg ha}^{-1}$  de N que seria perdido do sistema.

As possíveis causas da perda do elemento incluem a possível ocorrência de volatilização de amônia do solo, que nesse caso considera-se mínima devido ao modo de aplicação do fertilizante incorporado a uma profundidade de 25 cm. Outra via de saída de N está ligada a perdas por desnitrificação do  $\text{NO}_3^-$  derivado das fontes nitrogenadas, o que pode ter ocorrido, principalmente, no primeiro mês após a adubação e plantio (junho) com a ocorrência de elevada precipitação que manteve o solo saturado de água, e também à incorporação dos restos culturais ao solo e o consumo de  $\text{O}_2$  pelos microrganismos mineralizadores (quimiorganotrófico anaeróbio facultativo), o que possivelmente proporcionou condições de anaerobiose. Estimativas de perdas de N por desnitrificação em culturas como cana-de-açúcar fertilizada com N e irrigada, pastagem e florestas tropicais são de 0,3 a  $18,4 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{N-N}_2\text{O}$ , com aumento exponencial devido ao preenchimento do espaço poroso do solo pela água (DOBBIE; McTAGGART; SMITH, 1999).

Por último, a perda atribuída à volatilização de amônia pela parte aérea das plantas devido à corrente transpiratória e também à senescência foliar. Trivelin et al. (2002a) estimaram que as perdas de N por essa via, na cana-soca, representam cerca de 90 kg ha<sup>-1</sup> de N em um ciclo, para um acúmulo de 200 kg ha<sup>-1</sup> de N na parte aérea com 20% desse total vindo da uréia. Estima-se que para a cana-planta essas perdas sejam um pouco menores, devido ao menor ponto de compensação de amônia para absorção/emissão, ou seja, na cana-planta o ponto de compensação de amônia parece ser inferior à concentração de NH<sub>3</sub> na atmosfera, o que favoreceria mais a absorção do que a perda de N foliar (TRIVELIN et al., 2002a).

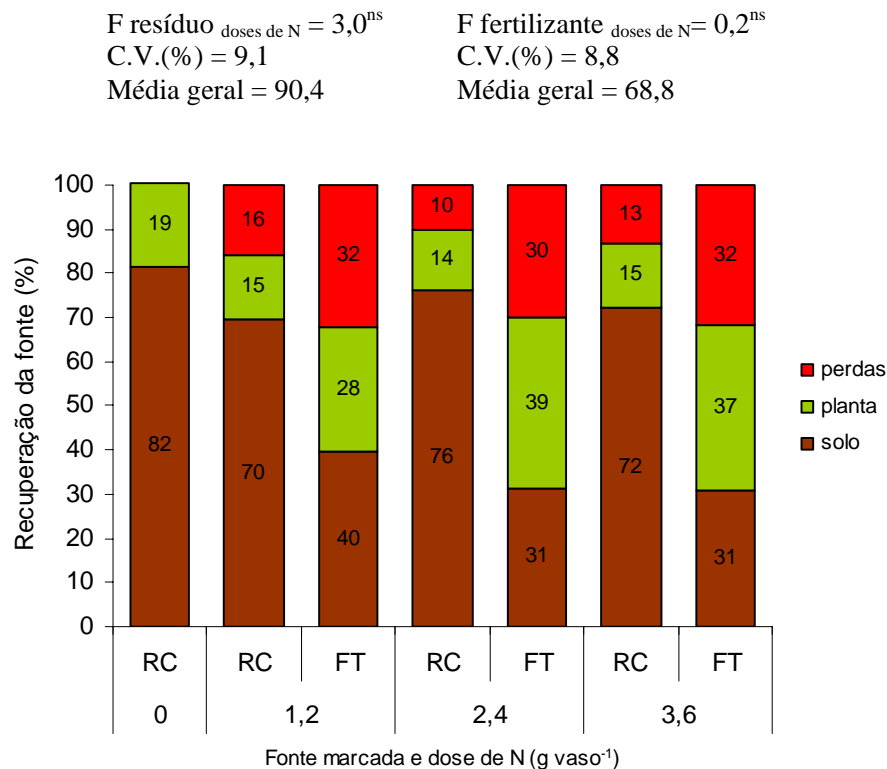


Figura 13 – Recuperação porcentual das fontes marcadas resíduo cultural e fertilizante no sistema solo-cana-de-açúcar (RC = resíduo cultural e FT = fertilizante)

A recuperação média total do  $^{15}\text{N}$ -fertilizante observada para o sistema solo-cana-planta de 68,8%, é menor se comparada aos valores obtidos por Oliveira (1999), 88% nas mesmas condições de cultivo em vasos plásticos com aproximadamente 250 kg de terra. A diferença observada na recuperação entre os dois experimentos com cana-planta pode ser devido ao tempo de cultivo. Nesta experimentação (tempo de cultivo de 1 ano e meio), proporcionou maiores perdas de N do sistema, incluindo as perdas gasosas de N pela parte aérea das plantas.

### 2.3.10 Utilização pela cana-de-açúcar do $^{34}\text{S}$ -fertilizante

A quantidade de enxofre proveniente do fertilizante marcado em  $^{34}\text{S}$  e acumulado nas diferentes partes da cana-de-açúcar constam na Tabela 20.

Tabela 20 – Quantidade de enxofre na planta proveniente do fertilizante- $^{34}\text{S}$  (QSppf, mg vaso $^{-1}$ ) em função das doses de nitrogênio e da aplicação de 2100 mg vaso $^{-1}$  de S em todos os tratamentos. Média de 4 repetições

Dose de N	Folha seca	Ponteiro	Colmo	Parte aérea <sup>1</sup>	Parte subterrânea <sup>2</sup>	Planta toda <sup>3</sup>
----- mg vaso $^{-1}$ -----						
0	126,3	36,8	184,7	347,8	85,0	432,8
1200	148,4	38,7	229,7	417,2	118,9	534,9
2400	156,4	43,1	285,5	485,0	84,9	569,9
3600	179,0	47,7	335,5	562,1	113,6	675,8
F doses de N	2,4 <sup>ns</sup>	3,0 <sup>*</sup>	6,9 <sup>***</sup>	8,9 <sup>***</sup>	1,6 <sup>ns</sup>	8,1 <sup>***</sup>
F doses de N-linear	-	8,7 <sup>**</sup>	20,6 <sup>***</sup>	26,7 <sup>***</sup>	-	23,5 <sup>***</sup>
R <sup>2</sup>	-	0,97	0,99	0,99	-	0,97
C.V.(%)	18,4	13,60	19,3	13,6	28,5	12,7

<sup>(1)</sup> Parte aérea = folha seca + ponteiro + colmo;

<sup>(2)</sup> Parte subterrânea = raízes + rizomas;

<sup>(3)</sup> Planta toda = parte aérea + parte subterrânea;

\*, \*\*, \*\*\* e ns = significativo a 10%, 5%, 1% e não-significativo, respectivamente.

Houve efeito linear positivo no acúmulo de enxofre no ponteiro, colmo, parte aérea e planta toda, como resultado de maior absorção e aproveitamento do S aplicado pelo fertilizante com o aumento das doses de N (Tabela 20).

A falta de resposta da adubação nitrogenada no acúmulo de S verificada na parte folha seca, primeira parte da planta a formar-se, pode se atribuído ao fato de que o estímulo da absorção do S provocado pelo N se dá mais eficientemente ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura, o que é justificado pelo maior acúmulo de S nos ponteiros, parte ativa metabolicamente até o final do ciclo.

Na parte subterrânea a ausência de resposta do acúmulo de S do fertilizante às doses de N indicaram ter ocorrido efeito fisiológico de redirecionamento das reservas para o sistema radicular, como garantia de rebrotas futuras, com reflexo na diluição do efeito das doses de N no acúmulo do S do fertilizante, conforme descrito no item 2.3.5.

Do total do enxofre derivado do fertilizante e acumulado na planta toda, 46% foram encontrados nos colmos, 28% nas folhas secas, 18% na parte subterrânea e 8% nos ponteiros. Esses resultados indicaram a elevada exportação de S pela colheita e, também, a importância da manutenção dos resíduos culturais no agrossistema. Com despalha a fogo na colheita, 74% de todo o enxofre absorvido do fertilizante seria perdido do sistema logo no primeiro corte da cultura. Dessa forma, considerado o alto potencial de lixiviação do S e o manejo do nutriente, que na maioria das vezes é aplicado por meio da gessagem na reforma do canavial, pode-se inferir que em safras subseqüentes haveria exaustão de S no solo, com possibilidade de ocorrência de deficiência na cana-de-açúcar.

No que se refere à porcentagem do enxofre acumulado na planta e derivado do fertilizante, observa-se aumento no acúmulo em função das doses de N no colmo, parte aérea e planta toda (Tabela 21).

No colmo, comparativamente a menor dose de N, a maior dose de N acumulou 11% mais enxofre derivado do fertilizante, com aumento no acúmulo de 6% na parte aérea e 5% na planta toda, evidenciando aumento da participação do enxofre derivado do fertilizante no acúmulo total de S pela planta, em função do aumento nas doses de N.

De forma geral, 25,6% de todo o S da planta foi fornecido pelo fertilizante, o que representa baixa utilização da fonte de enxofre na composição geral da planta. A maior média de

participação do S do fertilizante foi observada nos colmos, com cerca de 30%, o que representa a maior importância do S na formação dessa parte (Tabela 21).

Comparando-se o S-fertilizante na composição da planta toda (25,7%) com os resultados de Teixeira (2004), para plantas de milho e soja em solo argiloso e arenoso, respectivamente de 35, 46 e 37 e 39%, tem-se que para as condições em que foi desenvolvida esta experimentação, o S do fertilizante contribuiu menos no acúmulo final de S. Os resultados de maior aproveitamento do S do fertilizante observados por Teixeira (2004) podem ser atribuídos à característica de cultivo em vasos com 7 kg de terra, fechados e sem sistema de drenagem. Comparados aos vasos com aproximadamente 250 kg de terra e, principalmente, com drenagem e coleta da solução percolada, resultou em elevadas perdas de S do fertilizante, justificando os menores valores de S-fertilizante encontrados na cana-de-açúcar.

Tabela 21 - Porcentagem do enxofre acumulado derivado do fertilizante (S<sub>pf</sub>, %) nas diversas partes da cana-de-açúcar. Média de 4 repetições

Dose de N	Folha seca	Ponteiro	Colmo	Parte aérea <sup>1</sup>	Parte subterrânea <sup>2</sup>	Planta toda <sup>3</sup>
----- mg vaso <sup>-1</sup> -----	----- %-----					
0	25,3	17,0	23,5	23,2	20,6	22,9
1200	24,4	20,4	30,8	27,0	24,7	26,0
2400	21,2	20,0	32,7	26,4	22,3	25,7
3600	24,5	22,6	34,3	29,3	23,4	28,2
Média	23,8	20,0	30,3	26,5	22,7	25,7
F doses de N	2,4 <sup>ns</sup>	2,5 <sup>ns</sup>	8,9 <sup>***</sup>	7,6 <sup>***</sup>	1,2 <sup>ns</sup>	6,5 <sup>***</sup>
F doses de N-linear	-	-	23,0 <sup>***</sup>	18,8 <sup>***</sup>	-	16,6 <sup>***</sup>
R <sup>2</sup>	-	-	0,87	0,82	-	0,85
C.V.(%)	9,7	14,50	10,5	6,9	13,9	6,5

<sup>(1)</sup> Parte aérea = folha seca + ponteiro + colmo;

<sup>(2)</sup> Parte subterrânea = raízes + rizomas;

<sup>(3)</sup> Planta toda = parte aérea + parte subterrânea;

\*\*\* e ns = significativo a 1% e não-significativo, respectivamente.

A recuperação porcentual total do fertilizante  $^{34}\text{S}$  pela cana-de-açúcar aumentou linearmente com o aumento das doses de N aplicadas, com correlação de 0,97 entre a variável e as doses de N (Figura 14).

A recuperação média na planta toda do  $^{15}\text{N}$ -fertilizante de 34,7% (Figura 9) foi maior que a máxima recuperação média do  $^{34}\text{S}$ -fertilizante de 32,2%, o que é justificado pela elevada lixiviação do elemento, aliado à característica de maior imobilização pela microbiota do solo.

De maneira geral, pode-se destacar que o aumento nas doses de N resultou no maior aproveitamento do S do fertilizante, o que é caracterizado tanto pelos maiores valores de recuperação total observados na planta toda (Figura 14), como pela menor lixiviação do S do fertilizante (Tabela 9).

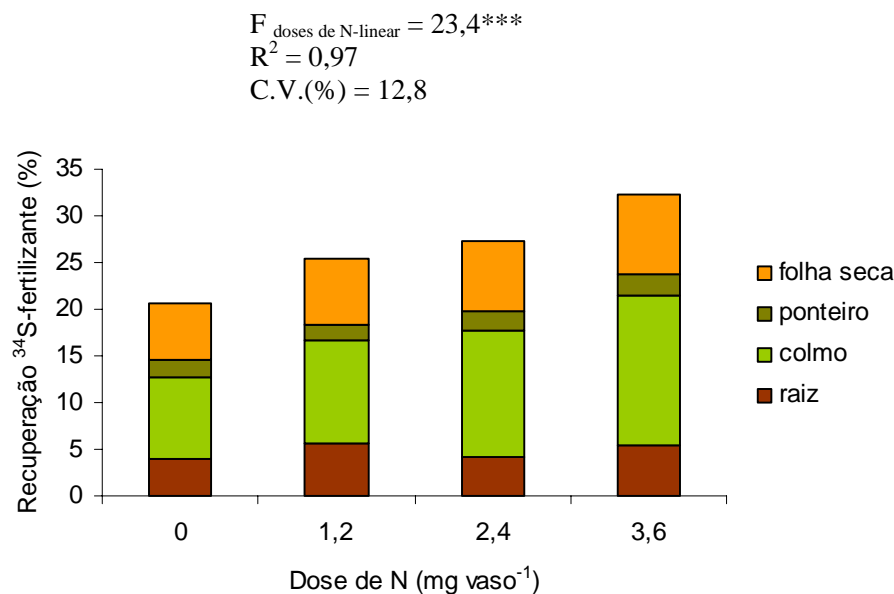


Figura 14 - Recuperação porcentual do S-fertilizante aplicado ao solo na cana-de-açúcar (valores de teste F e de C.V. referem-se à planta toda; \*\*\* = significativo a 1%)

### 2.3.11 Efeito residual no solo do $^{34}\text{S}$ -fertilizante

O S residual no solo da aplicação de  $2100 \text{ mg vaso}^{-1}$  do nutriente e relacionado às doses de N foi avaliado pela porcentagem do enxofre no solo proveniente do fertilizante (Sspf) e S total no solo (ST), ambos em  $\text{mg vaso}^{-1}$ , em duas profundidades (0-40 cm e 40-80 cm), e consta da Figura 15.

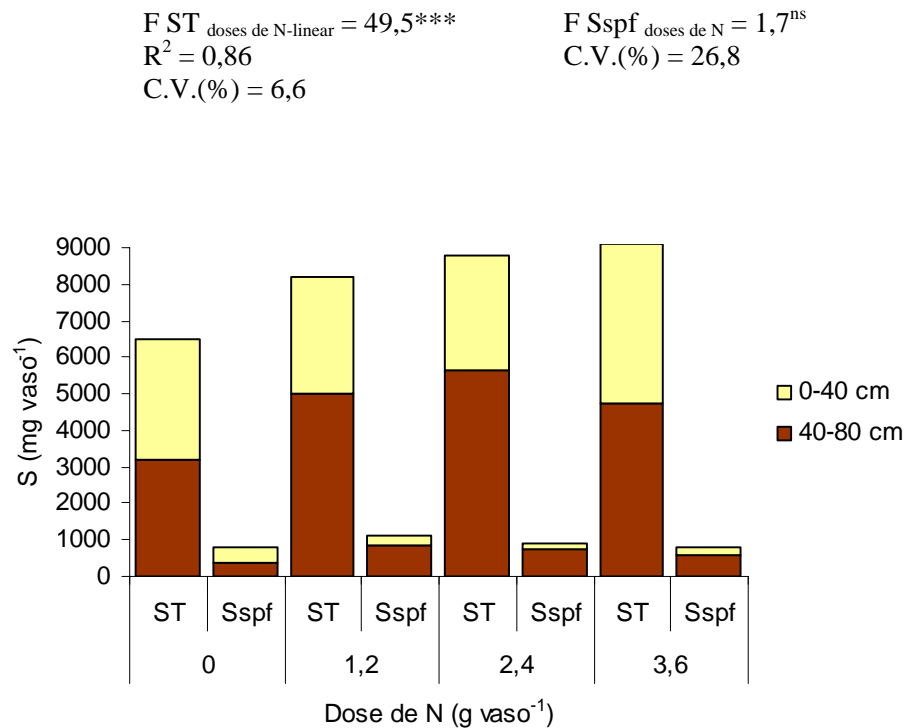


Figura 15 – Enxofre total no solo (ST) e enxofre no solo proveniente do fertilizante (Sspf), em  $\text{mg vaso}^{-1}$ , nas profundidades de 0-40 e 40-80 cm e em função das doses de nitrogênio (os valores de teste F do ST e Sspf referem-se ao solo total com somatória das duas profundidades; \*\*\* e ns = significativo a 1% e não-significativo, respectivamente)



Na Figura 15 verifica-se que a maior parte do S do solo, tanto o total (ST) quanto o proveniente do fertilizante (S<sub>spf</sub>), encontra-se a profundidade de 40-80 cm, o que caracteriza o caminhamento do S aplicado na camada de 0-25 cm para maiores profundidades, levando a perda do elemento por lixiviação.

O ST do solo foi influenciado linearmente pelas doses de N, diferentemente para o S<sub>spf</sub>, que não sofreu influência das doses, o que pode ser atribuído ao maior potencial de perda do S-mineral por lixiviação em relação ao S nativo do solo ou mineralizável dos resíduos culturais incorporados ao solo. Outra possível causa para o efeito das doses de N no aumento do ST no solo pode ser devido ao fato de a cana-de-açúcar, nesses tratamentos, ter absorvido maiores quantidades de S, com reflexo direto na menor lixiviação de S e maior acúmulo de S na parte subterrânea (Tabela 13). Nesse caso, o aumento no ST poderá estar refletindo a maior quantidade de S-orgânico residual que permaneceu no solo vindo dos resíduos das raízes.

A recuperação média do S-fertilizante no solo foi de 43%, sem efeito das doses de N ( $p > 0,23$ ), ou seja, dos 2100 g vaso<sup>-1</sup> de S aplicados no solo no momento do plantio, em média 903 g permaneceram no solo no final do período da experimentação, o que representaria proporcionalmente a aplicação de 70 kg ha<sup>-1</sup> de S, um efeito residual de 30 kg ha<sup>-1</sup> de S. Este valor está aquém da exigência da rebrota subsequente para a produção de 100 toneladas por hectare, que segundo Malavolta (1994) situa-se entre 40 e 50 kg ha<sup>-1</sup>.

### **2.3.12 Recuperação total do <sup>34</sup>S-fertilizante no sistema solo-cana-de-açúcar**

A recuperação total do enxofre aplicado via fertilização, nos compartimentos planta, residual no solo e lixiviado tiveram influência das doses de N. De forma geral, a adubação nitrogenada atuou no sentido de manter o S no sistema solo-cana-de-açúcar (Figura 16), ou seja, o aumento no suprimento de N proporcionou maior extração de S pela cultura o que pode ser chamado de efeito sinérgico, com conseqüentemente, maior acúmulo de S no sistema solo-cana-de-açúcar.

A redução linear na recuperação do S-fertilizante no sistema solo-cana-de-açúcar da menor para a maior dose de N (1,2 a 3,6 mg vaso<sup>-1</sup> de N respectivamente) deveu-se tanto à menor lixiviação de S como à maior recuperação do elemento pela cana-de-açúcar (Figura 16).

Com a maior recuperação pela planta e menor lixiviação e recuperação total de S, pode-se inferir que ocorreu perda do nutriente pela parte aérea da cana-de-açúcar para a atmosfera. Segundo Marschner (1995) plantas crescendo em ambientes com atmosfera não poluída com  $\text{SO}_2$  e com suprimento de S no solo na forma de sulfato, liberam quantidades apreciáveis de compostos voláteis de S pelos estômatos, sendo o principal o  $\text{SO}_2$  e essa emissão aumenta com o conteúdo de sulfato no solo.

A média geral de recuperação do isótopo de enxofre no sistema solo-cana-de-açúcar, em todos os tratamentos com nitrogênio, situou-se por volta de  $107 \pm 8$  (média  $\pm$  desvio padrão da média). Esse resultado demonstrou a ocorrência de elevada recuperação no sistema solo-cana-de-açúcar do enxofre aplicado à cultura. Ademais, as metodologias de determinação de S-total e de abundância  $^{34}\text{S}$ , tanto nas amostras de solo, como nas de material vegetal e solução lixiviada no solo foram consideradas adequadas para a realização do balanço final do nutriente na cultura da cana-de-açúcar.

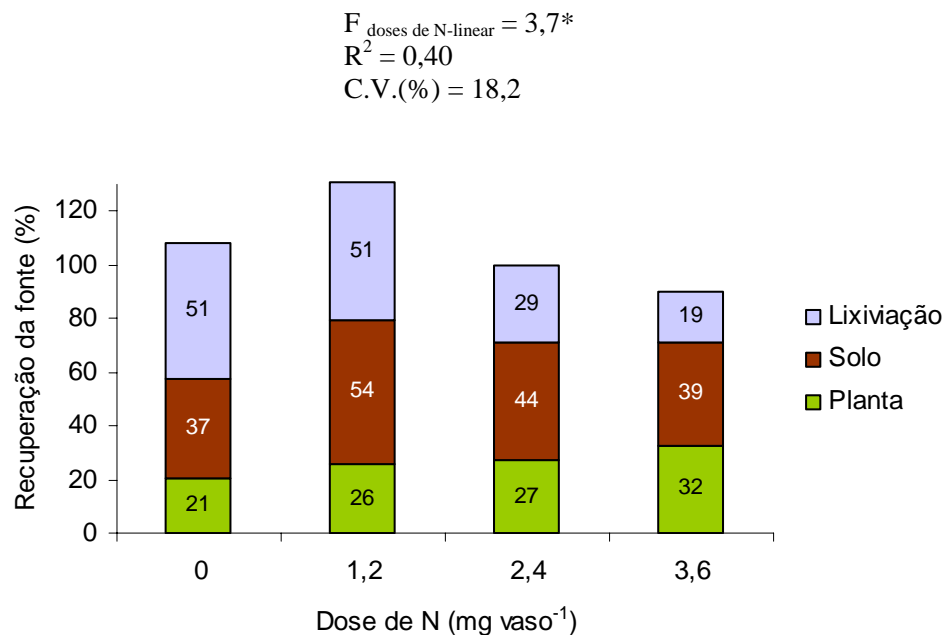


Figura 16 – Recuperação total da fonte  $^{34}\text{S}$ -fertilizante no sistema solo-cana-de-açúcar-solução lixiviada (o valor de teste F refere-se a recuperação total no sistema; \* = significativo a 10%)

Estudos realizados por Teixeira (2004) com balanço do isótopo de enxofre ( $^{34}\text{S}$ ) no sistema solo-milho e solo-soja, verificou-se recuperação total de 70 e 64% para o sistema solo-milho em solo de textura arenosa e argilosa respectivamente, e 88 e 54% para o sistema solo-soja e mesmas condições de solo anterior.

Os baixos valores de recuperação observados em alguns casos foram justificados como tendo ocorrido possíveis transformações do fertilizante aplicado no solo e que levaram a recuperação ou não do S-fertilizante no sistema solo-planta, tais como: imobilização pela biomassa microbiana do solo do S-fertilizante, indisponibilizando sua absorção pelas plantas; ocorrência de possíveis perdas gasosas de enxofre entre as diversas rotas metabólicas no sistema solo-planta, dentre essas reações bioquímicas influenciadas pela atividade microbiana no solo ou por condições de anaerobiose e, por último, perdas gasosas de S ( $\text{SO}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$ ) entre a interface atmosfera e câmara estomática. Outro fator apontado pelo autor para a possível subestimativa na recuperação do isótopo foi atribuído à interferências no método de conversão química das diversas formas de S do solo a S-sulfato previamente a determinação de abundância de  $^{34}\text{S}$ , uma vez que se descartou a possibilidade de interferências na metodologia de determinação de S-total e isotópicas de  $^{34}\text{S}$  em amostras vegetais.

## **2.4 Considerações finais**

Os resultados deste trabalho mostraram que a preocupação com a lixiviação de nitrogênio no sistema solo-cana-planta, mesmo em solos extremamente arenosos, é inconsistente. A reação de predomínio para o nutriente (N) aplicado no plantio e no sistema de colheita sem despalha a fogo é o da elevada imobilização, devido, principalmente, à alta relação C:N dos resíduos culturais incorporados ao solo no plantio ou deixados sobre o solo nas socas e que tornam o sistema conservativo para o nitrogênio. Outro aspecto relevante é a resposta em produtividade de colmos e açúcar observada com o aumento das doses de N, pois no meio agrícola canavieiro têm-se como regra que a cana-planta não responde em aumento de produtividade a aplicação nitrogenada de plantio. Nas condições que foram desenvolvidos este trabalho, a cana-planta além de responder em produtividade logo na primeira dose aplicada (média de 15% para uma aplicação correspondente a  $40 \text{ kg ha}^{-1}$  de N), acumulou mais matéria-seca, N e S.

No manejo do enxofre, a elevada lixiviação do sulfato faz com que haja necessidade de se repensar sua forma de fornecimento à cultura. Nesse sentido poderão ser adotadas estratégias de aplicação de fontes de S em épocas de maior desenvolvimento radicular e vegetativo e/ou em períodos de menor precipitação, evitando-se aplicação única na forma de gesso agrícola e por ocasião da reforma do canavial.

De forma geral, a aplicação de N e S no plantio da cana-de-açúcar deve considerar os aspectos de elevada imobilização de N e lixiviação de S, dando-se preferência à aplicação conjunta dos elementos na forma de sulfato de amônio. Entretanto, quando a dose de N ultrapassar valores de 100 kg ha<sup>-1</sup> fazer uso conjunto de outra fonte nitrogenada, incluindo o nitrato de amônio, ou mesmo a uréia se incorporada, a fim de se evitar a aplicação excessiva de S que poderá ser perdido do sistema por lixiviação.

Outro aspecto observado foi a ocorrência de sinergismo entre o N e S, no qual o aumento das doses de N proporcionou maior extração e acúmulo de S na cana-de-açúcar, incluindo efeito na redução da quantidade de enxofre lixiviada. A possibilidade de ocorrência de efeito sinérgico entre os elementos, com aumento de produtividade é um ponto que não deve ser desconsiderado, desde que não haja restrição nutricional, como ocorreu para o N neste experimento. Dessa forma, o estudo do efeito sinérgico entre o N e o S deverá ser abordado por pesquisas subseqüentes, evitando-se a ocorrência de fatores restritivos.

Outro fator esclarecido por essa pesquisa diz respeito à quantificação da recuperação porcentual do N mineralizado dos resíduos culturais incorporados ao solo, que se situou na média de 14%. Comparando-se aos valores encontrados na literatura para o aproveitamento do N do resíduo cultural em condições de soqueira, de 4 a 14%, a recuperação verificada nas condições deste experimento foram razoavelmente baixas. Têm-se o conceito de que em condições de incorporação dos resíduos culturais na superfície do solo, o aproveitamento desse aporte de N pela cana-de-açúcar seria maior no primeiro ano de cultivo. A relativa baixa contribuição do N dos resíduos culturais na cana-planta dá indícios de que o aproveitamento desse pool de N se dá a médio e longo prazo, o que poderá ser avaliado por pesquisas futuras e com avaliações em anos subseqüentes aos da incorporação do resíduo.

Por último, deve-se considerar que o balanço final do N (fertilizante e resíduo cultural) e S (fertilizante) no sistema solo-cana-de-açúcar resultou perdas não contabilizadas dos elementos. Para o N foram perdidos 31,2 e 9,6% das fontes N-fertilizante e N-resíduo cultural,

respectivamente. Para o S a máxima perda observada foi correspondente a 10% de todo o S aplicado via fertilização. De forma geral, as perdas não contabilizadas de N foram atribuídas à volatilização de amônia do solo e a parte aérea e a desnitrificação do nitrato do fertilizante, e para o S a perdas por volatilização de  $\text{SO}_2$  pela parte aérea das plantas. Tendo-se em vista esses aspectos, se faz necessário lançar mão de mecanismos de controle das perdas dos elementos do agroecossistema, que fazem com haja aumento no custo de produção, garantindo, assim, a sustentabilidade dos elementos no sistema solo-cana-de-açúcar.

### 3 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no trabalho permitem concluir:

1. A cana-planta respondeu em produtividade às doses crescentes de N, sem resposta à aplicação de S;
2. O aumento na extração de N, proporcionado pelo aumento das doses de N-fertilizante resultou em sinergismo na extração de S pela cultura;
3. Em condições de limitação da nutrição nitrogenada da cana-planta, a fertilização com S associada à de N não resultou em efeito sinérgico na produtividade da cultura;
4. O aumento nas doses de N proporcionou diminuição na lixiviação de S, tanto do mineral adicionado pela fertilização e do nativo do solo e/ou incorporado pelo resíduo cultural;
5. A recuperação (%) de N-fertilizante pela cana-planta foi de em média 35%;
6. A recuperação (%) do N-resíduo cultural incorporado ao solo pela cana-planta, média de 14%, não foi influenciado pelas doses de N;
7. O efeito residual no solo das fontes N-fertilizante e N-resíduo cultural foi em média 34 e 75% do aplicado inicialmente;
8. As perdas de N do sistema foram de 10 e 31% para as fontes N-resíduo cultural e N-fertilizante, e que se atribuiu a possíveis perdas de amônia por volatilização do solo e da parte aérea e a desnitrificação;
9. O aproveitamento do S-fertilizante pela cana-planta foi de em média 32%;
10. O S-fertilizante residual no solo correspondeu a 43% do total aplicado;
11. As perdas não contabilizadas de S do sistema atingiram valores máximos de 10% do total aplicado, e foram atribuídas a possíveis volatilizações de  $\text{SO}_2$  pela parte aérea da cana-de-açúcar.

## REFERÊNCIAS

- ABRAMO FILHO, J.; MATSUOKA, S.; SPERANDIO, M.L.; RODRIGUES, R.C.D.; MARCHETTI, L.L. Resíduo da colheita mecanizada de cana crua. **Álcool & Açúcar**, São Paulo, n.67, p.23-25, 1993.
- AGÊNCIA DE NOTÍCIAS ÁRABE-BRASIL. **Notícias da Câmara de Comércio Árabe-brasileira**. Disponível em: <<http://www.anba.com.br/noticia.php?id=9724>>. Acesso em: 12 jun. 2006.
- ARMBRUSTER, D.G. Benefícios do uso de enxofre na cultura de cana-de-açúcar. **Álcool & Açúcar**, São Paulo, v.6, n.27. p.54-58, 1986.
- ARORA, B.R.; HUNDAL, H.S.; SEKHON, G.S. Utilization of fertilizer sulphur by oat (*Avena sativa* L.) in different soils of Ludhiana. **Journal of Nuclear Agriculture and Biology**, New Delhi, v. 19, p.92-96, 1990.
- AWONAIKE, K.O.; DANSO, S.K.A.; ZAPATA, F. The use of a double ( $^{15}\text{N}$  and  $^{34}\text{S}$ ) labeling technique to assess the suitability of various reference crops for estimating nitrogen fixation in *Gliricidia septum* and *Leucaena leucocephala*. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.155/156, p.325-333, 1993.
- AZEREDO, D.F.; BOLSANELLO, J.; WEBWE, H.; VIEIRA, J.R. Nitrogênio em cana-planta – doses e fracionamento. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.4, p.25-29, 1986.
- BARRIE, A.; PROSSER, S.J. Automated analysis of light-element stable isotopes by isotope ratio mass spectrometry. In: BOUTTON, T.W.; YAMASAKI, S. (Ed.). **Mass spectrometry of soils**. New York: Marcel Dekker, 1996. cap. 1, p.1-6.
- BARROW, N.J. A comparison of the mineralization of nitrogen and of sulfur from decomposing organic materials. **Australian Journal of Agricultural Research**, Melbourne, v.11, n.6, p.960-969, 1960.
- BASANTA, M del V. **Dinâmica do nitrogênio na cultura de cana-de-açúcar em diferentes sistemas de manejo de resíduos da colheita**. 2004. 82p. Tese (Doutorado em Agricultura) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

BATISTA, K. **Respostas do capim-Marandú a combinações de doses de nitrogênio e enxofre**. 2002. 91p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

BENDASSOLLI, J.A.; TRIVELIN, P.C.O.; CARNEIRO JUNIOR, F.C. Stable sulfur isotope fractionation by anion exchange chromatography production of compounds enriched in  $^{34}\text{S}$ . **Journal of Brazilian Chemical Society**, São Paulo, v.8, n.1, p.13-17, 1997.

BITTENCOURT, V.C.; FAGANELLO, B.F.; SALATA, J.C. Eficiência da adubação nitrogenada em cana-de-açúcar (planta). **STAB- Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.5, n.1, p.26-33, 1986.

BLACK, A.L. N and P fertilization for production of crested wheatgrass and native grass in northeastern Montana. **Agronomic Journal**, Madison, v.60, p.213-216, 1968.

BOLOGNA, I.R.; TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C.; FARONI, C.E.; FRANCO, H.C.J. Lixiviação de enxofre em solo arenoso cultivado com cana-de-açúcar. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DA ÁGUA E DO SOLO, 16., 2006, Aracajú. **Resumos...**Aracajú: UFS,SBCS, p.45-46, 2006.

BONFIN-SILVA, E.M. **Nitrogênio e enxofre na recuperação de pastagem de capim-Braquiária em degradação em Neossolo Quartzarênico com expressiva matéria-orgânica**. 2005. 123p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

BORTOLETTO JÚNIOR, M.J. **Características hidrogeoquímicas e processos erosivos mecânicos e químicos nas bacias de drenagem dos rios Tietê e Piracicaba**. 2004. 202p. Tese (Doutorado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

CAMARGO, P.B. **Dinâmica do nitrogênio dos fertilizantes uréia ( $^{15}\text{N}$ ) e aquamônia ( $^{15}\text{N}$ ) incorporados ao solo na cultura de cana-de-açúcar**. 1989. 104p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1989.

CANTARELLA, H.; RAIJ, B van. Adubação nitrogenada no Estado de São Paulo. In: SIMPÓSIO SOBRE ADUBAÇÃO NITROGENADA NO BRASIL; REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO, 16., 1984, Ilhéus. Ilhéus: CEPLAC, SBCS, 1986. p.47-79.



CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P.C.O. Determinação de nitrogênio inorgânico em solo pelo método da destilação a vapor. In: RAIJ, B van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. (Ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Fundação IAC, 2001. cap.10, p.270-276.

CARNAÚBA, B.A.A. **Eficiência de utilização e efeito residual de uréia-<sup>15</sup>N em cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*), em condições de campo**. 1989. 193p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1989.

CARNEIRO JÚNIOR, F. **Preparo de amostras vegetais para análise isotópica de <sup>34</sup>S por espectrometria de massas**. 1998. 46p. Tese (Doutorado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

CARNEIRO, A.E.V.; TRIVELIN, P.C.O.; VICTORIA, R.L. Utilização da reserva orgânica e do nitrogênio do tolete de plantio (colmo-semente) no desenvolvimento da cana-planta. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.53, n.2, p.199-209, 1995.

CASAGRANDE, A.A. **Tópicos de morfologia e fisiologia da cana-de-açúcar**. Jaboticabal: FUNEP, 1991. 157p.

CASSMAN, K.G.; MUNNS, D.N. Nitrogen mineralization as affected by soil moisture, temperature and depth. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.44, n.6, p.1233-1237, 1980.

CHAPMAN, L.M.; HAYSON, M.B.C.; SAFFIGNA, P.G. Nitrogen cycling in cane fields from <sup>15</sup>N labeled trash and residual fertilizer. In: AUSTRALIAN SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS; 14., 1992, Brisbane. **Proceedings...** Brisbane: Watson Ferguson, 1992. p.84-89.

CHAPMAN, L.M.; HAYSON, M.B.C.; SAFFIGNA, P.G. The recovery of <sup>15</sup>N from labeled urea fertilizer in crop components of sugarcane and soil profiles. **Australian Journal of Agricultural Research**, Melbourne, v.45, p.1577-1585, 1994.

CHOUDHARY, C.N.; SINHA, U.P. Dry-matter production, sugar yield and nitrogen-sulphur recovery by sugarcane (*Saccharum officinarum*) as influenced by concentrated organic manure, nitrogen and sulphur fertilization. **Indian Journal of Agricultural Science**, Delhi, v.71, n.1, p.31-34, 2001. Abstract.

COELHO, A.M.; FRANÇA, G.E.; BAHIA, A.F.C.; GUEDES, G.A.A. Balanço de nitrogênio ( $^{15}\text{N}$ ) em um latossolo vermelho-escuro, sob vegetação de cerrado, cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.15, p.187-193, 1991.

COMPANHIA NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO. **Levantamento de safra 2005: cana-de-açúcar**. Disponível em:

<<http://www.conab.gov.br/download/safra/3%20levantamento%20de%20cana%20de%20acucar%20dez2005.pdf>>. Acesso em: 25 maio 2006a.

COMPANHIA NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO. **Primeiro levantamento de safra 2006: cana-de-açúcar**. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/download/safra/Primeiro Levantamento Cana 2006-07 maio06.pdf](http://www.conab.gov.br/download/safra/Primeiro%20Levantamento%20Cana%202006-07%20maio06.pdf)> Acesso em: 12 jun. 2006b.

COURTAILLAC, N.; BARAN, R.; OLIVER, R.; CASABIANCA, H.; GANRY, F. Efficiency of nitrogen in sugarcane-vertical system in Guadeloupe according to growth and ratoon age of the cane. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, New York, v.52, p.9-17, 1998.

CRUTZEN, P.J.; HEIDT, L.E.; KRASNEC, J.P.; POLLOCK, W.H.; SEILER, W. Biomass burning as a source of atmospheric gases  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{CH}_3\text{Cl}$  and  $\text{CO}_2$ . **Nature**, Paris, v.282, p.253-256, 1979.

CURTIN, D.; SYERS, J.K. Extractability and adsorption of sulphate in soils. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.41, p.305-312, 1990.

DEMATTÊ, J.L.I Considerações a respeito da adubação nitrogenada e seu parcelamento em cana-planta. **STAB: Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.15, n.4, p.14, 1997.

DEMATTÊ, J.L.I. Cultura da cana-de-açúcar: recuperação e manutenção da fertilidade dos solos. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n.111, 24p, 2005.

DIAS, L.E.; ALVAREZ, V.H.; COSTA, L.M.; NOVAIS, R.F. Dinâmica de algumas formas de enxofre em colunas de solos tratados com diferentes doses de fósforo e gesso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.18, p.373-380, 1994.

DIJSHOORN, W.; VAN WIJK, A.L. The sulphur requirements of plants as evidence by the sulphur-nitrogen ration in the organic matter. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.26, p.129-157, 1967.

DOBBIE, K.E.; McTAGGART, I.P.; SMITH, K.A. Nitrous oxide emissions from intensive agricultural systems: variations between crops and seasons, key driving variables, and mean emission factors. **Journal of Geophysical Research. Atmospheres**, Washington, v.104, n.D21, p.26891-26899, 1999.

ESPIRONELLO, A.; RAIJ, B van; PENATTI, C.P.; CANTARELLA, H.; MORELLI, J.L.; ORLANDO FILHO, J.; LANDELL, M.G.A.; ROSSETTO, R. Cana-de-açúcar. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Campinas: Fundação IAC, 1996. p.237-239. (Boletim 100).

FAGERIA, K.N.; SINGH, H.A. Response of wheat to soil application of nitrogen and sulphur. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.17, n.8, p.1121-1126, 1982.

FENILLI, T.A.B. **Destino do nitrogênio ( $^{15}\text{N}$ ) do fertilizante em uma cultura do café**. 2006. 100p. Tese (Doutorado em Ciências) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

FERNANDES, A.C. **Autorização da colheita da cana-de-açúcar**. Piracicaba: Centro de Tecnologia da COPERSUCAR, 1986. 22p.

FITZGERALD, J.W. Sulfate ester formation hydrolysis: a potentially important yet often ignored aspect of the sulfur cycle of aerobic soils. **Bacteriological Research**, London, v.40, p.698-721, 1976.

FRANCO, H.C.J.; BOLOGNA, I. R.; FARONI, C.E.; VITTI, A.C.; TRIVELIN, P.C.O. Acúmulo de macronutrientes na cultura da cana-de-açúcar em função da adubação nitrogenada de plantio. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 30., 2005, Recife. **Resumos...** Recife: SBCS, 2005. p.118-119.

GAVA, G.J.C. **Utilização do nitrogênio da uréia ( $^{15}\text{N}$ ) e da palhada ( $^{15}\text{N}$ ) por soqueira de cana-de-açúcar no manejo sem despalha a fogo**. 1999. 81p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

GAVA, G.J.C.; TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C.; OLIVEIRA, M.W. Urea and sugarcane straw nitrogen balance in a soil-sugarcane crop system. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.40, n.7, p.689-695, 2005.

GAVA, G.J.C.; TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C.; OLIVEIRA, M.W. Balanço do nitrogênio da uréia ( $^{15}\text{N}$ ) e da palhada ( $^{15}\text{N}$ ) no sistema solo-cana-de-açúcar (cana-soca). In: CONGRESSO NACIONAL DA SOCIEDADE DOS TÉCNICOS AÇUCAREIROS E ALCOOLEIROS DO BRASIL, 8., 2002, Recife. **Resumos....** Olinda: STAB, 2002. p.245-251.

GRAHAM, M.H.; HAYNES, R.J.; MEYER, J.H. Soil organic matter content and quality: effects of fertilizer applications, burning and trash retention on a long-term sugarcane experiment in South África. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v.34, p.93-102, 2002.

HAMILTON, S. D.; CHALK, P. M.; UNKOOOVICH, M. J.; HOPMANS, P.; SMITH, C. J. The measurement of fertilizer S uptake by plants using radioactive and stable isotopes. **Applied and Radiation and Isotopes**, Oxford, v. 42, p.1099-1101, 1991.

HOLTAN-HARTWING, L.; BOCKMAN, O.C. Ammonia exchange between crops and air. **Norwegian Journal of Agricultural Sciences**, Norway, v.14, p.1-41, 1994.

INFOSUCRO. **Boletim Infosucro**. Disponível em:  
<<http://www.nuca.ie.ufrj.br/infosucro/arquivos/boletim012.htm>>. Acesso em: 15 out. 2003.

JANSSON, S.L.; PERSSON, J. Mineralization and immobilization of soil nitrogen. In: STEVENSON, F. J. (Ed). **Nitrogen in agricultural soils**. Madison: American Society of American, 1982. p.229-252.

JANZEN, H.H.; KUCEY, R.M.N. C, N and mineralization of crop residues as influenced by crop species and nutrient regime. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.106, p.35-41, 1988.

JINGGUO, W.; BAKKEN, L.R. Competition for nitrogen during agronomic considerations. Fluidizing urea. Part II. **Solutions**, Manchester, v.31, p.47-51, 1987.

JONES, M.B.; MARTIN, W.E.; WILLIAMS, W.A. Behavior of sulfate sulfur and elemental sulfur in three California soils in lysimeters. **Soil Science Society American Proceedings**, Madison, n.32, p.535-540, 1968.

KACHANOSSKI, R.G.; PRINGLE, E.; WARD, A. Field measurement of solute travel times using time domain reflectometry. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.56, p.47-52, 1992.

KEENEY, D.R.; NELSON, D.W. Nitrogen- Inorganic forms. In: PAGE, A.L.; MILLER, R.H.; KEENEY, D.R. (Ed.). **Methods of soil analysis**. (2<sup>nd</sup> ed.). Madison: American Society of Agronomy, 1982. cap.33, p.643-689.

KORENTAJER, L.; BYRNES, B.H.; HELLUMS, D.T. Leaching losses and plant recovery from various sulfur fertilizers. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.48, p.671-676, 1984.

KORNDÖRFER, G.H.; VALLE, M.R.; MARTINS, M.; TRIVELIN, P.C.O. Aproveitamento do nitrogênio da uréia pela cana planta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, p.23-26, 1997.

KROUSE, H.R.; MAYER, B.; SCHOENAU, J.J. Applications of stable isotope techniques to soil sulfur cycling. In: BOUTTON, T.W.; YAMSAHI, S. (Ed.) **Mass spectrometry of soils**. New York: Marcel Dekker, 1996. p.247-284.

LAL, K; DRAVID, M. S. Sulphur utilization by mustard as influenced by P, S, K<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> and FYM in Typic Ustipsamment. **Journal of Nuclear Agriculture and Biology**, New Delhi, v. 19, p.87-91, 1990.

LOPES, A.S. **Manual internacional de fertilidade**. Piracicaba: Potafos, 1998. 177p.

MALAVOLTA, E. Absorção e transporte de íons e nutrição mineral. In: FERRI, M.G. (Ed.). **Fisiologia Vegetal**. São Paulo: EPU, 1979. p. 77-113.

MALAVOLTA, E. O enxofre na agricultura, situação atual, perspectivas e sugestões. In: SIMPÓSIO: P, Ca, Mg, S, MICRONUTRIENTES: SITUAÇÃO ATUAL E PERSPECTIVAS NA AGRICULTURA, 1984, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Manah, 1986. p.101-108.

MALAVOLTA, E. **Fertilizing for high yield sugarcane**. Basel: International Potash Institute, 1994. 104p. (Bulletin, 14).

MALAVOLTA, E. Enxofre: o elo que pode faltar. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n.73, p.11-12, 1996.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1997. 319p.

MARSCHNER, H. Uptake and release of mineral elements by leaves and other aerial parts. In: **Mineral Nutrition of Higher Plants**. London: Academic Press, 1995. p. 117-130.

McGILL, W.B.; COLE, C.V. Comparative aspects of cycling of organic C, N, S and P through soil organic matter. **Geoderma**, Amsterdam, v.26, n.4, p.267-286, 1981.

MORELLI, J.; DEMATTÊ, J.L.I.; DALBEN, A.E.; NELLI, E. Parcelamento da adubação nitrogenada em cana-planta: aplicação no solo. **STAB- Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.15, n.6, p.26-30, 1997.

MUCHOVEJ, R.M.; NEWMAN, P.R. Nitrogen fertilization of sugarcane on a sandy soil: II Soil and groundwater analysis. **Journal American Society of Sugar Cane Technologists**, Florida, n.24, p.210-219, 2004.

MUCHOW, R.C.; ROBERTSON, M.J.; WOOD, A.W.; KEATING, B.A. Effect of nitrogen on the time-course of sucrose accumulation in sugarcane. **Field Crops Research**, Amsterdam v.47, p.143-153, 1996.

MYERS, R.J.K.; PALM, C.A.; CUEVAS, E.; GUNATILLEKE, I.U.N.; BROSSARD, M. The synchronizations of nutrient mineralization and plant nutrient demand. In: WOOMER, P.L.; SWIFT, M.J. (Ed.). **The biological management of tropical soil fertility**. New York: Wiley-Sayce Publications, 1994. p.81-112.

NG KEE KWONG, K. E.; DEVILLE, J. Nitrogen leaching from soils cropped with sugarcane under the humid tropical climate of Mauritius, Indic Ocean. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.13, n.3, p.471-474, 1984.

NG KEE KWONG, K.F.; DEVILLE, J.; CAVALOT, P.C.; RIVIERE, V. Biological immobilization of fertilizer nitrogen in humid tropical soils of Mauritius. **Soil Science**, New Brunswick, v.141, p.195-199, 1986.

NG KEE KWONG, K.F.; DEVILLE, J.; CAVALOT, P.C.; RIVIERE, V. Value of cane trash in nitrogen nutrition of sugarcane. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.102, p.79-93, 1987.

NUNES JÚNIOR, A. A importância da avaliação local de variedades. **STAB – Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v. 23, n.4. p.12-13, 2005.

OLIVEIRA, M.W. **Dinâmica do nitrogênio da uréia ( $^{15}\text{N}$ ) no sistema solo-cana-de-açúcar com ou sem queima da palha.** 1999. 93p. Tese (Doutorado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

OLIVEIRA, M.W.; TRIVELIN, P.C.O.; PENATTI, C.P.; PICCOLLO, M.C. Decomposição e liberação de nutrientes da palhada de cana-de-açúcar em campo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.12, p.2359-2362, 1999a.

OLIVEIRA, M.W.; TRIVELIN, P.C.O.; GAVA, G.J. de C.; PENATTI, C.P. Degradação da palhada de cana-de-açúcar. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.56, n.4, p.803-809, 1999b.

OLIVEIRA, M.W.; TRIVELIN, P.C.O.; GAVA, G.J. de C.; VITTI, A.C. Lixiviação de nitrogênio em solo cultivado com cana-de-açúcar: experimento em lisímetro. **STAB – Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.18, n.2, p.28-31, 1999c.

OLIVEIRA, M.W.; TRIVELIN, P.C.O.; BOARETTO, A.E.; MURAOKA, T.; MORTATTI, J. Leaching of nitrogen, potassium, calcium and magnesium in a sandy soil cultivated with sugarcane. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.6, p.861-868, 2002a.

OLIVEIRA, M.W.; TRIVELIN, P.C.O.; KINGSTON, G.; BARBOSA, M.H.P.; VITTI, A.C. Decomposition and release of nutrients from sugarcane trash in two agricultural environments in Brazil. In: AUSTRALIAN SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS, 24., 2002, Cairns. **Proceedings...** Cairns: D.M. Hogarth, 2002b. p.40.

ORLANDO FILHO, J.; RODELLA, A.A.; BELTRAME, J.A.; LAVORENTI, N.A. Doses, fontes e formas de aplicação de nitrogênio em cana-de-açúcar. **STAB- Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.17, n.4, p.39-41, 1999.

PADOVESE, P.P. **Movimento e perdas de nitrogênio e potássio num solo com cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*).** 1988. 118p. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1988.

PENATTI, C.P.; DONZELLI, J.L.; FORTI, J.A. Doses de nitrogênio em cana-planta. In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 7., 1997, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: Centro de Tecnologia da COPERSUCAR, 1997. p.340-349.

PENATTI, C.P.; FORTI, J.A. Calcário e gesso em cana-de-açúcar. In: SEMINÁRIO DE TECNOLOGIA AGRONÔMICA, 6.; 1994, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: Centro de Tecnologia da COPERSUCAR, 1994. p.83-98.

PLANALSUCAR. Nutrição e fertilidade. In: I.A.A. **Relatório Anual do Programa Nacional de Melhoramento da Cana-de-Açúcar**. Piracicaba. 1979. 44p.

PRASAD, R.; POWER, J.F. Nutrient interactions. In: **Soil fertility management for sustainable agriculture**. Boca raton: CRC Press, 1997. cap. 18, p.313-322.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. (Ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônômico, 2001. 285p.

REICHARDT, K.; LIBARDI, P.L.; URQUIAGA, S.C. The fate of fertilizer nitrogen in soil-plant systems with emphasis on the tropics. In. INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON AGROCHEMICAL: FATE IN FOOD AND THE ENVIRONMENTAL USING ISOTOPE TECHNIQUES, 1982, Rome. **Proceedings...** Vienna: IAEA, 1982. p.277-289.

RILEY, N.G.; ZHAO, F.J.; McGRATH, S.P. Leaching losses of sulphur from different forms of sulphur fertilizers: a field lysimeter study. **Soil Use and Management**, Cambridge, v.18, n.2, p.120-126, 2002.

RIPOLI, T.C.; MOLINA JÚNIOR, W.F.; STUPIELLO, J.P.; NOGUEIRA, M.C.; SACCOMANO, J.B. Potencial energético de resíduos de colheita de cana verde. **STAB-Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.10, n.1, p.22-28, 1991.

ROSSETE, A.L.R.M.; BENDASSOLLI, J.A.; OLIVEIRA, C.R.; IGNOTO, R.F. Determinação de enxofre (S) em amostras vegetais e de solos, por oxidação alcalina, utilizando mistura de  $\text{NaHCO}_3$  e  $\text{Ag}_2\text{O}$ . In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE QUÍMICA, 27.; CONGRESSO LATINO AMERICANO DE QUÍMICA, 26., 2004, Salvador. **Resumos...** Salvador, 2004.

ROSSIELLO, R.O.P. **Bases fisiológicas da acumulação de nitrogênio e potássio em cana-de-açúcar (*Saccharum spp.* cv. NA 56-79) em resposta à adubação nitrogenada em cambissolo**. 1987. 172p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1987.

RUSCHEL, A.P.; MATSUI, R.; ORLANDO FILHO, J.; BITTENCOURT, V.C. Close system nitrogen balance studies in sugarcane utilizing 15-ammonium sulphate. In: INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGAR CANE TECHNOLOGISTS CONGRESS, 16., 1978, São Paulo. **Proceedings...** São Paulo: ISSCT, 1978. p.1539-1547.



SAKADEVAN, K.; HEDLEY, M.J.; MACKAY, A.D. Sulphur cycling in New Zealand hill country pastures I. Laboratory sulphur, nitrogen and carbon mineralization studies. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.44, n.1, p.73-83 1993.

SALCEDO, I.H.; SAMPAIO, E.V.S.B. Eficiência de utilização de uréia-<sup>15</sup>N pela cana-soca em tabuleiro costeiro de Pernambuco. In: SEMINÁRIO REGIONAL SOBRE TÉCNICAS NUCLEARES NA PRODUÇÃO DE PLANTAS AGRÍCOLAS, 1984, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: CENA/USP, 1984. p.205-209.

SALCEDO, I.H.; SAMPAIO, E.V.S.B.; CARNEIRO, C.J.G. Dinâmica de nutrientes em cana-de-açúcar. IV Perdas de N por lixiviação em cana-planta fertilizada com uréia-<sup>15</sup>N. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.23, n.7, p.725-732, 1988.

SAMPAIO, E.V.S.B.; SALCEDO, I.H.; BETTANY, J. Dinâmica de nutrientes em cana-de-açúcar. I. Eficiência de utilização de uréia-<sup>15</sup>N em aplicação única ou parcelada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.19, p.943-949, 1984.

SAMPAIO, E.V.S.B.; SALCEDO, I.H.; BETTANY, J. Eficiência de utilização da uréia <sup>15</sup>N por cana-planta e em três socas em tabuleiro costeiro de Pernambuco. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 4.; CONVENÇÃO DA ACTALAC, 7., 1987, Olinda. **Anais...** Olinda: STAB, 1987. p.404-413.

SANTOS, H.L. dos; VASCONCELOS, C.A.; FRANÇA, G.E.; NOGUEIRA, F.D. Enxofre. **Informe Agropecuário**, Piracicaba, n.81, p.53-54, 1981.

SHARMA, V. K.; KAMATH, M. B. Effect of sulphur, phosphorus and calcium on sulphur utilization by mustard (*Brassica juncea L.*) and Pea (*Pisum sativum L.*). **Journal of Nuclear Agriculture and Biology**, New Delhi, v. 20, p. 123-127, 1991.

SHINDE, C.P. Yield, quality and economics of sugarcane as influenced by sulphur application. **Cooperative Sugar**, New Delhi, v.37, n.2, p.29-32, 2005. Abstract.

SHUKLA, S.K.; MENHI, L.A.L. Competition functions and productivity in sugarcane-based associative and successive cropping systems in relation to nitrogen and sulphur nutrition. **Indian Journal of Agricultural Science**, Delhi, v.72, n.6, p.315-318, 2002. Abstract.

SILVA, C.A.; VALE, F.R. do; ANDERSON, S.J.; KOBAL, A.R. Mineralização de nitrogênio e enxofre em solos brasileiros sob influência da calagem e fósforo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.9, p.1679-1689, 1999.

SILVA, L.C.F. Influência da adubação nitrogenada na qualidade da cana-de-açúcar. In. ORLANDO FILHO, J. (Coord.). **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba: Instituto do Açúcar e do Alcool, 1983. cap.11, p.317-332.

SILVA, L.C.F.; CASAGRANDE, J.C. Nutrição mineral da cana-de-açúcar (macronutrientes). In. ORLANDO FILHO, J. (Coord.). **Nutrição e adubação da cana-de-açúcar no Brasil**. Piracicaba: Instituto do Açúcar e do Alcool, 1983. cap 4, p.77-99.

SILVEIRA, J.A.G. **Interações entre assimilação de N e o crescimento da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) cultivada em condições de campo**. 1985. 152p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1985.

SILVEIRA, J.A.G.; CROCOMO, O.J. Biochemical and physiological aspects of sugarcane (*Saccharum spp.*). I. Effects of NO<sub>3</sub> nitrogen concentration on the metabolism of sugar and nitrogen. **Energia Nuclear e Agricultura**, Piracicaba, v.3, n.1, p.19-33, 1981.

SINGH, B.R.; ABRAHAMSEN, G.; STUANTS, A. Effect of simulated acid rain on sulfate movement in acid forest soils. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.40, p.75-80, 1980.

SLIDE, W.C.; ROOSE, D.L.; SHANKLIN, D.R. Isotopic evidence for naturally occurring sulfate pollution of ponds in the Kankakee River Basin, Illinois-Indiana. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v.29, n.5, p.1594-1603, 2000.

STEWART, B.A.; PORTER, L.K. Nitrogen-sulfur relationships in wheat (*Triticum aestivum* (L.)), corn (*Zea mays* (L.)) and beans (*Phaseolus vulgaris*). **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.61, n.2, p.267-271, 1969.

STURION, A.C.; FERNANDES, A.C. Análise direta da cana-de-açúcar pelo método da prensa hidráulica. São Paulo: COPERSUCAR, 1979. p.12-15. (Boletim Técnico).

TABATABAI, M.A. **Sulfur in agriculture**. Madison: American Society of Agronomy, 1986. 668p.

TABATABAI, M.A.; BREMNER, J.A. Forms of sulfur and carbon, nitrogen and sulfur relationships in Iowa soils. **Soil Science**, New Brunswick, v.114, p.380-385, 1972.

TABATABAI, M.A.; AL-KHAFAJI, A.A. Comparison of nitrogen and sulfur mineralization in soils. **Soil Science of America Journal**, Madison, v.44, n.5, p.1000-1006, 1980.

TAKAHASHI, D.T. Fate of applied fertilizer nitrogen as determined by the use of  $^{15}\text{N}$ . I. Summer and fall plant and rato on crops on the Hamakua coast of Hawaii. **Hawaii Plant Research**, Berkeley, v.57, p.237-266, 1967.

TAKAHASHI, D.T. Fate of ammonium and nitrate fertilizers in lysimeter studies of  $^{15}\text{N}$ . **Hawaii Plant Research**, Berkeley, v.58, p.1-12, 1968.

TEIXEIRA, G.M. **Recuperação do enxofre ( $^{34}\text{S}$ ) aplicado ao solo em cultivos sucessivos com milho ou soja e alfafa**. 2004. 77p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

TEIXEIRA, G. M.; TRIVELIN, P. C. O.; BENDASSOLLI, J. A.; MURAOKA, T.; GAVA, G. J. C. Utilização do enxofre aplicado ao solo pela soja, avaliado com as técnicas isotópicas:  $^{34}\text{S}$  (estável) e  $^{35}\text{S}$  (radiativo). In: NATIONAL MEETING ON NUCLEAR APPLICATIONS, 6., 2002, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro: ABEN, 2002. v.1. p.1-3.

THORBURN, J.P.; MEIER, E.A.; PROBERT, M.E. Modeling nitrogen dynamics in sugarcane systems: recent advances and applications. **Field Crop Research**, Amsterdam, v.92, n.2/3, p.337-351, 2005.

TIWARI, R.J. Response of sugarcane (*Saccharum officinarum*) to direct and residual effect of sulphur. **Indian Journal of Agricultural Sciences**, Delhi, v.76, n.2, p.117-119, 2006. Abstract.

TRIVELIN, P.C.O. **Utilização do nitrogênio pela cana-de-açúcar: três casos estudados com o uso do traçador  $^{15}\text{N}$** . 2000. 143p. Tese (Livre-Docência) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2000.

TRIVELIN, P.C.O.; VICTORIA, R.L.; RODRIGUES, J.C.S. Aproveitamento por soqueira de cana-de-açúcar de final de safra do nitrogênio da aquamônia- $^{15}\text{N}$  e uréia- $^{15}\text{N}$  aplicado ao solo em complemento à vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 30, p.1375-1385, 1995.

TRIVELIN, P.C.O.; RODRIGUES, J.C.S.; VICTORIA, R.L. Utilização por soqueira de cana-de-açúcar de início de safra do nitrogênio da aquamônia- $^{15}\text{N}$  e uréia- $^{15}\text{N}$  aplicado ao solo em complemento à vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.31, p.89-99, 1996.

TRIVELIN, P.C.O.; BENDASSOLLI, J.A.; OLIVEIRA, M.W.; MURAOKA, T. Potencialidade da mistura de aquamônia com vinhaça na fertilização de canaviais colhidos sem despalha a fogo. Parte I: Estabilidade química da mistura. **STAB- Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.16, p.26-29, 1997.

TRIVELIN, P.C.O.; BENDASSOLLI, J.A.; CARNEIRO JÚNIOR, F.; MURAOKA, T. Sulfur utilization by rice and crotalaria juncea from sulfate  $^{34}\text{S}$  applied to the soil. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.59, p.205-207, 2002c.

TRIVELIN, P.C.O.; OLIVEIRA, M.W.; VITTI, A.C.; GAVA, G.J. de C.; BENDASSOLLI, J.A. Perdas do nitrogênio da uréia no sistema solo-planta em dois ciclos de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.2, p.193-201, 2002a.

TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C.; OLIVEIRA, M.W.; GAVA, G.J.C.; SARRIÉS, G.A. Utilização de nitrogênio e produtividade da cana-de-açúcar (cana-planta) em solo arenoso com incorporação de resíduos da cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.26, p.637-646, 2002b.

TRIVELIN, P.C.O.; CAMARGO, P.B.; LIBARDI, P.L.; MORAES, S.O.; LARA CABEZAS, W.A.R.; PALHARES, A.L. Dinâmica do N dos fertilizantes: uréia ( $^{15}\text{N}$ ) e aquamônia ( $^{15}\text{N}$ ) incorporados ao solo na cultura da cana-de-açúcar. Piracicaba: Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, 1988. 84p. (Relatório Técnico).

TZI-TZIBOY, E.A. **Mineralização do enxofre e nitrogênio de sesbania, mucuna preta e crotalaria utilizadas como adubos verdes, avaliada usando  $^{35}\text{S}$  e  $^{15}\text{N}$** . 1998. 173p. Tese (Doutorado em Ciências) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1998.

URQUIAGA, S.; CRUZ, K.H.S.; BODDEY, R.M. Contribution of nitrogen fixation to sugar cane: nitrogen- $^{15}$  and nitrogen balance estimative. **Soil Science American Journal**, Madison v.56, p.105-114, 1992.

URQUIAGA, S.; BODDEY, R.M.; OLIVEIRA, O.C.; LIMA, E.; GUIMARÃES, D.H.V. **Importância de não queimar a palha de cana-de-açúcar**. Brasília: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1991. 12p. (Comunicado Técnico, 5).

VALE, F.R. do; GUILHERME, L.R.G.; MARQUES, R.; PAIVA, P.J.R. Efeito do enxofre no crescimento e assimilação de nitrogênio em milho. **Ciência e Prática**, Lavras, v.17, n.4, p.343-350, 1993.

VALLIS, I.; CATCHPOOLE, V.R.; HUGHES, R.M.; MYERS, R.J.K.; RIDGE, D.R.; WEIER, K.L. Recovery in plants and soil of  $^{15}\text{N}$  applied as subsurface bands of urea to sugarcane. **Australian Journal of Agricultural Research**, Melbourne, v.47, p.355-370, 1996.

VITTI, A.C. **Utilização pela cana-de-açúcar (cana-planta) do nitrogênio da uréia ( $^{15}\text{N}$ ) e do mineralizado no solo em sistemas de manejo com e sem queima**. 1998. 93p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, 1998.

VITTI, A.C. **Adubação nitrogenada da cana-de-açúcar (soqueira) colhida mecanicamente sem a queima prévia: manejo e efeito na produtividade**. 2003. 114p. Tese (Doutorado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, 2003.

VITTI, G.C.; MUTTON, M.A.; FORNASIRI FILHO, D.; PERENCIN, D.; ROSOLEN, C.A.; NOCITI, P.R.H.; MENDES, J.M.; PARANHOS, S.B.; PICCIN, C.R.; MALAVOLTA, M.L.; MALAVOLTA, E. Efeitos de doses e fontes de enxofre em culturas de interesse econômico. V. Cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). In: MALAVOLTA, E. (Coord.) Divulgação Técnica. Piracicaba, 1989. SN: Piracicaba, 1989. 50p.

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

WANG, F.L.; ALVA, A.K. Leaching of nitrogen from slow-release urea sources in sandy soils. **Soil Society of America Journal**, Madison, v.60, p.1454-1458, 1996.

WEAST, R. C. **Handbook of chemistry and physics**. 50<sup>th</sup>. ed. Cleveland: Chemical Rubber, 1969. 273p.

WHITE, J.G. Mineralization of nitrogen and sulphur in sulphur deficient soils. **New Zealand Journal Agricultural Research**, New Zealand, v.2, p.255-258, 1959.

WOOD, A.W. Management of crop residues following green harvesting of sugar cane in north Queensland. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.20, p.69-85, 1991.

WOOD, A.W. The effect of time of application on the utilization of fertilizer nitrogen by plant cane. In: INTERNATIONAL SOCIETY OF THE SUGAR CANE TECHNOLOGISTS CONGRESS, 15., Durban, 1974. **Proceedings...** Durban: Hayne et Gibson, 1974.p.618-629.

YADAV, L.R.; KUMAR, R.; VERMA, R.S. Effects of nitrogen applied through different carriers on yield and quality of sugarcane. **Journal Agricultural Science**, Madison, v.114, p.225-230, 1990.

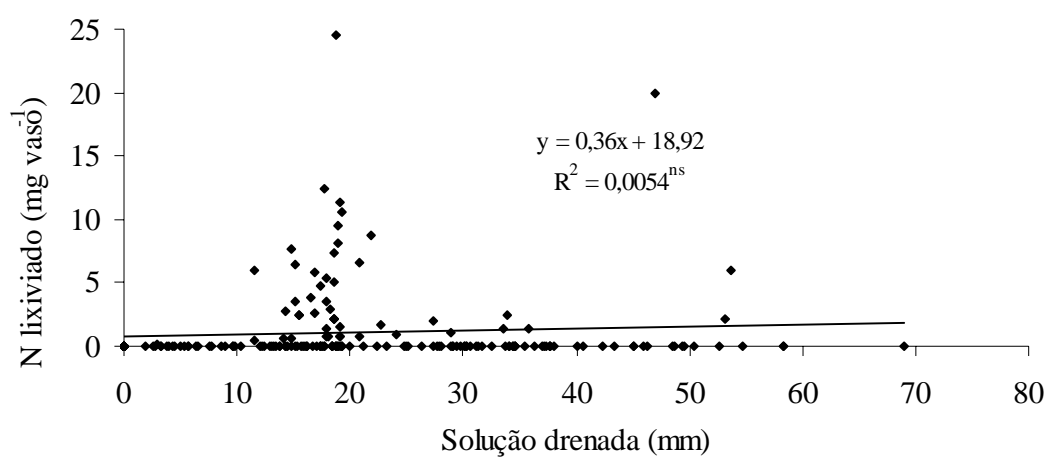
ZHOU, W.; LI, S.T.; WANG, H.; HE, P.; LIN, B. Mineralization of organic sulfur and its importance as a reservoir of plant-available sulfur in upland soils of North China. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v.30, n.3, p.245-250, 1999.

**ANEXOS**

ANEXO A - Temperaturas médias máxima e mínima, precipitação pluviométrica e irrigações durante os meses de desenvolvimento experimental

Mês/ano	Temperatura		Entrada de água no sistema	
	Máxima	Mínima	Precipitação pluvial	Irrigação
	°C		mm	
Maio/2004	23,4	11,4	49,0	-
Junho/2004	24,7	11,1	84,0	-
Julho/2004	23,6	11,3	67,2	-
Agosto/2004	27,9	10,4	0,0	21,2
Setembro/2004	32,0	15,2	9,2	167,5
Outubro/2004	27,2	16,2	187,1	64,0
Novembro/2004	29,8	17,7	111,0	20,2
Dezembro/2004	30,5	18,7	82,4	108,1
Janeiro/2005	29,1	20,5	258,9	-
Fevereiro/2005	32,0	18,3	48,8	48,8
Março/2005	30,8	18,8	94,8	66,8
Abril/2005	30,1	17,9	27,8	104,9
Maio/2005	27,6	14,0	148,4	66,8
Junho/2005	26,5	12,8	26,8	28,6
Julho/2005	25,3	11,5	8,8	57,2
Agosto/2005	29,1	12,2	24,0	76,3
Setembro/2005	29,2	14,7	13,2	-





ANEXO B - Nitrogênio (Y) em função da quantidade de solução drenada (X). Pontos de correlação: 208, significando todas as amostragens de drenagem dos tratamentos T1 ao T4 do experimento 1, durante o período experimental. ns= não-significativo