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

Adubações com nitrogênio e enxofre: frações no solo, características estruturais, nutricionais, produtivas e uso da água pelo capim-marandu

Adriana Guirado Artur

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

**Piracicaba
2010**

Adriana Guirado Artur
Engenheira Agrônoma

**Adubações com nitrogênio e enxofre: frações no solo, características estruturais,
nutricionais, produtivas e uso da água pelo capim-marandu**

Orientador:
Prof. Dr. **FRANCISCO ANTONIO MONTEIRO**

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

Piracicaba
2010

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP

Artur, Adriana Guirado

Adubações com nitrogênio e enxofre: frações no solo, características estruturais, nutricionais, produtivas e uso da água pelo capim-marandu / Adriana Guirado Artur. - - Piracicaba, 2010.
113 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2010.

1. Adubação 2. Água - Uso 3. Brachiaria 4. Capim-marandu 5. Clorofila 6. Diagnose foliar 7. Enxofre 8. Folhas (Plantas) 9. Nitratos 10. Nitrogênio 11. Nutrição vegetal 12. Perfilhos 13. Produção vegetal 14. Raiz I. Título

CDD 633.2
A792a

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

A minha mãe Yvaneti

Aos meus irmãos Daniela e Henrique

Ao meu cunhado e sobrinho

Sejam sempre os mesmos

Sempre os outros

Mas sempre... dentro de tudo

OFEREÇO

Ao Carlos

pelo amor sincero,

pela paciência nas horas da minha irritação,

por cuidar tão bem de mim,

O Amor é o Elo que nos une e nos unirá para sempre

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus, por não me deixar desistir de sonhar;

Ao Professor Dr. Francisco Antonio Monteiro, meu apreço pela orientação, por ter acreditado na minha capacidade profissional e principalmente pela sua amizade. Também a sua filha (Juliana Martins Monteiro Dias) e esposa (Sra. Marisa Martins Monteiro) pelo grande carinho e por mais uma vez nossos caminhos terem se cruzado;

A Dr^a. Maria Lúcia Azevedo Silveira, professora da University of Florida - Range Cattle Research and Education Center em, Ona, na Flórida, pelo seu profissionalismo, amizade e pela oportunidade de me deixar compartilhar de seus conhecimentos durante o Doutorado-Sanduíche. À técnica do laboratório Soil and Water Science, Cindy Holley e aos demais funcionários da estação experimental.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – Universidade de São Paulo e especialmente ao Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, pela confiança e oportunidades concedidas para minha formação;

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas pela convivência respeitosa, contribuição profissional e acima de tudo, pela amizade;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos, fundamentais para a concretização do presente trabalho;

Às funcionárias do Laboratório de Nutrição Mineral de Plantas da ESALQ-USP Ednéia C.S. Mondoni, Lúcia H.S.P. Forti, Lurdes A.D. de Gonzáles, Sueli M.A.C. Bovi, pelo auxílio nas atividades laboratoriais, pela convivência e amizade. Em especial, à Nivanda M. de Moura Ruiz, pela colaboração sempre prestativa nas análises de fracionamento do enxofre, pela amizade e paciência;

À grande amiga de casa Máisa Honório Belizário, por estar sempre presente e tornar os momentos divertidos pelo seu jeito falante e alegre de ser;

Ao casal de amigos Michele e Marcio Megda pelo carinho, confiança, incentivo e pela grande amizade que espero nunca cesse;

Aos amigos e companheiros de sala, Tiago B. Garcez, Marcio M. Megda, Lucíola E. C. Martins, Cristiane P. Silveira, Fabiano Daniel De Bona, Fabiana Schmidt e Elisângela Dupas, e à agregada Roberta C. Nogueirol, pelos momentos e histórias divertidas, pela troca de conhecimento, pelo aprendizado que tiramos em cada situação, pelos questionamentos e pelas lembranças que sempre ficarão;

Aos estagiários da Nutrição Mineral de plantas, em especial a Dayana L. Santos, Pedro V.F. Machado e Rafael R. Monteiro, pela ajuda na execução das etapas do trabalho e pela amizade durante todo o tempo;

A todos os amigos que conquistei nestes anos de Pós-Graduação em Piracicaba;

A todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho, a minha eterna gratidão.

"A inteligência anula o destino. No entanto, o homem que pensa é livre."

(Ralph Waldo Emerson)

SUMÁRIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT.....	13
1 INTRODUÇÃO.....	15
Referências.....	18
2 FRAÇÕES ORGÂNICAS E INORGÂNICAS DE NITROGÊNIO E ENXOFRE NO SOLO EM FUNÇÃO DAS ADUBAÇÕES COM NITROGÊNIO E ENXOFRE PARA CAPIM-MARANDU.....	21
Resumo.....	21
Abstract.....	21
2.1 Introdução.....	22
2.2 Material e métodos.....	24
2.3 Resultados e discussão.....	27
2.4 Conclusões.....	35
Referências.....	35
3 ALTERAÇÕES NUTRICIONAIS E ESTRUTURAIS NAS RAÍZES DO CAPIM-MARANDU EM RESPOSTA ÀS ADUBAÇÕES COM NITROGÊNIO E ENXOFRE.....	41
Resumo.....	41
Abstract.....	41
3.1 Introdução.....	42
3.2 Material e métodos.....	43
3.3 Resultados e discussão.....	45
3.4 Conclusões.....	54
Referências.....	55
4 EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA PELO CAPIM-MARANDU ADUBADO COM NITROGÊNIO E ENXOFRE EM SOLO COM BAIXA FERTILIDADE.....	59
Resumo.....	59
Abstract.....	59
4.1 Introdução.....	60

4.2 Material e métodos.....	61
4.3 Resultados e discussão.....	63
4.4 Conclusões.....	71
Referências.....	72
5 ADUBAÇÕES COM NITROGÊNIO E ENXOFRE E AS VARIÁVEIS ESTRUTURAIS, NA PRODUÇÃO DE MASSA SECA E NO ACÚMULO DESSES NUTRIENTES PELO CAPIM- MARANDU.....	75
Resumo.....	75
Abstract.....	75
5.1 Introdução.....	76
5.2 Material e métodos.....	77
5.3 Resultados e discussão.....	79
5.4 Conclusões.....	89
Referências.....	90
6 DIAGNOSE NUTRICIONAL DE NITROGÊNIO E ENXOFRE NO CAPIM- MARANDU ADUBADO COM DOSES DESSES NUTRIENTES.....	93
Resumo.....	93
Abstract.....	94
6.1 Introdução.....	94
6.2 Material e métodos.....	95
6.3 Resultados e discussão.....	97
6.4 Conclusões.....	108
Referências.....	108
7 CONCLUSÕES GERAIS.....	113

RESUMO

Adubações com nitrogênio e enxofre: frações no solo, características estruturais, nutricionais, produtivas e uso da água pelo capim-marandu

A adubação equilibrada com nitrogênio e enxofre pode alterar a nutrição e produção das gramíneas forrageiras. Mediante as aplicações de combinações de doses de nitrogênio com doses de enxofre, objetivou-se avaliar os efeitos: a) nas frações desses nutrientes no solo e correlacionar com as quantidades acumuladas desses nutrientes pela *Brachiaria brizantha* cv. Marandu; b) nas variáveis de crescimento, concentração total e formas inorgânicas de nitrogênio e enxofre e relação N:S nas raízes da gramínea forrageira; c) no consumo e eficiência do uso da água pela gramínea; d) nas variáveis estruturais, produção de massa seca e na quantidade acumulada desses nutrientes no capim-marandu e, e) na diagnose nutricional de nitrogênio e enxofre no capim, buscando determinar os níveis críticos para esses nutrientes. Dois experimentos simultâneos foram conduzidos em casa de vegetação, um com e outro sem o capim-marandu, no período de setembro a dezembro de 2008, utilizando um solo classificado como Neossolo Quartzarênico. Cinco doses de nitrogênio (0; 100; 200; 300 e 400 mg dm⁻³) foram combinadas com cinco doses de enxofre (0; 10; 20; 30 e 40 mg dm⁻³) em um fatorial 5² fracionado, com quatro repetições. No experimento sem plantas verificou-se o efeito da adubação com doses de nitrogênio e enxofre nas frações desses nutrientes no solo. A adubação com nitrogênio aumentou as frações inorgânicas de nitrato e amônio, nitrogênio total hidrolisável, nitrogênio amoniacal hidrolisável, aminoaçúcar e nitrogênio não identificado. A aplicação de doses de enxofre incrementou enxofre-éster e o enxofre residual do solo. No experimento com plantas observou-se que o fornecimento de doses de nitrogênio com doses de enxofre aumentou a massa seca de raízes, as concentrações de enxofre, nitrato e sulfato nas raízes, enquanto o comprimento e a superfície radicular, concentrações de nitrogênio e de amônio e relação N:S no sistema radicular responderam significativamente às doses de nitrogênio. Ocorreu aumento no consumo e na eficiência do uso da água pelo capim com adubação combinada de doses de nitrogênio com doses de enxofre. Número de folhas, número de perfilhos, área foliar, massa seca da parte aérea e quantidade acumulada de nutrientes pela parte aérea do capim responderam significativamente à adubação nitrogenada no primeiro corte das plantas, mas houve a necessidade de adicionar o enxofre na adubação com nitrogênio para maximizar essas variáveis nos dois crescimentos seguintes do capim. Apenas a adubação com nitrogênio foi significativa no primeiro período de crescimento, enquanto as combinações de doses de nitrogênio com doses de enxofre foram significativas no segundo e terceiro períodos de crescimento para o valor SPAD, concentrações de nitrogênio e enxofre e relação N:S nas folhas diagnósticas do capim. Correlações significativas entre a concentração de nitrogênio nas folhas diagnósticas e o valor SPAD foram observadas para os três períodos de crescimento do capim. A falta de resposta ao enxofre no primeiro período de crescimento da gramínea mostrou a baixa demanda por esse nutriente nessa fase. Os benefícios da adubação nitrogenada foram maximizados pelo suprimento conjunto com enxofre nos dois períodos subsequentes de crescimento do capim-marandu.

Palavras-chave: Diagnose foliar; Frações do nitrogênio; Nutrição; Uso da água; Relação N:S

ABSTRACT

Nitrogen and sulphur fertilizations: fractions in soil, water use and Marandu palissadegrass structural, nutritional and productive characteristics

Nitrogen and sulphur balanced fertilization may change mineral nutrition and yield of forage grasses. Based on the supply of combinations of nitrogen and sulphur rates, the objectives were to evaluate the effects: a) in these nutrient fractions in the soil and to correlate this fractions with nitrogen and sulphur content in *Brachiaria brizantha*; b) the combination of nitrogen rates with sulphur rates on the root growth characteristics, in nitrogen and sulphur, total concentration and inorganic forms and N:S ratio in roots of the forage grass; c) on water consumption and efficient use by Marandu palissadegrass; d) on structural characteristics, aboveground forage yield and nutrient content in the grass and e) on nutritional diagnosis of these nutrients in the forage, trying to obtain the critical levels of these nutrients. Two experiments were carried out at the same time under greenhouse conditions, one with and one without the Marandu palissadegrass from September to December 2008, and the soil was an Entisol. Five nitrogen rates (0; 100; 200; 300 and 400 mg dm⁻³) were combined with five sulphur rates (0; 10; 20; 30 and 40 mg dm⁻³) in fractionated 5² factorial, with four replications. In the experiment without plants, the nitrogen and sulphur fertilization changed these nutrients fractions in the soil. Nitrogen fertilization increased inorganic fractions of nitrate and ammonium, hydrolyzable total nitrogen, hydrolyzable ammonium, amino sugars and unidentified nitrogen. Application of sulphur rates increased ester-sulphur and residual sulphur in the soil. In the experiment with plants, supply of both nitrogen and sulphur increased root dry matter production, total sulphur, nitrate and sulphate-sulphur concentrations, while for total root length and root surface area, total nitrogen and ammonium concentrations and N:S only ratio nitrogen rates had significant responses. Nitrogen and sulphur rates increased the water consumption and efficiency of use by grass. Numbers of leaves, number of tillers, leaf area, shoot dry mass and nitrogen content in the shoots of forage grass showed significant responses to nitrogen fertilization in the first growth period but it was necessary to add sulphur in the fertilization to maximize these variables for following two growth period of the grass. Only nitrogen fertilization was significant in the first growth period, while the combinations of nitrogen and sulphur rates were significant for the SPAD value, concentrations of nitrogen and sulphur and N:S ratio in diagnostic leaves of the grass. Significant correlation was observed for nitrogen concentration in diagnostic leaves and SPAD value the three growth periods. Sulphur demand by Marandu palissadegrass was low in the first growth period, but the nitrogen fertilization benefits were maximized by adding sulphur in the fertilization of this grass.

Key words: Foliar diagnosis; N: S ratio; Nitrogen fractions; Nutrition; Water use

1 INTRODUÇÃO

As pastagens no Brasil se constituem na base alimentar do rebanho bovino que supera os 180 milhões de cabeças, sendo alimento o quase que exclusivo para esses animais (BÜRGUI; PAGOTO, 2002). O Brasil possui mais de 172 milhões de hectares de pastagens, sendo as áreas pastoris a atividade de mais elevada expressão no uso da terra no país, pois ocupa 70% de toda a área agricultável e aproximadamente 20% de todo o território e supera assim os 99,9 milhões de hectares ocupados por vegetação de matas e florestas e os 76,7 milhões de hectares utilizados para lavoura (IBGE, 2006). Do total de área ocupada no país pelas plantas forrageiras, estima-se que em torno de 85% é ocupado pelas plantas do gênero *Brachiaria*, dentre elas, as mais difundidas são a *Brachiaria decumbens* e *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, devido à adaptação às mais variadas condições de solo e clima (LAZZARINI NETO, 2000). As pastagens formadas por plantas do gênero *Brachiaria* caracterizam-se pelo expressivo potencial de produção de massa seca e extração de nutrientes do solo. A constante remoção de forragem pelo animal e nutrientes que não são repostos na mesma proporção ao longo do tempo, podem resultar na degradação do sistema.

Embora todos os nutrientes sejam importantes para a produção de pastagens, o nitrogênio e o enxofre, dentre os nutrientes, destacam-se pelas funções que exercem no sistema solo-planta: no solo são componentes da matéria orgânica (STEVENSON, 1985) e na planta participam da formação de aminoácidos que compõem a maioria das proteínas (CRAWFORD et al., 2000). Além dos esforços da pesquisa aplicados no estudo da eficiência da aplicação de nutrientes para a produção das pastagens, as pesquisas atualmente tem avançado na direção de avaliar combinações de doses de nutrientes para aumentar a produtividade das plantas forrageiras (BROWN et al., 2000; BATISTA; MONTEIRO, 2006).

A baixa disponibilidade de nitrogênio e enxofre no solo é devido ao fato, de que a quase totalidade desses nutrientes encontra-se na forma orgânica, sendo uma pequena parte mineralizada durante os períodos de cultivo de plantas, pela atividade dos micro-organismos do solo (STEVENSON, 1985). Essa quantidade mineralizada em determinado período de tempo depende de fatores como temperatura, umidade, aeração, quantidade e natureza do material orgânico presente (MARY et al., 1996; GONÇALVES et al., 2001) e está associada ao nitrogênio total (CAMARGO; GIANELLO; VIDOR, 1997) ou, no caso do enxofre por processos bioquímicos, via hidrólise enzimática de frações sulfuradas do tipo éster (SAKADEVAN et al.,

1993), sem a mediação da biomassa microbiana do solo. A quantidade de nutriente disponíveis no solo nem sempre atende a demanda das plantas, razão pela qual, a complementação via adubação é comumente imprescindível.

A pequena fração do nitrogênio total e do enxofre total do solo prontamente disponível às plantas encontra-se nas formas de nitrato e amônio (BREMNER, 1996) e na forma de sulfato (McGILL; COLE, 1981), respectivamente. As formas orgânicas do nitrogênio em solos são determinadas mediante a quantificação dos compostos orgânicos liberados por meio da hidrólise ácida. O nitrogênio no hidrolisado é separado nas seguintes frações: N-total hidrolisável, N-NH₄⁺ hidrolisável, N-aminoácidos, N-aminoaçúcares e N-não identificado. As frações de enxofre orgânico se dividem em: enxofre reduzível por HI (enxofre-éster + enxofre-sulfato) enxofre ligado a carbono (S-C), a qual pode ser dividida em outras duas frações: (a) enxofre ligado a carbono reduzível por Raney-Ni e (b) enxofre inerte ou residual (STEVENSON, 1985). O amplo entendimento da dinâmica desses nutrientes no solo é essencial para a racionalização do uso de fertilizantes, permitindo o estabelecimento de quantidades adequadas de nitrogênio e enxofre a serem aplicadas nas culturas.

Sabe-se que a absorção dos nutrientes depende, entre outros fatores, da disponibilidade de água no solo e que, tanto para o nitrogênio quanto para o enxofre, o transporte até as raízes é essencialmente efetuado por fluxo de massa (TAIZ; ZEIGER, 2004). O fluxo de massa está associado ao gradiente de potencial hídrico provocado pela absorção de água pelas plantas (SILVA; ALVAREZ; RUIZ, 1998). As plantas absorvem água em toda a sua superfície, mas a maior parte do suprimento de água vem do solo. O movimento da água do solo para a atmosfera através da planta depende das características físicas do solo, sendo a textura, o principal determinante da retenção de água, por atuar diretamente na área de contato entre as partículas sólidas e a água. À medida em que o solo seca, torna-se mais difícil às plantas absorverem água, porque aumenta a força de retenção e diminui a disponibilidade de água no solo às plantas (BERGAMASCHI, 1992). Dessa forma, nem toda a água que o solo armazena está disponível às plantas (CARLESSO, 1995). A baixa disponibilidade de água no solo é responsável pelo fechamento dos estômatos na planta, diminuindo a transpiração e a assimilação de CO₂ (NELSON; VOLENEC, 1995). Daí decorre a necessidade de garantir quantidade adequada de água para o desenvolvimento da planta.

O sistema radicular, além de ser o responsável pela absorção e condução de água e nutrientes do meio externo até a parte aérea, é responsável pela fixação das plantas (RAVEN; EDWARDS, 2001). O crescimento e o desenvolvimento do sistema radicular das plantas sofrem grande influência da condição física do solo, da temperatura, da disponibilidade hídrica, porém a disponibilidade de nutrientes exerce papel fundamental em ambos os parâmetros. O desenvolvimento, crescimento e distribuição das raízes são afetados pela quantidade, forma e distribuição de nutrientes no solo (GREGORY, 1994). O sistema radicular bem nutrido garante melhor desenvolvimento da parte aérea, visto que as raízes suprem a parte aérea com água e nutrientes e recebem em troca produtos fotossintetizados e reguladores de crescimento.

Considerando o aspecto nutricional, elementos como o nitrogênio e o enxofre têm influenciado a produção de gramíneas forrageiras, tanto por ação na morfogênese vegetal quanto pelo aumento de massa seca. O nitrogênio está presente nos aminoácidos e proteínas, é constituinte da molécula de clorofila e da enzima ribulosebifosfato carboxilase oxigenase (Rubisco), é essencial para a utilização de carboidratos na planta, além de estimular o crescimento e o desenvolvimento de folhas, caules e raízes e promover maior absorção de outros nutrientes (TAIZ; ZEIGER, 2004). Segundo Mengel e Kirkby (1987), o suprimento de nitrogênio é o que resulta no maior aumento na produção das culturas. O enxofre está envolvido na síntese da clorofila e é constituinte das vitaminas tiamina e biotina, e de proteínas e da enzima nitrogenase, responsável pela fixação biológica do nitrogênio (SCHERER et al., 2008). A adição concomitante desses nutrientes aumenta a produção de massa seca, o número de perfilhos e de folhas e a área foliar das gramíneas (BONFIM-SILVA; MONTEIRO; SILVA, 2007; BATISTA; MONTEIRO, 2008), além de favorecer o aproveitamento da água pelo capim (BONFIM-SILVA; MONTEIRO; SILVA, 2007; DE BONA; MONTEIRO, 2008).

O requerimento nutricional das plantas varia com a espécie, estágio de desenvolvimento e órgão vegetativo. Em geral, a concentração de nitrogênio pode variar de 20 a 50 g kg⁻¹ de tecido vegetal seco, enquanto a do enxofre varia de 1 a 5 g kg⁻¹ (MARSCHNER, 1995). As espécies vegetais diferem na sua preferência por fontes de nitrogênio e enxofre, mas os absorvem preferencialmente nas formas inorgânicas como nitrato, amônio e sulfato.

O nitrato absorvido pelas raízes é reduzido a amônio por duas enzimas, sendo que a redutase do nitrato converte o nitrato em nitrito nas raízes ou nas folhas das plantas e em seguida, a enzima redutase do nitrito converte rapidamente o nitrito a amônio. O amônio absorvido ou

proveniente da redução do nitrato é assimilado em aminoácidos pelas enzimas síntase da glutamina e síntetase do glutamato (MENDEL, 2007). A assimilação do sulfato é semelhante a do nitrito, sendo necessária a redução para a incorporação do enxofre em aminoácidos, proteínas e coenzimas (MARSCHNER, 1995), exigindo alto gasto energético. Quando o fornecimento de sulfato é elevado, a sua absorção pode ser mais rápida que sua redução e a assimilação dos átomos de enxofre em compostos orgânicos.

Para avaliar o estado nutricional das plantas é realizada, primordialmente, a análise química do tecido vegetal de determinado órgão e em dado estágio fenológico, tendo como aplicações a identificação de deficiências nutricionais e a predição da necessidade do suprimento de nutrientes. Em decorrência da natureza dinâmica da composição foliar, a qual é fortemente influenciada pela idade e maturação do tecido, bem como por todas as interações envolvendo absorção e translocação de nutrientes, estudos com gramíneas forrageiras (ABREU; MONTEIRO, 1999; SANTOS JR.; MONTEIRO, 2003; LAVRES JUNIOR.; MONTEIRO, 2006) consideraram as lâminas de folhas recém-expandidas (designadas como folha +1 e +2 ou como LR) como o componente da parte aérea mais indicada para avaliar o estado nutricional. Dijkshoorn e Lampe (1960) sugeriram que a relação N:S nas plantas é um bom instrumento de diagnose para determinar a deficiência de enxofre. Desse modo, a forma de nutrientes aplicada via adubação pode afetar o metabolismo, com conseqüências na nutrição e desenvolvimento do capim-marandu.

Referências

ABREU, J.B.R.; MONTEIRO, F.A. Produção e nutrição do capim-marandu em função de adubação nitrogenada e estágios de crescimento. **Boletim de Indústria Animal**, Nova Odessa, v. 56, p. 137-146, 1999.

BATISTA, K.; MONTEIRO, F.A. Respostas morfológicas e produtivas do capim-marandu adubado com doses combinadas de nitrogênio e enxofre. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 35, p. 1281-1288, 2006.

_____. Nitrogênio e enxofre nas características morfogênicas do capim-marandu em substituição ao capim-braquiária em degradação em solo com baixo teor de matéria orgânica. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 37, p. 1151-1160, 2008.

BERGAMASCHI, H. Desenvolvimento de déficit hídrico em culturas. In: BERGAMASCHI, H. **Agrometeorologia aplicada à irrigação**. Porto Alegre: UFRGS, Ed. Universidade, 1992. p. 25-32.

- BONFIM-SILVA, E.M.; MONTEIRO, F.A.; SILVA, T.J.A. Nitrogênio e enxofre na produção e no uso de água pelo capim-braquiária em degradação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 309-317, 2007.
- BREMNER, J.M. Nitrogen total. In: SPARKS, D.L.; PAGE, A.L.; HELMKE, P.A.; LOEPPERT, R.H.; SOLTANPOUR, P.N.; TABATABAI, M.A.; JOHNSTON, C.T.; SUMMER, M.E. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 2nd ed. Madison: SSSA; ASA, 1996. pt. 3: Chemical methods, p. 1085-1121.
- BROWN, L.; SCHOLEFIELD, D.; JEWKES, E.C.; PREEDY, N.; WADGE, K.; BUTLER, M. The effect of sulphur application on the efficiency of nitrogen use in two contrasting grassland soils. **Journal of Agricultural Science**, New York, v. 135, p. 131-138, 2000.
- BÜRGI, R.; PAGOTTO, D.S. Aspectos mercadológicos dos sistemas de produção animal em pastagens. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DA PASTAGEM, 19., 2002, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: FEALQ, 2002. p. 217-231.
- CAMARGO, F.A.O.; GIANELLO, C.; VIDOR, C. Comparative study of five hydrolytic methods in the determination of soil organic nitrogen compounds. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v. 28, p. 1303-1309, 1997.
- CARLESSO, R. Absorção de água pelas plantas: água disponível versus extraível e a produtividade das culturas. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 25, p. 183-188, 1995.
- CRAWFORD, N.M.; KAHN, M.L.; LEUSTEK, T.; LONG, S.R. Nitrogen and sulphur. In: BUCHANAN, B.B.; GRUISSEM, W.; JONES, R.L. (Ed.). **Biochemistry and molecular biology of plants**. Rockville: American Society of Plant Physiologists, 2000. chap. 16, p. 786-849.
- DE BONA, F.D.; MONTEIRO, F.A. Nitrogênio e enxofre na eficiência do uso da água pelo capim-marandu em estabelecimento. **Ecossistema**, Espírito Santo do Pinhal, v. 32, p. 17-22, 2008.
- DIJKSHOORN, W.; LAMPE, J.E.M. A method of diagnosing the sulphur nutrition status of herbage. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 13, p. 227-241, 1960.
- GONÇALVES, J.L.M.; MENDES, K.C.F.S.; SASAZAKI, C.M. Mineralização de nitrogênio em ecossistemas florestais naturais e implantados do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 601-616, 2001.
- GREGORY, P.J. Root growth and activity. In: BOOTE, K.J.; BENNETT, J.M.; SINCLAIR, T.R.; PULSEN, G.M. (Ed.). **Physiology and determination of crop yield**. Madison: ASA; CSSA; SSSA, 1994. chap. 4, p. 65-93.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo agropecuário 2006**. Rio de Janeiro, 2006. 146 p.

LAVRES JUNIOR, J.; MONTEIRO, F.A. Diagnose nutricional de nitrogênio no capim-aruaana em condições controladas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 829-837, 2006.

LAZZARINI NETO, S. **Manejo das pastagens**. 2. ed. Viçosa: Aprenda Fácil, 2000. 124 p.

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, p. 267-286, 1981.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2nd ed. London: Academic Press, 1995. 889 p.

MARY, B.; RECOUS, S.; DARWIS, D.; ROBIN, D. Interactions between decomposition of plant residues and nitrogen cycling in soil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 181, p. 71-82, 1996.

MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. **Principles of plant nutrition**. 4th ed. Bern: International Potash Institute, 1987. 687 p.

MENDEL, R.R. Biology of the molybdenum cofactor. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 8, p. 2289-2296, 2007.

NELSON, C.J.; VOLENEC, J.J. Environmental and physiological aspects of forage management. In: BARNES, R.F.; MILLER, D.A.; NELSON, C.J. (Ed.). **Forages: an introduction to grasslands agriculture**. Ames: Iowa State University Press, 1995. p. 55-69.

RAVEN, J.A.; EDWARDS, D. Roots: evolutionary origins and biochemical significance. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 52, p. 381-401, 2001.

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, p. 73-83, 1993.

SCHERER, H.W.; PACYNA, S.; SPOTH, K.R.; SCHULZ, M. Low levels of ferredoxin, ATP, and leghemoglobin contribute to limited N₂ fixation of peas (*Pisum sativum* L.) and alfalfa (*Medicago sativa* L.) under S deficiency conditions. **Biology and Fertility of Soils**, New York, v. 44, p. 909-916, 2008.

SILVA, D.J.; ALVAREZ VENEGAS, V.H.; RUIZ, H.A. Fluxo de massa e difusão de enxofre para raízes de milho em solos ácidos de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 109-114, 1998.

STEVENSON, F. **Cycles of soil carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur and micronutrients**. New York: John Wiley, 1985. 380 p.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.

2 FRAÇÕES ORGÂNICAS E INORGÂNICAS DE NITROGÊNIO E ENXOFRE NO SOLO EM FUNÇÃO DAS ADUBAÇÕES COM NITROGÊNIO E ENXOFRE PARA CAPIM-MARANDU

Resumo

O fracionamento do nitrogênio e do enxofre totais do solo é ferramenta importante para entender como as adubações com nitrogênio e enxofre afetam as frações desses nutrientes no solo e a contribuição dessas frações na disponibilidade de nutrientes para as plantas. Objetivou-se determinar o efeito da fertilização com nitrogênio e enxofre nas frações desses nutrientes no solo e correlacionar com as quantidades acumuladas pela *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. Dois experimentos foram conduzidos em casa de vegetação, de setembro a dezembro de 2008, utilizando-se um solo classificado como Neossolo Quartzarênico e tendo somente solo em um deles e solo com plantas em outro. Foram estudadas cinco doses de nitrogênio (0; 100; 200; 300 e 400 mg dm⁻³) combinadas com cinco doses de enxofre (0; 10; 20; 30 e 40 mg dm⁻³), em um fatorial 5² fracionado, com quatro repetições. O nitrogênio do solo foi determinado como nitrogênio total, nitrogênio orgânico, nitrogênio amoniacal e nitrogênio nítrico, nitrogênio total hidrolisável, nitrogênio amoniacal hidrolisável, nitrogênio na forma de aminoácidos e aminoaçúcares e nitrogênio orgânico não identificável, enquanto para o enxofre do solo foram determinados enxofre total, enxofre orgânico, enxofre-sulfato, enxofre-éster, enxofre ligado a carbono e enxofre residual. A quantidade acumulada de nitrogênio e enxofre no total de três cortes do capim-marandu, foi influenciada pelas adubações combinadas de doses de nitrogênio com doses de enxofre. A adubação com nitrogênio aumentou as frações inorgânicas de nitrato e amônio, nitrogênio total hidrolisável, nitrogênio amoniacal hidrolisável, nitrogênio na forma de aminoaçúcar e nitrogênio não identificado. A aplicação de doses de enxofre incrementou enxofre-éster e o enxofre residual do solo.

Palavras-chave: *Brachiaria brizantha*; Disponibilidade de nutrientes; Fracionamento

Abstract

Total nitrogen and total sulphur fractionation in the soil is an important to understand how nitrogen and sulphur fertilizations affects their soil fractions and the contribution of these soil fractions to the availability of these nutrients for plants. The objective was to determine the effect of the nitrogen and sulphur fertilization on their soil fractions and to correlate these fractions with nitrogen and sulfur content in *Brachiaria brizantha* cv. Marandu (Marandu palisadegrass). Two experiments were carried out at the same time under greenhouse from September to December 2008, in an Entisol to which five rates of nitrogen (0; 100; 200; 300 and 400 mg dm⁻³) were combined with five rates of sulphur (0; 10; 20; 30 and 40 mg dm⁻³) in a fractionated 5² factorial, with four replications. Soil nitrogen was determinaded as total nitrogen, organic nitrogen, ammonium, nitrate, hydrolyzable total nitrogen, hydrolyzable ammonium nitrogen, amino acids,

amino sugars and unidentified nitrogen and soil sulphur was determined as total sulphur, sulphate-sulphur, ester-sulphur, sulphur linked to carbon and residual sulphur. Nitrogen and sulphur content in the Marandu palisadegrass (sum of three harvests) was influenced by combined fertilization of nitrogen with sulphur. Nitrogen and sulphur fertilization increased inorganic fractions of nitrate and ammonium, hydrolyzable total nitrogen, hydrolyzable ammonium, amino sugars and unidentified nitrogen. Application of sulphur rates increased ester-sulphur, and residual sulphur in the soil.

Keywords: *Brachiaria brizantha*; Fertilizer; Fractionation; Nutrient availability

2.1 Introdução

O nitrogênio e o enxofre, dentre os nutrientes, têm destacada presença no sistema solo-planta: no solo são componentes da matéria orgânica (STEVENSON, 1986) e na planta são constituintes de aminoácidos que compõem a maioria das proteínas (CRAWFORD et al., 2000). Tem sido comprovado o aumento da produtividade das culturas com a aplicação simultânea do nitrogênio e enxofre. Brown et al. (2000) e Batista e Monteiro (2006) constataram que o fornecimento combinado de nitrogênio e enxofre na adubação aumentou a quantidade absorvida desses nutrientes do solo e a biomassa das plantas forrageiras.

A maior parte do nitrogênio e enxofre presente no solo encontra-se na forma orgânica, não prontamente disponível para as plantas, mas que pode ser mineralizada pela atividade dos micro-organismos do solo, em quantidade que raramente atende a necessidade da cultura em relação a esses nutrientes. Dessa maneira, a complementação da demanda das plantas torna-se imprescindível pela adubação. A mineralização do nitrogênio e do enxofre são dissociadas e com taxas diferenciadas (TABATABAI; AL-KHAFAJI, 1980). A mineralização do nitrogênio (CAMARGO; GIANELLO; VIDOR, 1997a) é dependente de diversos fatores que afetam a atividade biológica do solo, tais como: temperatura, umidade, aeração, pH do solo, quantidade e natureza do material orgânico e teor total de nitrogênio no solo. A mineralização do enxofre pode ser alterada pela atividade biológica (NASCIMENTO; MORELLI, 1980) ou por processos bioquímicos, via hidrólise enzimática de frações sulfuradas do tipo éster (SAKADEVAN; HEDLEY; MACKAY, 1993), sem a mediação da biomassa microbiana, o que sugere ser a intensidade de mineralização do enxofre menos dependente da disponibilidade de carbono no solo, em relação à do nitrogênio. Os ciclos do nitrogênio e do enxofre se assemelham, principalmente por possuírem diversos processos controlados por fatores biológicos e serem

afetados por condições climáticas difíceis de prever. Sendo assim, a disponibilidade desses nutrientes para as plantas pode ser subestimada, induzindo à deficiência, com prejuízos para o agricultor ou, superestimada, com riscos de poluição ambiental, devido às perdas de nitrato por lixiviação e de amônia por volatilização.

Para o melhor aproveitamento da adubação com nitrogênio e enxofre pelas culturas é necessário amplo entendimento da dinâmica desses nutrientes no solo. A quantificação das frações de nitrogênio e enxofre orgânico que contribuem para a mineralização permite o estabelecimento de quantidades adequadas de fertilizantes a serem aplicados para as culturas.

Com o conhecimento das frações de nitrogênio do solo pode-se obter melhor entendimento dos processos de imobilização/mineralização bem como um índice de disponibilidade desse nutriente para as plantas (OSBORNE, 1977). De uma forma geral, pequena fração do nitrogênio total do solo encontra-se prontamente disponível às plantas, nas formas de nitrato e amônio (BREMNER, 1996), com predomínio no solo da última, em condições de aerobiose. Vários métodos têm sido propostos para quantificar o nitrogênio orgânico no solo, e dentre eles, os fracionamentos químicos baseados na hidrólise do solo com ácidos e aquecimento da amostra sob refluxo. As frações identificáveis quimicamente no hidrolisado do solo são: nitrogênio total hidrolisável; nitrogênio amoniacal hidrolisável (que corresponde em parte ao nitrogênio orgânico do solo solúvel em ácido) e o amônio fixado às argilas (STEVENSON, 1996) e aminoácidos e aminoaçúcares, que representam o compartimento biológico no qual se estabelecem os processos de imobilização e mineralização. A fração de nitrogênio não hidrolisável, obtida da subtração do nitrogênio total hidrolisável do nitrogênio total do solo, corresponde à fração do nitrogênio resistente à hidrólise ácida, de natureza não protéica (SCHNITZER; HINDLE, 1981). Reddy et al. (2003) observaram que as frações nitrogênio total hidrolisável, nitrogênio amoniacal hidrolisável, aminoácidos e hexoseaminas apresentaram coeficientes de correlação superiores a 0,95 com o nitrogênio mineralizado, em experimento de incubação aeróbia, indicando que essas frações seriam fontes potencialmente disponíveis de nitrogênio. Além disso, as frações facilmente hidrolisáveis do nitrogênio orgânico (N-aminoácidos, N-aminoaçúcares e N-amida) são mais sensíveis na avaliação do impacto do uso dos solos do que o teor de nitrogênio total e, dessa forma, as frações podem ser utilizadas para diferenciar os estágios de degradação biológica do solo (GONZÁLEZ-PRIETO et al., 1997).

De forma semelhante ao nitrogênio, apenas uma pequena fração do enxofre no solo, que se encontra na forma do íon SO_4^{2-} pode ser absorvida pelas plantas. A forma orgânica de enxofre pode ser dividida com base na susceptibilidade em duas frações: (1) enxofre reduzível por HI (enxofre-éster + enxofre-sulfato), que constituem aproximadamente 50% do S-orgânico e (2) enxofre ligado a carbono (S-C), a qual pode ser dividida em outras duas frações: (a) enxofre ligado a carbono reduzível por liga de Raney-Ni e (b) enxofre inerte ou residual (STEVENSON, 1986). As frações de enxofre-éster e enxofre ligado a carbono tem sido apontadas como as que mais contribuem indiretamente para o suprimento de enxofre às plantas (FRENEY; MELVILLE; WILLIAMS, 1975). A baixa concentração de enxofre-sulfato na solução do solo estimula a mineralização do enxofre da fração enxofre-éster do solo, enquanto que o aumento da atividade microbiana resulta em incremento na mineralização da fração de enxofre ligado a carbono (McGILL; COLE, 1981).

Diante dessas considerações, objetivou-se determinar as frações de nitrogênio e enxofre no solo e correlacioná-las com as quantidades acumuladas desses nutrientes pelo capim-marandu, em solo submetido às adubações combinadas de nitrogênio com enxofre.

2.2 Material e métodos

Dois experimentos foram conduzidos em casa de vegetação, ao mesmo tempo, um com e outro sem a *Brachiaria brizantha* cv. Marandu (capim-marandu), em Piracicaba, São Paulo, Brasil, no período de setembro a dezembro de 2008. O solo utilizado foi classificado como Neossolo Quartzarênico e a amostra foi coletada na camada de 0 a 20 cm, seca ao ar, passada em peneira de 4 mm de abertura de malha, homogeneizada e submetida à análise para caracterização química, conforme método descrito em Raij et al. (2001), obtendo-se os seguintes resultados: P resina = 3 mg dm^{-3} ; MO = 9,5 g dm^{-3} ; pH em CaCl_2 = 4,0; K^+ = 2,3 mmol_c dm^{-3} ; Ca^{2+} = 6 mmol_c dm^{-3} ; Mg^{2+} = 2 mmol_c dm^{-3} ; Al^{3+} = 8 mmol_c dm^{-3} ; H+Al = 40 mmol_c dm^{-3} ; CTC a pH 7,0 = 50,3 mmol_c dm^{-3} ; Soma de bases (SB) = 10,3 mmol_c dm^{-3} ; saturação por bases (V) = 20%. Os teores iniciais de N-total, N-orgânico, N-NH_4^+ , N-NO_3^- , N-total hidrolisável, NH_4^+ hidrolisável, N-aminoaçúcar e N-aminoácido do solo foram de: 400; 394; 2,2; 3,4; 307; 3,2; 53 e 61 mg kg^{-1} , respectivamente. As frações de enxofre do solo original representadas pelo S-total, S-orgânico, S-

sulfato, S-éster, S-ligado a carbono e S-residual apresentaram os seguintes teores: 49,8; 47,2; 2,6; 16,3; 13,2 e 17,7 mg kg⁻¹, respectivamente.

Foram estudadas as combinações de cinco doses de nitrogênio (0; 100; 200; 300; e 400 mg dm⁻³) com cinco doses de enxofre (0; 10; 20; 30; e 40 mg dm⁻³), em fatorial 5² fracionado, de acordo com Littell e Mott (1975). As 13 combinações entre essas doses foram: 0-0; 0-20; 0-40; 100-10; 100-30; 200-0; 200-20; 200-40; 300-10; 300-30; 400-0; 400-20 e 400-40 mg dm⁻³, as quais foram distribuídas em bloco ao acaso, com quatro repetições. O nitrogênio foi fornecido como nitrato de amônio (NH₄NO₃) e o enxofre como sulfato de cálcio (CaSO₄.2H₂O), ambos reagentes para análises.

Foram transferidos 4,2 dm³ de solo (densidade = 1,35 kg dm⁻³) para vasos plásticos com capacidade para 5,2 dm³ e em seguida foi fornecida ao solo uma mistura de carbonato de cálcio com carbonato de magnésio, na proporção de Ca: Mg de 1,5:1,0, em quantidades obtidas com o uso da fórmula V₂ para cálculo da calagem igual a 50%. Os vasos foram umedecidos com água desionizada e mantidos pelo período de 35 dias para reação dos corretivos aplicados.

A adubação de base para estabelecimento da pastagem foi fornecida em ambos os experimentos para suprir fósforo (CaH₂PO₄ e KH₂PO₄) de 200 mg dm⁻³, potássio (KH₂PO₄ e KCl) de 150 mg dm⁻³, magnésio (MgCl₂.6H₂O) de 50 mg dm⁻³, boro (H₃BO₃) de 1,5 mg dm⁻³, cobre (CuCl₂.2H₂O) de 2,5 mg dm⁻³, zinco (ZnCl₂) de 2,0 mg dm⁻³ e molibdênio (Na₂MoO₄.2H₂O) de 0,25 mg dm⁻³ e a quantidade de cálcio foi igualada em todos os vasos. A umidade dos vasos foi mantida por um sistema auto-irrigante subsuperficial, montado no experimento conforme descrito por Bonfim-Silva, Monteiro e Silva (2007).

Três cortes foram realizados nas plantas, nos seguintes períodos de crescimento: 35 dias após o transplântio das mudas, 28 dias após o primeiro corte das plantas e 27 dias após o segundo corte. Após o primeiro e segundo períodos de crescimento, doses de nitrogênio, doses de enxofre, potássio (KCl) de 150 mg dm⁻³ e magnésio (MgCl₂.6H₂O) de 20 mg dm⁻³ foram aplicadas em ambos os experimentos para manter a relação Ca:Mg. A parte aérea e as raízes das plantas foram cortadas, secadas a 70 °C até massa constante e moídas para as determinações químicas.

A amostragem de solo foi realizada nas unidades experimentais sem capim-marandu e após o terceiro cortes das plantas. As amostras de solo foram coletadas em duplicatas, sendo uma das amostras armazenada em freezer a -20 °C para a determinação do nitrogênio inorgânico e a

outra amostra foi seca, homogeneizada e passada em peneira de malha de 2 mm para a determinação das frações de nitrogênio e enxofre.

Dividiu-se em duas etapas o fracionamento do nitrogênio. Na primeira etapa determinaram-se o N-total e N-inorgânico (N-NH_4^+ e N-NO_3^-) no Brasil e a segunda etapa com o fracionamento do nitrogênio utilizando o método da difusão foi realizado nas dependências do “Range Cattle Research and Education Center” da Universidade da Flórida, na cidade de Ona, Estado da Flórida, Estados Unidos da América.

Para a determinação do N-total e do N-inorgânico (N-NH_4^+ e N-NO_3^-) foram empregados os métodos descritos em Cantarella e Trivelin (2001). O N-total hidrolisável, N-NH_4^+ hidrolisável, N-aminoácidos, N-aminoaçúcares e N-não identificado foram determinados nos hidrolisados de solo, conforme o método da difusão descrito em Mulvaney e Khan (2001). O N-orgânico foi calculado pela diferença entre o N-total e o N-inorgânico.

O hidrolisado de solo foi preparado conforme procedimentos descritos em Mulvaney et al. (2001). Em erlenmeyer de 125 mL foram adicionados 5 g de solo, 20 mL de HCl 6 mol L⁻¹ e duas gotas de álcool octil. A mistura foi aquecida à temperatura de 110-120°C sob refluxo por 12 horas e, em seguida, filtrada com papel de filtro Whatman 50. O extrato foi neutralizado com a adição de NaOH 10 mol L⁻¹ para a obtenção de pH entre 6,5 e 6,8 e completado com água desionizada em balão volumétrico de 50 mL. Cada amostra de solo foi preparada com três repetições.

O fracionamento do enxofre do solo foi realizado de acordo com Tabatabai (1982), obtendo-se quatro frações: enxofre-sulfato (enxofre mineral em solução e adsorvido); enxofre-éster (enxofre orgânico reduzível por HI menos o enxofre-sulfato); enxofre ligado a carbono (enxofre orgânico reduzível por liga de Raney-Ni) e enxofre orgânico residual (enxofre orgânico não reduzível por HI e nem por liga de Raney-Ni). O enxofre-sulfato foi extraído com solução de $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 0,01 mol L⁻¹ e quantificado por turbidimetria (TABATABAI; BREMNER, 1970).

Todas as variáveis estudadas foram analisadas estatisticamente por meio do emprego do programa Statistical Analysis System (SAS, 2000). A análise variância e de regressão com ajuste aos modelos de primeiro e segundo graus foi realizada pelo PROC GLM. No caso de significância da interação doses de nitrogênio x doses de enxofre utilizou-se o PROC RSREG. As quantidades acumuladas de nitrogênio e enxofre pelas plantas em cada corte foram somadas para os três cortes e a quantidade total acumulada foi correlacionada com cada fração de nitrogênio e enxofre do solo por meio do PROC CORR.

2.3 Resultados e discussão

A quantidade acumulada de nitrogênio pelo capim-marandu foi influenciada positivamente pela adubação simultânea de doses de nitrogênio e doses de enxofre, sendo que a maior quantidade acumulada de nitrogênio foi verificada com as mais altas doses de nitrogênio e doses de enxofre aplicadas (Tabelas 1 e 2). Assim, a proporção de N:S na adubação influenciou diretamente a resposta das plantas, sendo que, ao se elevar a dose de nitrogênio na adubação, foi necessário aumentar a dose de enxofre, correspondentemente, para se garantir o equilíbrio desses nutrientes no interior da planta. Isso pode ser explicado pela interdependência da rota bioquímica desses nutrientes na produção de proteínas (CRAWFORD et al., 2000). Por sua vez, Brown et al. (2000) e Batista e Monteiro (2006) verificaram que o fornecimento simultâneo de nitrogênio e enxofre na adubação aumentou a quantidade acumulada desses nutrientes do solo e a biomassa das plantas forrageiras.

O teor de N-total do solo aumentou com aplicação das doses de nitrogênio (Tabelas 1 e 2) e foi verificada alta correlação desse teor com a quantidade absorvida de nitrogênio pelas plantas ($r = 0,93^{**}$, Tabela 3). A correlação entre o teor de N-total no solo e a quantidade acumulada de nitrogênio pelas plantas é frequentemente relatada na literatura (SAMPAIO et al., 1995; GIANELLO et al., 2000; YAGI, 2008). No entanto, no presente experimento, essa relação deve ser interpretada como acúmulo das formas inorgânicas ($\text{N-NH}_4^+ + \text{N-NO}_3^-$) fornecidas via adubação, uma vez que não houve alteração no teor de N-orgânico do solo (Tabela 1) com o emprego dos fertilizantes.

O aumento da disponibilidade de nitrogênio inorgânico (N-NH_4^+ e N-NO_3^-) no solo era esperado, uma vez que foi utilizada fonte solúvel desse nutriente na adubação (Tabelas 1 e 2). Os teores altos de N-NH_4^+ e de N-NO_3^- no solo são justificados, como já mencionados, em consequência do acúmulo dessas formas, resultante das adubações realizadas no início do experimento e após o primeiro e o segundo cortes, da ausência de plantas nos vasos e da não ocorrência de perdas por lixiviação do NO_3^- ou da provável não volatilização de NH_3 . Os teores de N-NO_3^- e de N-NH_4^+ no solo foram altamente correlacionados com a quantidade acumulada de nitrogênio pelo capim-marandu ($0,94^{**}$ e $0,94^{**}$, respectivamente, Tabela 3), uma vez que essas são as formas absorvidas pelas plantas. O efeito da adubação nitrogenada na disponibilidade do nutriente no solo tornou-se mais evidente quando considerada a sua proporção em relação ao N-

total. Nas combinações que não receberam nitrogênio, 4,6% do nitrogênio do solo encontravam-se na forma inorgânica, enquanto que na dose em que o nitrogênio foi aplicado na dose de 400 mg dm⁻³ por corte, a proporção foi de 68,7%, o que é valor bem mais elevado do que os 5% normalmente verificados em solos agrícolas (BREMNER, 1996). Em condições em que não há limitação de oxigênio no solo, a forma inorgânica de nitrogênio que normalmente predomina é a nítrica, uma vez que o N-NH₄⁺ é rapidamente convertido a N-NO₃⁻ por micro-organismos nitrificadores. Entretanto, o N-NH₄⁺ no solo alcançou teor médio de 311 mg kg⁻¹ com a aplicação da dose de nitrogênio de 400 mg dm⁻³ por corte. O elevado teor de N-NH₄⁺ pode ser justificado pelo aumento da condutividade elétrica do solo (valores de 0,15 a 3,4 mS cm⁻¹) provocado pelas adubações realizadas durante o experimento, o que pode ter inibido ou afetado a velocidade de nitrificação. De acordo com Malhi e McGill (1982), a taxa de nitrificação está diretamente relacionada à quantidade de amônio no solo, sendo que teores elevados dessa forma de nitrogênio podem inibir a nitrificação pelo efeito adverso da salinidade nas bactérias nitrificadoras (LAURA, 1977).

O teor de nitrogênio total hidrolisável (N-total H) foi influenciado positivamente pelas doses de nitrogênio (Tabelas 1 e 2) e esse aumento se deve ao acúmulo do N-NH₄⁺ proveniente das adubações com nitrato de amônio. A proporção do N-total H em relação ao N-total variou de 43,4 a 70,1%, valores inferiores aos 65-75% obtidos por Osborne (1977) em seis solos de Nova Gales do Sul, na Austrália e aos 75-85% observados por Dormaar, Smoliak e Willms (1990) em solo do Canadá sob pastejo intensivo.

O teor do nitrogênio amoniacal hidrolisável (N-NH₄⁺ H) aumentou linearmente com as doses de nitrogênio aplicadas ao solo (Tabelas 1 e 2). Essa fração representou 5,6 e 31,8% do N-total H nas condições em que não foi aplicado o nitrogênio e naquela de 400 mg dm⁻³ por corte, respectivamente. A maior proporção do N-NH₄⁺ H em relação ao N-total H com o aumento das doses de nitrogênio pode ser explicado pela contribuição do N-NH₄⁺ aplicado como nitrato de amônio. Dessa forma, assim como verificado para o teor de N-NH₄⁺, essa fração mostrou alta correlação com as quantidades acumuladas de nitrogênio e enxofre ($r = 0,94^{**}$ e $0,80^{**}$, respectivamente, Tabela 3) pela gramínea forrageira.

A fração de N-aminoaçúcar (N-AAc) foi incrementada com o aumento das doses de nitrogênio (Tabelas 1 e 2). Os teores de N-AAc no solo, determinados pela técnica da difusão, variaram de 73 a 227 mg kg⁻¹ e os valores foram bem mais elevados do que os obtidos em alguns

outros trabalhos (DORMAAR; SMOLIAK; WILLMS, 1990; REDDY et al., 2003; LU et al., 2009), que determinaram essa fração com a utilização de solução de tampão fosfato-borato e por destilação a vapor. No entanto, o uso dessa solução tampão diminui a recuperação de aminoácidos devido a reação destes com o tetraborato (Mulvaney e Khan, 2001). O uso da

Tabela 1 - Quantidade acumulada de nitrogênio pelo capim-marandu (experimento solo + planta) e frações de nitrogênio do solo (experimento sem planta) em função das adubações com nitrogênio e enxofre

Formas de nitrogênio no solo ^a										
Combinação N e S	N acum	N-total	N-org	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	Hidrolisado de solo				
						N-total H	N-NH ₄ ⁺ H	N-AAc	N-AA	N-NI
	mg/vaso	mg kg ⁻¹								
N ₀ S ₀	162	395	377	8	10	277	14	89	55	109
N ₀ S ₂₀	191	407	388	12	7	266	14	84	65	103
N ₀ S ₄₀	156	403	386	11	7	279	18	83	70	109
N ₁₀₀ S ₁₀	837	652	380	188	84	309	76	78	62	93
N ₁₀₀ S ₃₀	950	630	351	184	95	358	100	97	72	89
N ₂₀₀ S ₀	1166	896	418	299	179	408	115	73	69	151
N ₂₀₀ S ₂₀	1763	874	427	283	163	476	109	147	78	142
N ₂₀₀ S ₄₀	1805	869	418	276	175	420	105	135	70	110
N ₃₀₀ S ₁₀	2301	1074	423	446	205	511	160	170	74	108
N ₃₀₀ S ₃₀	2441	1080	407	443	230	549	116	162	77	194
N ₄₀₀ S ₀	1862	1343	438	599	306	613	186	227	58	141
N ₄₀₀ S ₂₀	2792	1311	389	594	328	630	176	205	55	194
N ₄₀₀ S ₄₀	2938	1296	408	589	299	563	209	138	58	158
Média	1490	864	435	302	161	435	107	131	66	131
Efeito N x S ^b	INT (NS)	N (LIN)	ns	N (LIN)	N (LIN)	N (LIN)	N (LIN)	N (LIN)	ns	N (LIN)

^a Quantidade acumulada de nitrogênio total, na soma de três cortes (N acum), nitrogênio total (N-total), nitrogênio orgânico (N-org), nitrogênio na forma nítrica (N-NO₃⁻), nitrogênio na forma amoniacal (N-NH₄⁺), nitrogênio total hidrolisável (N-total H), nitrogênio amoniacal hidrolisável (N-NH₄⁺ H), nitrogênio na forma de aminoácido (N-AAc), nitrogênio na forma de aminoácidos (N-AA) e nitrogênio em formas não identificadas (N-NI) do solo sem planta

^b INT: interação significativa; LIN: ajuste dos resultados ao modelo linear. Entre parênteses: fator da combinação nitrogênio e enxofre que influenciou significativamente a variável resposta e ns: não significativo.

Tabela 2 - Equações de regressão referentes aos efeitos das adubações com nitrogênio e enxofre na quantidade acumulada de nitrogênio pelo capim-marandu e nas frações do nitrogênio do solo

Variáveis	Equações de regressão	R ²
N acum ^a	$y = 42,606 + 7,166 **N - 0,006 **N^2 + 0,064 **NS + 24,215 **S - 0,598 **S^2$	0,96**
N-total	$y = 409,537 + 2,271 **N$	0,99**
N-NO ₃ ⁻	$y = 15,393 ** + 1,435 **N$	0,99*
N-NH ₄ ⁺	$y = 12,357 ** + 0,741 **N$	0,99**
N-total H	$y = 266,749 ** + 0,842 **N$	0,92**
N-NH ₄ ⁺ H	$y = 25,228 ** + 0,411 **N$	0,94**
N-AAc	$y = 75,977 ** + 0,273 **N$	0,54**
N-NI	$y = 97,666 ** + 0,166 *N$	0,63*

^a Quantidade acumulada de nitrogênio total, na soma de três cortes (N acum), nitrogênio total (N-total), nitrogênio orgânico (N-org), nitrogênio na forma nítrica (N-NO₃⁻), nitrogênio na forma amoniacal (N-NH₄⁺), nitrogênio total hidrolisável (N-total H), nitrogênio amoniacal hidrolisável (N-NH₄⁺ H), nitrogênio na forma de aminoácido (N-AAc), nitrogênio na forma de aminoácidos (N-AA) e nitrogênio em formas não identificadas (N-NI).

ns, * e ** não significativo e significativo a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente.

solução de NaOH e da técnica de difusão proposta por Mulvaney e Khan (2001), em substituição ao tampão fosfato-borato, e a destilação a vapor, promoveram aumento de 74 a 317% na quantidade de aminoaçúcares em hidrolisados de solos. Em 18 solos dos Estados Unidos, coletados em condições diversas de manejo, Mulvaney et al. (2001) encontraram teores de N-AAc de 46 a 511 mg kg⁻¹ (muito mais próximo ao do presente trabalho). Além disso, aumentos na fração N-AAc podem estar relacionados ao fato do adubo nitrogenado ter estimulado a população microbiana do solo, com consequente aumento da formação de paredes de células bacterianas, as quais contêm N-acetil-glucosamina (PARSONS, 1981). Essa fração de N-AAc se correlacionou positivamente com a quantidade acumulada de nitrogênio e enxofre ($r = 0,75^{**}$ e $0,67^{*}$, respectivamente, Tabela 3) pela gramínea forrageira.

O aumento nas doses de nitrogênio e de enxofre não influenciou o teor de N-aminoácido (N-AA) no solo (Tabelas 1) e essa fração não se correlacionou com as quantidades acumuladas de nitrogênio e de enxofre pelo capim-marandu (Tabela 3). Por outro lado, Reddy et al. (2003) verificaram que a adubação com nitrogênio e enxofre por 30 anos aumentou o teor de N-AA em 118% em relação à não aplicação de nitrogênio e enxofre e que essa fração apresentou, alta correlação ($r = 0,97^{**}$) com o nitrogênio mineralizado em incubação aeróbia. As frações facilmente hidrolisáveis (N-aminoácidos, N-aminoaçúcares e N-amida) são os compartimentos mais ativos de nitrogênio no solo e a principal fonte de nitrogênio potencialmente disponível para as plantas (GONZÁLEZ-PRIETO et al., 1997).

Oa fração do nitrogênio não identificável (N-NI) aumentou linearmente com as doses de nitrogênio, correspondendo a aproximadamente 30% do nitrogênio hidrolisável (N-total H) do solo (Tabela 1). Essa relativamente elevada porcentagem é consequência da formação de compostos orgânicos nitrogenados complexos, com abundantes estruturas aromáticas (SCHULTEN; SCHNITZER, 1998), que dificultam a hidrólise e modificam os produtos finais. Essa fração (N-NI) se correlacionou significativamente com a quantidade acumulada de nitrogênio e enxofre ($r = 0,71^{**}$ e $0,64^{*}$, respectivamente, Tabela 3) pelo capim-marandu.

De maneira similar ao nitrogênio, a quantidade acumulada de enxofre pelas plantas foi influenciada positivamente pela adubação simultânea com esses nutrientes (Tabelas 4 e 5). Kalmbacher et al. (2005) também verificaram significância da interação doses de nitrogênio $\times$ doses de enxofre na absorção de enxofre do solo pela espécie *Paspalum notatum*. Na combinação das mais elevadas doses de nitrogênio e de enxofre (N₄₀₀S₄₀), observou-se aumento de nove vezes

Tabela 3 - Coeficientes de correlação de Pearson entre quantidade acumulada de nitrogênio e enxofre pelo capim-marandu (experimento solo + planta) e as frações de nitrogênio e de enxofre no solo (experimento sem planta)

	N abs	N-total	N-org	N-NO ₃ ⁻	N-NH ₄ ⁺	N-total H	N-NH ₄ ⁺ H	N-AAc	N-AA	N-NI	S abs	S-tot	S-org	S-SO ₄ ²⁻	S-éster	S-lig C	S-res
N abs ^a	-	0,93**	0,51 ^{ns}	0,94**	0,94**	0,93**	0,91**	0,75**	0,02 ^{ns}	0,71**	0,94**	0,03 ^{ns}	-0,13 ^{ns}	0,18 ^{ns}	-0,08 ^{ns}	-0,62*	-0,00 ^{ns}
N-total		-	0,61*	0,99**	0,99**	0,98**	0,97**	0,83**	-0,14 ^{ns}	0,71**	0,82**	-0,05 ^{ns}	-0,05 ^{ns}	-0,04 ^{ns}	-0,20 ^{ns}	-0,72**	0,24 ^{ns}
N-org			-	0,56*	0,57*	0,59*	0,52 ^{ns}	0,55 ^{ns}	0,19 ^{ns}	0,39 ^{ns}	0,51 ^{ns}	-0,03 ^{ns}	0,11 ^{ns}	-0,18 ^{ns}	-0,27 ^{ns}	-0,10 ^{ns}	0,54 ^{ns}
N-NO ₃ ⁻				-	0,99**	0,99**	0,97**	0,82**	-0,15 ^{ns}	0,69**	0,83**	-0,07 ^{ns}	-0,08 ^{ns}	-0,04 ^{ns}	-0,20 ^{ns}	-0,74**	0,19 ^{ns}
N-NH ₄ ⁺					-	0,99**	0,96**	0,81**	-0,16 ^{ns}	0,74**	0,84**	-0,01 ^{ns}	-0,03 ^{ns}	0,01 ^{ns}	-0,16 ^{ns}	-0,75**	0,29 ^{ns}
N-total H						-	0,92**	0,89**	-0,08 ^{ns}	0,76**	0,84**	-0,02 ^{ns}	-0,04 ^{ns}	0,01 ^{ns}	-0,17 ^{ns}	-0,68*	0,18 ^{ns}
N-NH ₄ ⁺ H							-	0,74**	-0,13 ^{ns}	0,56*	0,80**	0,02 ^{ns}	0,05 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	-0,79**	0,22 ^{ns}
N-AAc								-	0,15 ^{ns}	0,57*	0,67*	-0,04 ^{ns}	0,01 ^{ns}	-0,07 ^{ns}	-0,18 ^{ns}	-0,45 ^{ns}	0,23 ^{ns}
N-AA									-	-0,08 ^{ns}	0,24 ^{ns}	0,19 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,25 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,37 ^{ns}	-0,09 ^{ns}
N-NI										-	0,64*	-0,10 ^{ns}	-0,28 ^{ns}	0,11 ^{ns}	-0,28 ^{ns}	-0,51 ^{ns}	-0,05 ^{ns}
S abs											-	0,20 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	0,33 ^{ns}	0,04 ^{ns}	-0,48 ^{ns}	-0,02 ^{ns}
S-tot												-	0,79**	0,80**	0,92**	0,08 ^{ns}	0,01 ^{ns}
S-org													-	0,27 ^{ns}	0,76**	0,14 ^{ns}	0,50 ^{ns}
S-SO ₄ ²⁻														-	0,77**	0,14 ^{ns}	-0,49 ^{ns}
S-éster															-	0,06 ^{ns}	-0,22 ^{ns}
S-lig C																-	-0,17 ^{ns}
S-res																	-

^a Quantidade acumulada de nitrogênio pelo capim-marandu (N abs), nitrogênio total (N-total), nitrogênio orgânico (N-org), nitrogênio na forma nítrica (N-NO₃⁻), nitrogênio na forma amoniacal (N-NH₄⁺), nitrogênio total hidrolisável (N-total H), nitrogênio amoniacal hidrolisável (N-NH₄⁺ H), nitrogênio na forma de aminoaçúcar (N-AAc), nitrogênio na forma de aminoácidos (N-AA), nitrogênio em formas não identificadas (N-NI), quantidade acumulada de enxofre pelo capim-marandu (S abs), enxofre total (S-tot), enxofre orgânico (S-org), enxofre-sulfato (S-SO₄²⁻), enxofre éster (S-éster), enxofre ligado a carbono (S-lig C) e enxofre orgânico residual (S-res).
ns; * e **8: não significativo; significativo a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente.

na quantidade acumulada de enxofre, em relação à combinação que não recebeu adubação (N_0S_0). A quantidade acumulada de enxofre pelo capim-marandu não se correlacionou com qualquer das frações orgânica ou inorgânica do enxofre no solo, mas sim com a quantidade acumulada de nitrogênio e com os teores de nitrogênio total, nitrato, amônio, nitrogênio total hidrolisável, nitrogênio na forma de aminoácúcar e nitrogênio não identificável (Tabela 3).

Tabela 4 - Quantidade acumulada de enxofre pelo capim-marandu (no experimento solo + planta) frações de enxofre do solo (experimento sem planta) em função das adubações com nitrogênio e enxofre

Combinação		Formas de enxofre no solo ^a					
N e S	S acum	S-total	S-org	S-SO ₄ ²⁻	S-éster	S-lig C	S-res
	mg/vaso	mg kg ⁻¹					
N ₀ S ₀	34	90	82	9	42	13	27
N ₀ S ₂₀	53	134	84	49	58	13	13
N ₀ S ₄₀	45	168	102	66	81	15	6
N ₁₀₀ S ₁₀	130	115	86	29	37	13	36
N ₁₀₀ S ₃₀	157	169	116	53	92	10	14
N ₂₀₀ S ₀	127	105	92	14	34	10	48
N ₂₀₀ S ₂₀	251	199	140	59	79	13	48
N ₂₀₀ S ₄₀	236	185	109	76	81	13	15
N ₃₀₀ S ₁₀	214	82	67	15	33	12	22
N ₃₀₀ S ₃₀	287	94	46	47	27	12	7
N ₄₀₀ S ₀	179	124	116	7	42	10	64
N ₄₀₀ S ₂₀	261	141	83	57	54	9	20
N ₄₀₀ S ₄₀	267	162	97	65	80	9	8
Média	173	136	94	42	57	12	25
Efeito N x S ^b	INT (NS)	LIN (S)	ns	QUAD (S)	LIN (S)	Ns	LIN (S)

^a Enxofre acumulado pela planta (S abs), enxofre total (S-tot), enxofre orgânico (S-org), enxofre na forma de sulfato (S-SO₄²⁻), enxofre na forma de éster (S-éster), enxofre ligado ao carbono (S-lig C) e enxofre orgânico residual (S-res).

^b INT: interação significativa; LIN: ajuste dos resultados ao modelo linear; QUAD: ajuste dos resultados ao modelo quadrático. Entre parênteses: fator da combinação nitrogênio e enxofre que influenciou significativamente a variável resposta e ns: não significativo.

A maior parte do enxofre nos solos agrícolas se encontra na forma orgânica (SAGGAR et al., 1998), pois, diferentemente do enxofre inorgânico, o orgânico (S-org) é insolúvel em água e não é passível de perda por lixiviação. A fração de enxofre orgânico no solo em relação representando aproximadamente 88% do enxofre total do solo foi bem mais expressiva do que a fração de enxofre-sulfato (Tabelas 4 e 5), como era de se esperar. Esse resultado relativamente próximo dos 98% observados por Solomon et al. (2001) em solos da Etiópia. A maior proporção das formas orgânicas implica na necessidade de conversão das mesmas à inorgânica, uma vez que as primeiras não são disponíveis para pronta absorção pelas raízes. Essa conversão pode ocorrer por meio de processos bioquímicos (hidrólise do S-éster pelas sulfatases) ou pela atividade de micro-organismos (mineralização do enxofre) (CASTELLANO; DICK, 1991). O enxofre orgânico não apresentou correlação significativa com as quantidades acumuladas de enxofre e

nitrogênio pelo capim-marandu, mas verificou-se correlação com o teor de enxofre total e com enxofre-éster ($r = 0,79^{**}$ e $0,76^{**}$, respectivamente, Tabela 3).

Tabela 5 - Equações de regressão referentes à quantidade acumulada de enxofre pelo capim-marandu e as frações de enxofre do solo sem planta, em função das adubações com nitrogênio e enxofre

Variáveis	Equações de regressão	R ²
S abs ^a	$y = 13,128 + 0,999^{**}N - 0,002^{**}N^2 + 0,005^{**}NS + 4,538^{**}S - 0,093^{**}S^2$	0,94 ^{**}
S-tot	$y = 103,262^{**} + 1,633^{**}S$	0,64 ^{**}
S-SO ₄ ²⁻	$y = 8,704^{**} + 2,325^{**}S - 0,021^{*}S^2$	0,92 ^{**}
S-éster	$y = 35,775^{**} + 1,066^{**}S$	0,83 ^{**}
S-res	$y = 43,136^{**} - 0,767^{**}S$	0,57 ^{**}

^a Enxofre acumulado pela planta (S abs), enxofre total (S-total), enxofre orgânico (S-org), enxofre-sulfato (S-SO₄²⁻), enxofre na forma de éster (S-éster), enxofre ligado ao carbono (S-lig C) e enxofre orgânico residual (S-residual).

ns, * e **: Não significativo e significativo a 5 e 1% de probabilidade, respectivamente.

O teor de enxofre-sulfato no solo aumentou com a aplicação de enxofre, apresentando valores de 7 a 76 mg kg⁻¹ de solo (Tabelas 4 e 5). Considerando o teor médio de enxofre-sulfato de 10 mg kg⁻¹ nas combinações que não receberam doses de enxofre e o teor na amostra inicial de 2,6 mg kg⁻¹, verifica-se aumento de aproximadamente quatro vezes na forma disponível do elemento no solo ao final do experimento. O aumento da disponibilidade desse nutriente, como sulfato, pode ser atribuído à indução da atividade microbiana e à mineralização da matéria orgânica do solo devido à secagem e peneiramento do solo após a coleta, correção da acidez do solo, re-umedecimento e incubação do solo em condições ótimas de temperatura e umidade (STANFORD; SMITH, 1972; SAHRAWAT, 1982; CABRERA; KISSEL, 1988; MARSCHNER, 1993; CAMARGO; GIANELLO; VIDOR, 1997b). De acordo com McGill e Cole (1981), a mineralização do enxofre no solo ocorre biologicamente quando a forma inorgânica é um subproduto da oxidação de compostos orgânicos (S ligado a C) a CO₂, devido à necessidade de energia por parte dos micro-organismos. Além disso, a mineralização do enxofre pode ser bioquímica, quando o enxofre inorgânico é liberado das formas orgânicas (ésteres de sulfato) por meio de catálise enzimática externa às células da membrana e controlada pelo suprimento e pela necessidade de enxofre inorgânico.

No presente experimento, a fração de enxofre-éster (S-éster) participou com aproximadamente 42% no enxofre total do solo, o que está próximo do verificado por Yang e Shing, (2007), que relataram contribuição na faixa de 43 a 52%. A aplicação de enxofre ao solo aumentou de forma linear a fração de enxofre-éster (Tabelas 4 e 5) e essa fração é uma das que mais contribuem indiretamente ao suprimento de enxofre às plantas (NEPTUNE; TABATABAI;

HANWAY, 1975). Não foi observada correlação significativa entre o teor de enxofre-éster e as quantidades acumuladas de enxofre e de nitrogênio pelo capim-marandu (Tabela 3).

A fração do enxofre ligado a carbono (S-lig C) não foi afetada significativamente pelas combinações de doses de nitrogênio e de enxofre, participando contribuindo com apenas 8,8% do enxofre total (Tabelas 4 e 5). Castellano e Dick (1991) não encontraram diferenças significativas do tipo de vegetação e da fertilização com enxofre na fração de enxofre ligado a carbono (S-lig C). Essa fração está relacionada à atividade de micro-organismos, porém fazendo parte da forma constitutiva da biomassa microbiana, diferentemente do enxofre-éster que faz parte da forma de armazenamento, sendo mais facilmente afetado pelo excesso de enxofre-sulfato no solo. Assim, essa fração só varia com o fluxo da atividade microbiana, ou seja, aumenta ou diminui conforme a necessidade de carbono dos micro-organismos no solo. Apesar das doses de nitrogênio e enxofre estimularem a mineralização da matéria orgânica, aumentando a atividade dos micro-organismos, ela não foi suficiente para alterar significativamente essa fração de enxofre. Também, os aminoácidos contendo enxofre são facilmente degradados em solos aeróbios (FITZGERALD, 1978), não se acumulando sob a forma livre. Lee e Speir (1979), de modo similar ao obtido no presente experimento, não observaram correlação significativa do enxofre ligado a carbono com a a quantidade acumulada de enxofre pela planta, embora seja mineralizado da fração orgânica (LI; LIN; ZHOU, 2001). Essa fração se correlacionou significativamente e de forma negativa (-0,62*, Tabela 3) com a quantidade acumulada de nitrogênio pela gramínea forrageira, ou seja, com o aumento da absorção de nitrogênio pelo capim, houve diminuição da fração de enxofre ligado a carbono no solo. Provavelmente, o aumento na disponibilidade de nitrogênio do solo com as doses de nitrogênio aplicadas tenha intensificado a mineralização de parte da fração de enxofre ligado a carbono por ação dos micro-organismos do solo.

O enxofre residual (S-res) aumentou linearmente com as doses de enxofre (Tabelas 4 e 5), variando de 6 a 64 mg kg⁻¹ de solo. Isto não era esperado, uma vez que essa fração é resistente à hidrólise por ácidos fortes ou bases (FRENEY, 1986).

2.4 Conclusões

As quantidades acumuladas de nitrogênio e de enxofre no total dos três cortes do capim-marandu foram influenciadas pelas combinações de doses de nitrogênio com doses de enxofre. A adubação com nitrogênio aumentou as frações inorgânicas de nitrato e amônio, nitrogênio total hidrolisável, nitrogênio amoniacal hidrolisável, nitrogênio na forma de aminoaçúcar e nitrogênio não identificável. A aplicação de enxofre incrementou enxofre-éster e enxofre residual do solo.

Referências

- BATISTA, K.; MONTEIRO, F.A. Respostas morfológicas e produtivas do capim-marandu adubado com doses combinadas de nitrogênio e enxofre. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 35, p. 1281-1288, 2006.
- BONFIM-SILVA, E.M.; MONTEIRO, F.A.; SILVA, T.J.A. Nitrogênio e enxofre na produção e no uso de água pelo capim-braquiária em degradação. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 309-317, 2007.
- BREMNER, J.M. Nitrogen total. In: SPARKS, D.L.; PAGE, A.L.; HELMKE, P.A.; LOEPPERT, R.H.; SOLTANPOUR, P.N.; TABATABAI, M.A.; JOHNSTON, C.T.; SUMMER, M.E. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 2nd ed. Madison: SSSA; ASA, 1996. pt. 3: Chemical methods, p. 1085-1121.
- BROWN, L.; SCHOLEFIELD, D.; JEWKES, E.C.; PREEDY, N.; WADGE, K.; BUTLER, M. The effects of sulphur application on the efficiency of nitrogen use in two contrasting grassland soils. **Journal of Agricultural Science**, New York, v. 135, p. 131-138, 2000.
- CABRERA, M.L.; KISSEL, D.E. Potentially mineralizable nitrogen in disturbed and undisturbed soil sample. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 52, p. 1010-1015, 1988.
- CAMARGO, F.A.O.; GIANELLO, C.; VIDOR, C. Comparative study of five hydrolytic methods in the determination of soil organic nitrogen compounds. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v. 28, p. 1303-1309, 1997a.
- _____. Potencial de mineralização do nitrogênio em solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, p. 575-579, 1997b.
- 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: Instituto Agrônomo, 2001. p. 270-276.

CASTELLANO, S.D.; DICK, R.P. Cropping and sulfur fertilization influence on sulfur transformation in soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, p. 114-121, 1991.

CRAWFORD, N.M.; KAHN, M.L.; LEUSTEK, T.; LONG, S.R. Nitrogen and sulphur. In: BUCHANAN, B.B.; GRUISSEM, W.; JONES, R.L. (Ed.). **Biochemistry and molecular biology of plants**. Rockville: American Society of Plant Physiologists, 2000. chap. 16, p. 786- 849.

DORMAAR, J.F.; SMOLIAK, S.; WILLMS, W.D. Distribution of nitrogen fractions in grazed and ungrazed fescue grassland Ah horizons. **Journal of Range Management**, Tucson, v. 43, p. 6-9, 1990.

FITZGERALD, J.W. Naturally occurring organic sulfur compounds in soils. In: NRIAGU, J.O. (Ed.). **Sulfur in the environment**. New York: Wiley, 1978. pt. 2: Ecological Impacts, p. 391-443.

FRENEY, J.R. Forms and reactions of organic sulfur compounds in soils. In: TABATABAI, M.A. (Ed.). **Sulfur in agriculture**. Madison: SSSA; ASA, 1986. p. 207-31.

FRENEY, J.R.; MELVILLE, G.E.; WILLIAMS, C.H. Soil organic matter fractions as sources of plant-available sulfur. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 7, p. 217-221, 1975.

GIANELLO, C.; CAMARGO, F.A.O.; REICHMANN, E.; TEDESCO, M.J. Avaliação da disponibilidade do nitrogênio do solo estimada por métodos químicos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 93-101, 2000.

GONZÁLEZ-PRIETO, S.J.; JOCTEUR-MONROZIER, L.; HÉTIER, J.M.; CARBALLAS, T. Changes in the soil organic N fractions of a tropical Alfisol fertilized with ¹⁵N-urea and cropped to maize or pasture. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 195, p. 151-160, 1997.

KALMBACHER, R.S.; EZENWA, I.V.; ARTHINGTON, J.D.; MARTIN, F.G. Sulfur fertilization of Bahiagrass with varying levels of nitrogen fertilization on a Florida Spodosol. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, p. 661-667, 2005.

LAURA, R.D. Salinity and nitrogen mineralization. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 9, p. 333-336, 1977.

LEE, R.; SPIER, T.W. Sulphur uptake by ryeagrass and its relationship to inorganic and organic sulphur levels and sulphatase activity in soil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 53, p. 407-425, 1979.

LI, S.; LIN, B.; ZHOU, W. Soil organic sulfur mineralization in the presence of growing plants under aerobic and waterlogged conditions. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 33, p. 721-727, 2001.

LITTELL, R.C.; MOTT, G.O. Computer assisted design and analysis of response surface experiments in agronomy. **Soil and Crop Society of Florida Proceedings**, Ona, v. 34, p. 94-97, 1975.

LU, H.; LI, S.; JIN, F.; SHAO, M. Contributions of organic nitrogen forms to mineralized nitrogen during incubation experiments of the soils on the Loess Plateau. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Philadelphia, v. 10, p. 3399-3419, 2009.

MALHI, S.S.; MCGILL, W.B. Nitrification in three Alberta soils: effect of temperature, moisture and substrate concentration. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 14, p. 393-399, 1982.

MARSCHNER, B. Microbial contribution to sulphate mobilization after liming an acid forest soil. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 44, p. 459-466, 1993.

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, p. 267-286, 1981.

MULVANEY, R.L.; KHAN, S.A. Diffusion methods to determine different forms of nitrogen in soil hydrolysates. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 65, p. 1284-1292, 2001.

MULVANEY, R.L.; KHAN, S.A.; HOEFT, R.G.; BROWN, H.M. A soil organic nitrogen fraction that reduces the need for nitrogen fertilization. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, p. 1164-1172, 2001.

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

NEPTUNE, A.M.L.; TABATABAI, M.A.; HANWAY, J.J. Sulfur fractions and carbon nitrogen-phosphorus-sulfur relationships in some Brazilian and Iowa soils. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 39, p. 51-55, 1975.

OSBORNE, G.J. Chemical fractionation of soil nitrogen in six soils from Southern New South Wales. **Australian Journal of Soil Research**, Oxford, v. 15, p. 159-165, 1977.

PARSONS, J.W. Chemistry and distribution of amino sugars in soils and soil organisms. In: PAUL, E.A.; LADD, J.N. (Ed.). **Soil biochemistry**, New York: Marcel Dekker, 1981. v. 5, p. 197-227.

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

REDDY, K.S.; SINGH, M. TRIPATHI, A.K.; SINGH, M.; SAHA, M.N. Changes in amount of organic and inorganic fractions of nitrogen in an Eutrochrept soil after long-term cropping with different fertilizer and organic manure inputs. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Weinheim, v. 166, p. 232-238, 2003.

SAGGAR, S., HEDLEY, M.J., PHIMSARN, S. Dynamics of sulfur transformations in grazed pastures. In: MAYNARD, D.G. (Ed.). **Sulfur in the environment**. New York: Dekker, 1998. p. 45-94.

SAHRAWAT, K.L. Nitrification in some tropical soils. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 65, p. 281-286, 1982.

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, p. 73-83, 1993.

SAMPAIO, E.V.S.B.; SALCEDO, L.H.; SILVA, V.M.; ALVES, G.D. Capacidade de suprimento de nitrogênio e resposta à fertilização de vinte solos de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 19, p. 269-279, 1995.

SAS INSTITUTE. **SAS/STAT**: user's guide, version 8.0. Cary, 2000.

SCHNITZER, M.; HINDLE, D.A. Effects of different methods of acid hydrolysis on the nitrogen distribution in two soils. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 60, p. 237-243, 1981.

SCHULTEN, H.R.; SCHNITZER, M. The chemistry of soil organic nitrogen: a review. **Biology and Fertility of Soils**, New York, v. 26, p. 1-15, 1998.

SOLOMON, D.; LEHMANN, J.; TEKALIGN, M.; FRITZSCHE, F.; ZECH, W. Sulfur fractions in particle-size separates of the sub-humid Ethiopian highlands as influenced by land use changes. **Geoderma**, Amsterdam, v. 102, p. 41-59, 2001.

STANFORD, G.; SMITH, S.J. Nitrogen mineralization potentials of soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 36, p. 465-471, 1972.

STEVENSON, F. **Cycles of soil carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur and micronutrients**. New York: John Wiley, 1986. 380 p.

STEVENSON, F.J. Nitrogen-organic forms. In SPARKS, D.L.; PAGE, A.L.; HELMKE, P.A.; LOEPPERT, R.H.; SOLTANPOUR, P.N.; TABATABAI, M.A.; JOHNSTON, C.T.; SUMMER, M.E. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 2nd ed. Madison: SSSA; ASA, 1996. pt. 3: Chemical methods, p. 1185-1200.

TABATABAI, M.A. Sulfur. In: PAGE, A.L.; MILLER, R.H.; KEENEY, D.R. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: SSSA; ASA, 1982. pt. 2: Chemical methods, p. 501-538.

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

TABATABAI, M.A.; BREMNER, J.M. A simple method of determining total S in plant materials. **Agronomy Journal**, Madison, v. 62, p. 805-806, 1970.

YAGI, R. **Métodos químicos para a estimativa do nitrogênio disponível do solo**. 2008. 120 p. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2008.

YANG, Z.; SINGH, B.R.; HANSEN, S.; HU, Z.; RILEY, H. Aggregate associated sulfur fractions in long-term (>80 years) fertilized soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 71, p. 163-170, 2007.

3 ALTERAÇÕES NUTRICIONAIS E ESTRUTURAIS NAS RAÍZES DO CAPIM-MARANDU EM RESPOSTA ÀS ADUBAÇÕES COM NITROGÊNIO E ENXOFRE

Resumo

O sistema radicular bem desenvolvido garante adequado crescimento das plantas, permite obter mais elevada produção de biomassa e possibilita mais elevada eficiência de utilização de nutrientes do solo. Objetivou-se verificar o efeito das combinações de doses de nitrogênio com doses de enxofre nas variáveis de crescimento, na concentração total e nas formas inorgânicas de nitrogênio e de enxofre e na relação N:S nas raízes da *Brachiaria brizantha* cv. Marandu (capim-marandu). O experimento foi conduzido em casa de vegetação de setembro a dezembro de 2008, utilizando-se um solo classificado como Neossolo Quartzarênico, com muito baixos teores de matéria orgânica e de enxofre-sulfato. Cinco doses de nitrogênio (0; 100; 200; 300 e 400 mg dm⁻³) foram combinadas com cinco doses de enxofre (0; 10; 20; 30 e 40 mg dm⁻³) em um fatorial 5² fracionado, com quatro repetições. A parte aérea do capim foi cortada três vezes em intervalos aproximados de 30 dias. Ao final do terceiro corte as raízes foram coletadas e avaliadas quanto a produção de massa seca, comprimento e superfície radicular, concentrações das formas inorgânicas de nitrogênio e de enxofre e relação N:S no sistema radicular. O fornecimento simultâneo de doses de nitrogênio e doses de enxofre aumentou massa seca de raízes, concentrações de enxofre total, de nitrato e de enxofre-sulfato nas raízes, enquanto o comprimento e a superfície radicular, as concentrações de nitrogênio total e de amônio e a relação N:S no sistema radicular do capim-marandu responderam significativamente às doses isoladas de nitrogênio.

Palavras-chave: Comprimento radicular; Enxofre-sulfato; Relação N:S

Abstract

Well-developed root systems ensure adequate plant growth, allows to obtain higher biomass production, and make possible to have better efficiency of nutrient utilization. The objective was to evaluate the effects of combination nitrogen rates with sulphur rates on the root growth characteristics, in total concentration and nitrogen and sulphur inorganic forms and N:S ratio in roots of *Brachiaria brizantha* cv. Marandu (Marandu palisadegrass). The experiment was carried out under greenhouse conditions, from September to December, 2008. Soil was an Entisol that had low contents of organic matter and sulphate-sulphur. Five nitrogen rates (0; 100; 200; 300 and 400 mg dm⁻³) were combined with five sulphur rates (0; 10; 20; 30 and 40 mg dm⁻³) in a fractionated 5² factorial, with four replications. Aboveground forage was harvest three times at 30-d intervals. At the end of the third harvest, root samples were collected and evaluated for dry mass production, for total length and surface area and for concentrations and forms of nitrogen and sulphur and the N:S ratio. Supply of both nitrogen and sulphur rates increased the dry mass production, total sulphur, nitrate and sulphate-sulphur concentrations, while for total root length and root surface area, total nitrogen and ammonium concentrations and N:S ratio only nitrogen rates had significant responses.

Keywords: Root length; Plant growth; N:S ratio; Sulphate-sulphur

3.1 Introdução

As raízes, anteriormente consideradas como órgão esquecido da planta devido às dificuldades metodológicas para sua determinação, atualmente fazem parte de estudos fundamentais no entendimento da absorção de água e nutrientes pelas plantas. O sistema radicular desempenha importantes funções, como a fixação das plantas, a absorção e a condução de água e nutrientes do meio externo até a parte aérea, as quais são primordiais para o desenvolvimento de qualquer espécie vegetal (RAVEN; EDWARDS, 2001) e ainda algumas funções secundárias como o armazenamento de nutrientes e a síntese de reguladores do crescimento (FITTER, 1991).

O fornecimento de nutrientes, em quantidades e proporções adequadas, particularmente o nitrogênio e o enxofre, assume importância fundamental no processo produtivo de pastagens, pois o nitrogênio e enxofre do solo proveniente da mineralização da matéria orgânica normalmente não atendem à demanda de gramíneas forrageiras com alto potencial produtivo (FAGUNDES et al., 2006). A disponibilidade de nutrientes no solo não garante a absorção pelas raízes, porém a presença dos mesmos no solo pode afetar o crescimento das raízes, proporcionando aumento da proporção de massa seca, maior comprimento, diâmetro radicular e superfície radicular (GAHOONIA; CARE; NIELSEN, 1997). Para Gregory (1994), o desenvolvimento, crescimento e distribuição das raízes são afetados pela quantidade, forma e distribuição de nutrientes nos solos, sendo o cultivo e os fertilizantes, os responsáveis pelos efeitos no crescimento e na atividade das raízes.

O estado nutricional da planta tem efeito nas variáveis de crescimento de suas raízes. As principais formas de nitrogênio utilizadas pelas plantas são a nítrica (NO_3^-) e a amoniacal (NH_4^+). Ambas as formas podem ser absorvidas pelas plantas em taxas e proporções dependentes da espécie, idade e disponibilidade de carboidratos (DEANNE-DRUMMOND, 1983). Algumas gramíneas, supridas com nitrato e amônio, em proporções equivalentes, absorvem primeiramente o amônio, ficando a absorção do nitrato significativa apenas quando as concentrações do amônio são muito baixas (FERNANDES; ROSSIELLO, 1995). Dentro da célula vegetal o nitrogênio é distribuído na forma de NH_4^+ para compostos carbonados, fazendo parte de aminoácidos, proteínas, nucleotídeos, clorofilas e coenzimas (GODWIN; JONES, 1991; CRAWFORD et al., 2000). Além disso, o nitrogênio é elemento essencial para a utilização de carboidratos,

estimulando o desenvolvimento e atividade radicular e a absorção de outros nutrientes (OLSON; KURTZ, 1982).

O enxofre apesar de requerido pelas plantas em menores concentrações do que o nitrogênio é essencial como constituinte de proteínas (SCHERER et al., 2008), é parte de numerosos compostos (coenzimas, lipídeos, dentre outros) e sua deficiência provoca diminuição na absorção de nitrogênio pelas plantas. As plantas, apesar de estarem aptas a absorver enxofre via foliar, obtêm a maior parte desse elemento via radicular, sendo o enxofre-sulfato a forma preferencialmente absorvida da solução do solo. O enxofre, assim como o nitrogênio, tem o contacto íon-raiz principalmente por fluxo de massa (MARSCHNER, 1995).

As adubações com nitrogênio e enxofre isoladas promovem respostas positivas no desenvolvimento do sistema radicular (BATISTA; MONTEIRO, 2006), porém os efeitos benéficos podem ser potencializados pela adubação simultânea com proporções adequadas de nitrogênio e enxofre (BROWN et al., 2000). Muitos compostos da planta (como aminoácidos, proteínas e enzimas) possuem tanto enxofre quanto nitrogênio em sua constituição, o que ajuda a explicar a existência de uma relação N:S que está associada com o crescimento e desenvolvimento das raízes.

Objetivou-se, com esse experimento, verificar o efeito da aplicação simultânea de doses de nitrogênio e doses de enxofre nas variáveis de crescimento, na concentração de nitrogênio total, enxofre total, nitrato, amônio e sulfato e na relação N:S nas raízes da *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, em solo com baixo teor de matéria orgânica e de enxofre-sulfato.

3.2 Material e métodos

O experimento foi conduzido em casa de vegetação em Piracicaba-SP, utilizando vasos de plásticos preenchidos com 4,2 dm³ de solo proveniente da camada de 0-20 cm de um Neossolo Quartzarênico. Esse solo teve como características teores muito baixos de matéria orgânica e de enxofre-sulfato. Os atributos químicos do solo, determinados de acordo com os métodos descritos em Raij et al. (2001), tiveram os seguintes resultados: P resina = 3 mg dm⁻³; MO = 9,5 g dm⁻³; pH em CaCl₂ = 4,0; K⁺ = 2,3 mmol_c dm⁻³; Ca²⁺ = 6 mmol_c dm⁻³; Mg²⁺ = 2 mmol_c dm⁻³; Al³⁺ = 8 mmol_c dm⁻³; H+Al = 40 mmol_c dm⁻³; CTC a pH 7,0 = 50,3 mmol_c dm⁻³; Soma de bases (SB) = 10,3 mmol_c dm⁻³; saturação por bases (V) = 20%; S-SO₄²⁻ = 2,6 mg kg⁻¹; Cu = 0,74 mg kg⁻¹; Fe =

39,5 mg kg⁻¹; Mn = 26,5 mg kg⁻¹; Zn = 0,57 mg kg⁻¹ e B = 0,36 mg kg⁻¹. Os teores iniciais de N-total, N-NH₄⁺, N-NO₃⁻, S-total, apresentaram os seguintes teores: 400; 2,2; 3,4; 49,8 mg dm⁻³, respectivamente. A granulometria da amostra de solo, determinada conforme Camargo et al. (1986), revelou 75,1, 126,3 e 798,6 g kg⁻¹ de argila, silte e areia, respectivamente. Foi realizada calagem com carbonato de cálcio e magnésio, na proporção de Ca: Mg de 1,5:1, com o emprego do V2 = 50% da fórmula para cálculo da necessidade da calagem. O solo de cada vaso foi umedecido até 70% da capacidade de retenção de água e mantido pelo período de 35 dias para reação do corretivo aplicado.

Cinco doses de nitrogênio (0; 100; 200; 300 e 400 mg dm⁻³) com cinco doses de enxofre (0; 10; 20; 30 e 40 mg dm⁻³) foram combinadas, em fatorial 5² fracionado, de acordo com Littell e Mott (1975). As 13 combinações entre essas doses foram: 0-0; 0-20; 0-40; 100-10; 100-30; 200-0; 200-20; 200-40; 300-10; 300-30; 400-0; 400-20 e 400-40 mg dm⁻³, as quais foram distribuídas em blocos ao acaso, com quatro repetições. A umidade do solo nos vasos foi mantida na capacidade de retenção de água por sistema auto-irrigante, segundo Bonfim-Silva, Monteiro e Silva (2007).

O nitrogênio foi aplicado como nitrato de amônio (NH₄NO₃) e o enxofre como sulfato de cálcio (CaSO₄.2H₂O), sendo a quantidade de cálcio balanceada em todos os vasos mediante o emprego de cloreto de cálcio (CaCl₂). A adubação de base para estabelecimento da pastagem foi fornecida em ambos os experimentos para suprir fósforo (CaH₂PO₄ e KH₂PO₄) de 200 mg dm⁻³, potássio (KH₂PO₄ e KCl) de 150 mg dm⁻³, magnésio (MgCl₂.6H₂O) de 50 mg dm⁻³, boro (H₃BO₃) de 1,5 mg dm⁻³, cobre (CuCl₂.2H₂O) de 2,5 mg dm⁻³, zinco (ZnCl₂) de 2,0 mg dm⁻³ e molibdênio (Na₂MoO₄.2H₂O) de 0,25 mg dm⁻³ e a quantidade de cálcio foi igualada em todos os vasos.

Cinco plantas foram cultivadas por vaso. O capim foi cultivado em três períodos de crescimento da parte aérea, compreendendo ao período total de crescimento de 90 dias. No final da terceira coleta da parte aérea das plantas, as raízes foram separadas do solo por lavagem em água corrente sobre conjunto de peneiras de malhas de 0,25 e 1,00 mm. Foram coletadas subamostras equivalentes a 20% do total do volume de raízes, de acordo com o método proposto por Rossiello et al. (1995). Essa fração foi acondicionada em recipientes plásticos com água desionizada e colorida com solução de violeta genciana a 50 g L⁻¹, no período de 24 horas, para que as partes mais finas das raízes fossem coloridas. A seguir, as raízes foram colocadas sobre transparências plásticas e as imagens escaneadas e analisadas pelo aplicativo SIARCS (Sistema Integrado para Análise de Raízes e Cobertura do Solo) versão 3.0, para determinação do

comprimento e da superfície radiculares. Após serem digitalizadas, as raízes foram colocadas para secar em estufa com circulação forçada de ar, a 65 °C, até massa constante, para determinação da produção de massa seca. Com a massa das subamostras, fez-se a correção do comprimento e superfície para o total do sistema radicular de cada vaso, considerando a produção de massa seca total das raízes, conforme descrito por Crestana et al. (1994).

As raízes foram moídas em moinho do tipo Wiley, para determinação das concentrações de nitrogênio e enxofre, conforme método descrito por Sarruge e Haag (1974). A determinação do nitrogênio inorgânico (NO_3^- e NH_4^+) foi realizada segundo metodologia descrita em Tedesco, Volkweiss e Bohnen (1985), enquanto a concentração do enxofre-sulfato seguiu o procedimento descrito em Sinclair (1974).

Os resultados foram submetidos às análises estatísticas utilizando-se o aplicativo “Statistical Analysis System” (SAS Institute, 2000). O procedimento RSREG foi utilizado no caso de significância da interação doses de nitrogênio $\times$ doses de enxofre. Nos casos em que a interação doses de nitrogênio $\times$ doses de enxofre não foi significativa, foi utilizada a análise de regressão com modelos de primeiro e segundo graus para as doses individuais desses nutrientes, por meio do comando GLM.

3.3 Resultados e discussão

Na produção de massa seca de raízes do capim-marandu foi significativa a interação doses nitrogênio $\times$ doses de enxofre (Figura 1). A combinação das mais elevadas doses de nitrogênio com as de enxofre fornecidas ao solo resultou em elevadas produções de massa seca de raízes do capim-marandu, quando comparada com a não-aplicação desses nutrientes. Constatou-se que a combinação da dose de nitrogênio de 294,9 mg dm⁻³ com a dose de enxofre de 29,3 mg dm⁻³ (relação entre as doses aplicadas de 10:1) resultou na máxima produção de massa seca de raízes da gramínea. Essa produção foi 7,5 vezes superior à produção de massa seca de raízes dos vasos que não receberam a aplicação de doses de nitrogênio e doses de enxofre. A adição de enxofre potencializou a produção de massa seca de raízes e contribuiu para melhor eficiência na utilização das doses de nitrogênio aplicadas, visto que para atingir a mesma produção de massa seca de raízes na ausência de aplicação das doses de enxofre, seria necessária a aplicação de doses de nitrogênio por volta de três vezes superior à dose utilizada na combinação com a dose de enxofre.

Isto comprova que a falta de enxofre afeta o aproveitamento do nitrogênio, restringindo o crescimento do sistema radicular.

Alguns autores encontraram valores para a produção de massa seca de raízes inferiores aos observados nesse experimento (BATISTA; MONTEIRO, 2006; BONFIM-SILVA; MONTEIRO, 2010). Uma possível explicação para esse fato, é que quando o teor de nitrogênio é baixo, limitando o crescimento, ocorre na planta um acúmulo de carboidratos, tanto na parte aérea quanto nas raízes. Como esses carboidratos não podem ser utilizados, nem na formação de novos tecidos nem no crescimento, o nitrogênio absorvido reage com os carboidratos do sistema radicular, beneficiando as raízes em detrimento da parte aérea. Quando se disponibiliza nitrogênio, proporções maiores desse nutriente são transportadas para a parte aérea, possibilitando o uso de carboidratos na síntese de proteínas e carboidratos (WILKINSON; LANGDALE, 1974). Outro fator que justifica a diferença na produção de massa seca de raízes são as características intrínsecas de cada solo.

De acordo com Marschner (1995), o fornecimento de nutrientes pode afetar fortemente o crescimento do sistema radicular, sendo que este efeito é particularmente marcado pelo nitrogênio. A planta em ambiente com baixa concentração de nitrogênio investe grande parte da sua massa seca total nas raízes (HILL et al., 2006), o que resulta em mudanças na forma do sistema radicular.

Na produção de massa seca de raízes, não são computadas apenas as raízes ativas, mas também as raízes velhas e espessas que pouco participam da absorção de água e nutrientes. Sendo assim, para melhor avaliação do crescimento e nutrição do capim é preciso também conhecer o comprimento e a superfície radicular, os quais estão relacionados à absorção de água e nutrientes pela planta (MENGEL; KIRKBY, 2001).

O comprimento total do sistema radicular do capim-marandu foi influenciado pela aplicação isolada de doses de nitrogênio, sendo os resultados ajustados ao modelo polinomial de primeiro grau (Figura 2). A adubação com doses de nitrogênio estimulou o desenvolvimento do sistema radicular, sendo que a aplicação da dose de nitrogênio de 400 mg dm^{-3} resultou em um aumento de duas vezes no comprimento radicular, quando comparado às combinações que não receberam doses de nitrogênio e enxofre. De acordo com Marschner (1995), o suprimento de nitrogênio altera sensivelmente o crescimento e a morfologia das raízes.

Figura 1 – Produção da massa seca de raízes do capim-marandu em resposta às combinações das doses de nitrogênio com doses de enxofre

Com o fornecimento de nutrientes, as plantas se desenvolvem produzindo maior densidade de comprimento radicular, ou seja, maior comprimento do sistema radicular por volume de solo a ser explorado (BILBROUGH; CALDWELL, 1995). Aproximadamente 70% do comprimento total é formado por raízes finas, que são responsáveis pela absorção de nutrientes e 30% por raízes grossas, que possivelmente tenham a atividade de sustentação e alguma ação de absorção de nutrientes.

Figura 2 – Comprimento do sistema radicular do capim-marandu em resposta às doses de nitrogênio

De modo similar, ao observado para comprimento radicular, a interação doses de nitrogênio $\times$ doses de enxofre não foi significativa para a superfície do sistema radicular do capim-marandu, sendo verificado efeito isolado para as doses de nitrogênio (Figura 3). O teor de enxofre-sulfato no solo foi suficiente para atender a demanda por esse nutriente pelas raízes do capim. A dose de nitrogênio que promoveu a máxima superfície radicular foi de 319,2 mg dm⁻³. A elevada superfície radicular permite contato com maior volume da solução do solo, aumentando a absorção de nutrientes pelas plantas.

Robinson e Rorison (1985), avaliando o desenvolvimento das raízes de duas espécies forrageiras (*Holcus lanatus* e *Deschampsia flexuosa*) cultivadas em condição de baixo e alto fornecimento de nitrogênio, constataram diferenças significativas no comprimento total e densidade de raízes em função das adubações com nitrogênio.

A superfície radicular, segundo Marschner (1995), tem crescimento e características morfológicas alterados pelo fornecimento de nitrogênio, sendo que os maiores efeitos normalmente são causados pelo suprimento de amônio em relação ao nitrato.

A adubação com doses de nitrogênio e doses de enxofre aumentou a disponibilidade desses nutrientes na solução do solo, o que favoreceu a absorção e aumentou as concentrações dos mesmos no capim-marandu. A absorção de nutrientes pelas raízes é dependente da disponibilidade dos nutrientes, em relação à forma e às quantidades no substrato.

Figura 3 – Superfície radicular do capim-marandu em resposta às aplicações das doses de nitrogênio

A concentração de nitrogênio nas raízes da gramínea foi influenciada positivamente pela adubação com doses de nitrogênio, sendo que as mais altas concentrações de nitrogênio nas raízes

foram obtidas com as doses mais elevadas desse nutriente (Figura 4a). Verificou-se, pela falta de resposta à aplicação de enxofre na concentração de nitrogênio, que o teor deste nutriente no solo foi suficiente para atender a demanda das raízes e não alterar o metabolismo do nitrogênio. Na mais alta dose de nitrogênio aplicada, a concentração de nitrogênio nas raízes foi de $15,64 \text{ g kg}^{-1}$, valor esse 3,3 vezes superior ao valor de concentração de nitrogênio para a não-aplicação desse nutriente.

Batista e Monteiro (2006) constataram significância da interação doses de nitrogênio $\times$ doses de enxofre para a concentração de nitrogênio em raízes para o capim-marandu, sendo que a concentração variou de 2,4 a $29,5 \text{ g kg}^{-1}$ nas raízes da gramínea.

Colozza et al. (2000) observaram aumento linear da concentração de nitrogênio em raízes do capim-aruaana (*Panicum maximum* cv. Aruana) com o incremento das doses de nitrogênio. Segundo esses autores, em condições de alto teor de nitrogênio no solo, as raízes podem funcionar como órgão armazenador desse nutriente.

Para a concentração de enxofre nas raízes verificou-se efeito significativo da interação doses de nitrogênio $\times$ doses de enxofre para o capim-marandu. Elevadas concentrações de enxofre nas raízes do capim foram obtidas nas combinações de doses baixas de nitrogênio com doses elevadas de enxofre (Figura 4b). A partir da combinação da dose de nitrogênio de $205,6 \text{ mg dm}^{-3}$ com a dose de enxofre de $35,4 \text{ mg dm}^{-3}$ foi verificada diminuição na concentração de enxofre nas raízes.

A concentração de enxofre nas raízes normalmente não é elevada, visto que o enxofre absorvido pelas plantas é pouco retido pelas raízes, mas é preferencialmente transportado para a parte aérea, onde é reduzido e assimilado em compostos orgânicos.

Batista e Monteiro (2006) constataram efeito isolado das doses de nitrogênio na concentração de enxofre nas raízes, sendo que elevadas doses de nitrogênio resultaram em concentrações mais baixas de enxofre nas raízes do capim-marandu.

A interação doses de nitrogênio $\times$ doses de enxofre não foi significativa para a relação N:S nas raízes do capim-marandu, mas verificou-se significância para as doses isoladas de nitrogênio, com ajuste ao modelo de regressão de primeiro grau (Figura 5). Na mais elevada dose de nitrogênio, a relação entre as concentrações de nitrogênio e de enxofre nas raízes foi de 4,5: 1, enquanto na não-aplicação do nitrogênio a relação N:S foi de 1,7: 1. Essa variação na relação N:S

Figura 4 – Concentração de nitrogênio (a) e de enxofre (b) nas raízes do capim-marandu, em resposta às doses de nitrogênio (a) e às combinações das doses de nitrogênio com doses de enxofre (b)

concorda com a obtida por Bonfim-Silva e Monteiro (2010) para raízes do capim-braquiária, que observaram variação na relação N:S de 3,2:1 a 5,4:1, considerando a não-aplicação e a máxima dose aplicada de nitrogênio. Entretanto, Batista e Monteiro (2006) não obtiveram significância para relação N:S nas raízes do capim-marandu tanto em termos de interação doses de nitrogênio $\times$ doses de enxofre, quanto para o estudo isolado das doses de nitrogênio e doses de enxofre. Não se conhece uma relação N:S ideal entre as concentrações de nitrogênio e de enxofre para as raízes de capim-marandu, porém verificou-se que para a relação encontrada de 4,5:1 entre essas doses, a

planta se desenvolveu adequadamente, não mostrando distúrbios metabólicos, como pode ser observado pela massa seca de raízes.

Segundo Santos (1997), a importância do equilíbrio entre a quantidade de nitrogênio e enxofre no solo e na planta é refletida no crescimento e no estado nutricional do vegetal. O mesmo autor enfatizou que o nitrogênio e o enxofre são componentes da molécula dos aminoácidos e em condições de deficiência desses elementos, pode ocorrer menor concentração de aminoácidos e, diminuição na síntese de proteínas.

Goh e Kee (1978), trabalhando com azevém perene (*Lolium perenne*), evidenciaram respostas fisiológicas da planta forrageira ao fornecimento de nitrogênio e enxofre, mostrando que a planta não é capaz de formar proteína com apenas um desses elementos e que a absorção de qualquer um deles em desbalanço faz com que o outro seja absorvido, porém não aproveitado para a produção vegetal.

Figura 5 – Relação nitrogênio: enxofre (N:S) nas raízes do capim-marandu em resposta às aplicações das doses de nitrogênio

O nitrato e o amônio são as formas de nitrogênio mais absorvidas pelas raízes, porém a forma preferencialmente absorvida depende da espécie e de fatores ambientais, tais como pH, temperatura e concentração de carboidratos nas raízes (MARSCHNER, 1995; MENGEL; KIRKBY, 2001).

A interação doses de nitrogênio $\times$ doses de enxofre foi significativa para a concentração de nitrato (NO_3^-) nas raízes do capim-marandu (Figura 6a), sendo que as mais elevadas concentrações de nitrato nas raízes foram atingidas com as combinações das mais altas doses de

nitrogênio com as mais baixas doses de enxofre. A máxima concentração de nitrato não foi atingida com as mais elevadas doses de nitrogênio e doses de enxofre utilizadas nesse experimento.

A concentração de nitrato nas raízes representou uma contribuição relativamente baixa para a concentração do nitrogênio total nas raízes, indicando uma boa eficiência do sistema da redutase do nitrato radicular. A presença de enxofre, contudo, atuou no sentido de decrescer a contribuição dessa fração, possivelmente por um estímulo à redução do nitrato até a síntese protéica. Segundo Prosser et al. (2001), em condições de enxofre limitante no substrato, pode ocorrer redução da atividade da enzima redutase do nitrato, resultando em aumento nas concentrações de nitrato no tecido vegetal.

Colozza et al. (2000) constataram aumento linear da concentração de nitrato nas raízes do capim-aruaana com as doses de nitrogênio aplicadas. Acréscimos de 90% na concentração de nitrato foram verificados quando se aumentou a dose de nitrogênio de 330 para 450 mg kg⁻¹.

Para a concentração de amônio (NH₄⁺) nas raízes não foi observado efeito significativo da interação doses de nitrogênio x doses de enxofre, mas foi verificada a significância para a aplicação de doses de nitrogênio (Figura 6b). Essa fração do nitrogênio também teve uma contribuição muito pequena na concentração do nitrogênio total nas raízes do capim. À medida que aumentaram as doses de nitrogênio, aplicado como nitrato de amônio, foi verificado aumento linear na concentração de amônio nas raízes.

As concentrações de nitrato e de amônio nas raízes do capim-marandu não variaram muito entre si para as mais altas doses de nitrogênio, porém verificou-se que na ausência de adubação com doses de nitrogênio e doses de enxofre, a concentração de nitrato foi duas vezes maior do que a de amônio nas raízes do capim-marandu.

A forma nítrica precisa ser reduzida a amônio, pelo complexo enzimático da redutase do nitrato e da redutase do nitrito, para incorporação nos aminoácidos, enquanto o nitrogênio amoniacal absorvido pelas raízes pode ser convertido diretamente pela GS-GOGAT até glutamato (TAIZ; ZEIGER, 2004). Parte do amônio é incorporado em compostos orgânicos ainda nas raízes, enquanto o nitrato é reduzido a amônio para fazer parte dos esqueletos carbônicos das plantas.

$$y = 0,4442 + 0,0016 * N - 4,7889 E - 8N - 0,00003 * NS - 0,0139 * S + 0,0004 S^2$$

$$R^2 = 0,50 *$$

$$y = 0,16428 + 0,00006 ** N - 0,00225 ** N^2 - 0,00003 ** NS + 0,01784 ** S + 0,00055 S^2$$

$$R^2 = 0,84 **$$

Figura 6 – Concentração de nitrato (a), amônio (b) e sulfato (c) nas raízes do capim-marandu em resposta às combinações de doses de nitrogênio com doses de enxofre (a e c) e de doses de nitrogênio (b)

Segundo Fernandes e Rossiello (1995), uma grande parte do amônio absorvido pode ser incorporado em compostos orgânicos nas raízes e ser armazenado nos vacúolos de suas células, aumentando assim a concentração desse íon amônio nas raízes.

Andrade et al. (2001) ressaltou que à medida que se aumentou a concentração de amônio na solução nutritiva, ocorreu diminuição na concentração de nitrato nas raízes do capim-colonião (*Panicum maximum*). Isto indica que, na presença de amônio, o nitrato absorvido é translocado para a parte aérea da planta, onde é preferencialmente reduzido, enquanto a assimilação de amônio é mantida nas raízes (TAIZ; ZEIGER, 2004).

A quantidade acumulada de enxofre-sulfato (SO_4^{2-}) pelas raízes é baixa e sua assimilação é semelhante à quantidade acumulada de nitrogênio na forma nítrica, ou seja, a redução é necessária para a incorporação de enxofre aos aminoácidos, proteínas e coenzimas (CRAWFORD et al., 2000).

A concentração de enxofre-sulfato nas raízes respondeu significativamente à aplicação simultânea de doses de nitrogênio e doses de enxofre (Figura 6c). A adição de elevadas doses de nitrogênio afetou de forma negativa a quantidade absorvida de sulfato pelas raízes, culminando com menores concentrações desse nutriente. As mais elevadas concentrações de enxofre-sulfato foram atingidas com altas doses de enxofre combinadas com as mais baixas doses de nitrogênio. A concentração de enxofre-sulfato aumentou a concentração de enxofre total nas raízes do capim-marandu.

3.4 Conclusões

O fornecimento de doses de nitrogênio e de enxofre alterou as variáveis produtivas, as concentrações de nitrogênio total, enxofre total, nitrato e amônio e a relação N:S no sistema radicular do capim-marandu. A interação doses de nitrogênio $\times$ doses de enxofre foi significativa para a produção de massa seca de raízes e concentrações de enxofre total, nitrato e enxofre-sulfato nas raízes do capim, enquanto o comprimento e a superfície radicular e as concentrações de nitrogênio total e amônio responderam positivamente às adubações com doses isoladas de nitrogênio.

Referências

- ANDRADE, S.R.M.; SANT'ANNA, R.; MOSQUIM, P.R.; CAMBRAIA, J. **Assimilação de nitrogênio pelas plantas de *Panicum maximum* cv. Vencedor, submetidas a diferentes proporções $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$** . Planaltina: Embrapa cerrados, 2001. 20 p. (Embrapa Cerrados. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento/).
- BATISTA, K.; MONTEIRO, F.A. Sistema radicular do capim-marandu, considerando as combinações de doses de nitrogênio e de enxofre. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 821-828, 2006.
- BILBROUGH, C.J.; CALDWELL, M.M. The effects of shading and N status on root proliferation in nutrient patches by the perennial grass *Agropyron desertorum* in the field. **Oecologia**, Berlin, v. 103, p. 10-16, 1995.
- BONFIM-SILVA, E.M.; MONTEIRO, F.A.; SILVA, T.J.A. Nitrogênio e enxofre na produção e no uso de água pelo capim-braquiária em degradação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 309-317, 2007.
- BROWN, L.; SCHOLEFIELD, D.; JEWKES, E.C.; PREEDY, N.; WADGE, K.; BUTLER, M. The effect of sulphur application on the efficiency of nitrogen use in two contrasting grassland soils. **Journal of Agricultural Science**, New York, v. 135, p. 131-138, 2000.
- CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas**. Campinas: Instituto Agrônomo, 1986. 94 p. (IAC. Boletim Técnico, 106).
- COLOZZA, M.T.; KIEHL, J.C.; WERNER, J.C.; SCHAMMASS, E.A. Respostas de *Panicum maximum* cultivar Aruana a doses de nitrogênio. **Boletim de Indústria Animal**, Nova Odessa, v. 57, p. 21-32, 2000.
- CRAWFORD, N.M.; KAHN, M.L.; LEUSTEK, T.; LONG, S.R. Nitrogen and sulphur. In: BUCHANAN, B.B.; GRUISSEM, W.; JONES, R.L. (Ed.). **Biochemistry and molecular biology of plants**. Rockville: American Society of Plant Physiologists, 2000. chap. 16, p. 786-849.
- CRESTANA, S.; GUIMARÃES, M.F.; JORGE, L.A.C.; RALISCH, R.; TOZZI, C.L.; TORRE, A.; VAZ, C.M.P. Avaliação da distribuição de raízes no solo auxiliada por processamento de imagens digitais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 18, p. 365-371, 1994.
- DEANNE-DRUMMOND, C.E.; GLASS, A.D.M. Short-term studies of nitrate uptake into barley plants using ion-specific electrodes and $^{36}\text{Cl}_3$. II. Regulation of NO_3^- efflux by NH_4^+ . **Plant Physiology**, Rockville, v. 73, p. 105-110, 1983.

FAGUNDES, J.L.; FONSECA, D.M.; MORAIS, R.V.; MISTURA, C.; VITOR, C.M.T.; GOMIDE, J.A.; NASCIMENTO JÚNIOR, D.; SANTOS, M.E.R.; LAMBERTUCC, D.M. Avaliação das características estruturais do capim-braquiária em pastagens adubadas com nitrogênio nas quatro estações do ano. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 35, p. 30-37, 2006.

FERNANDES, M.S.; ROSSIELO, R.O.P. Mineral nitrogen in plant physiology and plant nutrition. **Critical Reviews in Plant Sciences**, Shannon, v. 14, p. 111-118, 1995.

FITTER, A.H. Characteristics and functions of root systems. In: WAISEL, Y.; ESHEL, A.; KAFKAFI, U. **Plant roots: the hidden half**. New York: Marcel Dekker, 1991. p. 3-24.

GAHOONIA, T.S.; CARE, D.; NIELSEN, N.E. Root hairs and phosphorus acquisition of wheat and barley cultivars. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 191, p. 181-188, 1997.

GOH, K.M.; KEE, K.K. Effects of nitrogen and sulphur fertilization on the digestibility and chemical composition of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.). **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 50, p. 161-177, 1978.

GODWIN, D.C.; JONES, C.A. Nitrogen dynamics in soil-plant systems. In: HANKS, J.; RITCHIE, J.T. **Modelling plant and soil systems**. Madison: American Society of Agronomy, 1991. v. 31, p. 287-321.

GREGORY, P.J. Root growth and activity. In: BOOTE, K.J.; BENNETT, J.M.; SINCLAIR, T.R.; PULSEN, G.M. (Ed.). **Physiology and determination of crop yield**. Madison: ASA; CSSA; SSSA, 1994. chap. 4, p. 65-93.

HILL, J.O.; SIMPSON, R.J.; MOORE, A.D.; CHAPMAN, D.F. Morphology and response of roots of pasture species to phosphorus and nitrogen nutrition. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 286, p. 7-19, 2006.

LITTELL, R.C.; MOTT, G.O. Computer assisted design and analysis of response surface experiments in agronomy. **Soil and Crop Society of Florida Proceedings**, Ona, v. 34, p. 94-97, 1975.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2nd ed. London: Academic Press, 1995. 889 p.

MENGEL, K.; KIRKBY, E.A. **Principles of plant nutrition**. 5th ed. Dordrechth: Kluwer Academic, 2001. 849 p.

OLSON, R.A.; KURTZ, L.T. Crop nitrogen requirements, utilization, and fertilization. In: STEVENSON, F.J. **Nitrogen in agricultural soils**. Madison: Soil Science Society of America, 1982. p. 567-604.

- PROSSER, I.A.; PURVES, J.V.; SAKER, L.R.; CLARKSON, D.T. Rapid disruption of nitrogen metabolism and nitrate transport in spinach plants deprived of sulphate. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 52, p. 113-121, 2001.
- RAIJ, B.van.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. (Ed.). **Análise química para avaliação da fertilidade do solo**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. 285 p.
- RAVEN, J.A.; EDWARDS, D. Roots: evolutionary origins and biochemical significance. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 52, p. 381-401, 2001.
- ROBINSON, D.; RORISON, I.H. A quantitative analysis of the relationships between root distribution and nitrogen uptake from soil by two grass species. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 36, p. 71-85, 1985.
- ROSSIELO, R.O.P.; ARAÚJO, A.P.; MANZATTO, C.V.; FERNANDES, M.S. Comparação dos métodos fotoelétricos e da interação na determinação de área, comprimento e raio médio radicular. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 30, p. 633-638, 1995.
- SANTOS, A.R. dos. **Diagnose nutricional e respostas do capim-braquiária submetido a doses de nitrogênio e enxofre**. 1997. 115 p. Teses (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1997.
- SARRUGE, J.R.; HAAG, H.P. **Análises químicas em plantas**. Piracicaba: ESALQ, 1974. 56 p.
- SAS INSTITUTE. **SAS/STAT: user's guide**, version 8.0. Cary, 2000. 1 CD-ROM.
- SCHERER, H.W.; PACYNA, S.; SPOTH, K.R.; SCHULZ, M. Low levels of ferredoxin, ATP, and leghemoglobin contribute to limited N₂ fixation of peas (*Pisum sativum* L.) and alfalfa (*Medicago sativa* L.) under S deficiency conditions. **Biology and Fertility of Soils**, New York, v. 44, p. 909-916, 2008.
- SINCLAIR, A. An autoanalyzer method for determination of extractable sulphate in plant material. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 40, p. 693-697, 1974.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.
- TEDESCO, M.J.; VOLKWEISS, S.J.; BOHNEN, H. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1985. 95 p. (Boletim Técnico, 5).
- WILKINSON, S.R.; LANGDALE, G.W. Fertility needs of the warm-season grasses. In: MAYS, D.A.(Ed.). **Forage fertilization**. Madison: American Society of Agronomy, 1974. chap. 6, p. 119-145.

4 EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA PELO CAPIM-MARANDU ADUBADO COM NITROGÊNIO E ENXOFRE EM SOLO COM BAIXA FERTILIDADE

Resumo

A água é um recurso renovável, mas sua disponibilidade é variável e limitada em muitas regiões do planeta. Assim, é importante desenvolver técnicas na agropecuária que melhorem a eficiência do uso da água em sistemas agrícolas, visando minimizar a disputa entre a agricultura e a sociedade urbana pelo recurso hídrico limitado. Objetivou-se avaliar a combinação de doses de nitrogênio e enxofre no consumo e eficiência do uso da água pela *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. O experimento foi conduzido em casa de vegetação de setembro a dezembro de 2008, utilizando-se um solo classificado como Neossolo Quartzarênico e foram estudadas cinco doses de nitrogênio (0; 100; 200; 300 e 400 mg dm⁻³) combinadas com cinco doses de enxofre (0; 10; 20; 30 e 40 mg dm⁻³) em um fatorial 5² fracionado, com quatro repetições. A parte aérea do capim foi cortada três vezes em intervalos aproximados de 30 dias. A água do solo foi mantida a 70% da capacidade de retenção por meio de um sistema auto-irrigante. Ocorreu aumento no consumo e na eficiência do uso da água pela gramínea forrageira em razão do fornecimento de nitrogênio e enxofre. A adubação com nitrogênio incrementou o consumo e a eficiência no uso da água no primeiro período de crescimento. O fornecimento simultâneo de doses de nitrogênio e enxofre foi mais efetivo no aumento do consumo de água no terceiro período de crescimento e na eficiência no uso da água pelas plantas em dois períodos de crescimento do capim-marandu.

Palavras-chaves: Adubação; *Brachiaria brizantha*; Irrigação

Abstract

Water is a renewable resource, but its availability is variable and limited in many regions of the planet. It is, therefore, important to develop techniques to improve water use efficiency in agricultural systems in order to minimize the competition between agriculture and urban society for limited water resources. This study aimed to evaluate the effects of combination of nitrogen and sulphur fertilizations on water consumption and efficient use by *Brachiaria brizantha* cv. Marandu (Marandu palisadegrass). The experiment was carried out in a greenhouse from September to December 2008, and the soil was an Entisol. Five nitrogen rates (0; 100; 200; 300 and 400 mg dm⁻³) were combined with five sulfur rates (0, 10, 20, 30, and 40 mg dm⁻³) in a fractioned 5² factorial, with four replications. Plants were harvested three times at intervals of approximately 30 days. Soil moisture was maintained at 70% of capacity retention through a irrigating system. There was an increase in water consumption and water use efficiency by the forage grass due to the supply of nitrogen and sulphur. Only fertilization with nitrogen increased the water consumption and water use efficiency in the first growth period. Nitrogen and sulphur was more effective in increasing water consumption in the third growth period, and water use efficiency by plants in two growth periods of the Marandu palisadegrass.

Keywords: *Brachiaria brizantha*; Fertilization; Irrigation

4.1 Introdução

O desenvolvimento da agricultura, a intensificação dos cultivos e o aspecto técnico-econômico requerem maior esforço das pesquisas na adoção de práticas de manejo concernente ao consumo, à eficiência do uso da água e dos nutrientes pelas plantas, visando aumentar a produtividade das culturas e minimizar a disputa entre a agricultura e as sociedades urbanas pelos recursos hídricos limitados.

Estima-se que a área ocupada por pastagem no Brasil corresponde a 25% da área territorial, o que evidencia a importância das plantas forrageiras no cenário nacional, basicamente por se constituir na principal fonte para a alimentação de ruminantes. Em torno de 85% do total de área de pastagens no país é atualmente ocupado pelas plantas do gênero *Brachiaria*, em razão da produtividade e adaptação às condições climáticas da região tropical e subtropical.

A água, além de ser o principal constituinte do protoplasma, participa diretamente de muitas reações químicas. Portanto, a redução na absorção da água pela planta tem como consequência a desidratação celular e comprometem os processos fisiológicos e os componentes do crescimento (PÁEZ; GONZÁLES; YARUSQUI, 1995). A falta de água é uma das causas mais comuns de redução de área foliar, a qual está relacionada com a expansão das células (TAIZ; ZEIGER, 2004). Segundo Nelson e Velenec (1995), a baixa disponibilidade de água no solo é responsável pelo fechamento dos estômatos da planta, diminuindo a assimilação de CO₂, a transpiração, a expansão foliar e a alocação de fotoassimilados para seus órgãos, além da deficiência de alguns nutrientes, pela dificuldade da planta em absorvê-los nessas condições.

O consumo de água pela planta é influenciado pela disponibilidade de água no solo, demanda evaporativa da atmosfera, características morfo-fisiológicas da espécie e área foliar da cultura. O fluxo da água do solo para planta e desta para a atmosfera depende da disponibilidade hídrica no solo e da condução da água pelos órgãos da planta até as folhas, onde ocorre a regulação do fluxo transpiratório.

A eficiência do uso da água (EUA), segundo Sinclair, Tanner e Bennett (1984), é caracterizada como o rendimento da cultura por unidade de água consumida ou em termos mais biológicos como sendo o carboidrato formado na fotossíntese pela assimilação do CO₂, luz solar e pela quantidade de água evapotranspirada. Sabe-se que o consumo de água e o uso eficiente da água pelas culturas agrícolas dependem das condições físicas do solo, das condições atmosféricas

e de características das plantas (como estado nutricional, fatores fisiológicos, natureza genética e estágio de desenvolvimento). De acordo com Hatfield, Sauer e Prueger, (2001), práticas relativas ao manejo de nutrientes para as plantas podem aumentar em até 25% a eficiência do uso da água.

Em relação ao aspecto nutricional da planta, o nitrogênio é o principal nutriente para a produtividade das culturas (BARBANTI; MONTI; VENTURI, 2007) e principalmente para as plantas forrageiras. Devido à interdependência das rotas bioquímicas do nitrogênio e enxofre na síntese de proteínas, o enxofre pode interferir na resposta da planta forrageira à adubação nitrogenada e a combinação desses nutrientes pode afetar a produção das gramíneas (BONFIM-SILVA; MONTEIRO; SILVA, 2007; DE BONA; MONTEIRO, 2008).

A absorção dos nutrientes depende, entre outros fatores, da disponibilidade de água no solo e que, tanto para o nitrogênio quanto para o enxofre, o transporte até as raízes é essencialmente efetuado por fluxo de massa (LEMAIRE; HERBERT; CHARRIER, 1997). Em situação de deficiência hídrica, é reduzida a quantidade de nutrientes absorvida pelas plantas, afetando diretamente as características morfogênicas das plantas forrageiras e, indiretamente, as estruturais do dossel da pastagem. Segundo Lal et al. (2006), a produtividade das culturas depende da disponibilidade de água no solo.

Sabendo que a necessidade de água e nutrientes pela cultura varia com o estágio de desenvolvimento da planta e que o crescimento inicial tem influência direta nas demais etapas do ciclo de vida das plantas, objetivou-se avaliar os efeitos da aplicação de combinações de doses de nitrogênio e enxofre no consumo e na eficiência do uso da água pela *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, cultivada durante três períodos de crescimento em um solo com muito baixo teor de matéria orgânica.

4.2 Material e métodos

O experimento foi conduzido em casa de vegetação em Piracicaba-SP, em vasos plásticos com capacidade para 3,6 L, cultivando-se a *Brachiaria brizantha* cv. Marandu (capim-marandu), no período de setembro a dezembro de 2008. O estudo foi realizado em condições controladas, com o intuito de determinar o efeito da combinação das doses de nitrogênio e doses de enxofre, evitando a interferência de fatores ambientais.

A amostra de solo, classificado como Neossolo Quartzarênico (EMBRAPA, 1999), foi coletada na camada de 0-20 cm, secada ao ar, passada em peneira de 4 mm de malha e homogeneizada. Os atributos químicos do solo, antes da calagem, determinados de acordo com os métodos descritos em Raij et al. (2001), tiveram os seguintes resultados: P resina = 3 mg dm⁻³; MO = 9,5 g dm⁻³; pH em CaCl₂ = 4,0; K⁺ = 2,3 mmol_c dm⁻³; Ca²⁺ = 6 mmol_c dm⁻³; Mg²⁺ = 2 mmol_c dm⁻³; Al³⁺ = 8 mmol_c dm⁻³; H+Al = 40 mmol_c dm⁻³; CTC a pH 7,0 = 50,3 mmol_c dm⁻³; Soma de bases = 10,3 mmol_c dm⁻³; saturação por bases (V) = 20%; S-SO₄²⁻ = 2,6 mg kg⁻¹; Cu = 0,74 mg kg⁻¹; Fe = 39,5 mg kg⁻¹; Mn = 26,5 mg kg⁻¹; Zn = 0,57 mg kg⁻¹ e B = 0,36 mg kg⁻¹. A granulometria da amostra de solo, determinada conforme Camargo et al. (1986), revelou 75,1; 126,3 e 798,6 g kg⁻¹ de argila, silte e areia, respectivamente. A fração areia separada em areia muito grossa, areia grossa, areia média, areia fina e areia muito fina e mostrou os seguintes valores: 9,0; 3,8; 10,1; 467,9 e 307,8 g kg⁻¹, respectivamente.

Considerando as exigências nutricionais do capim-marandu e com base nos resultados das determinações químicas do solo, foi fornecida ao solo uma mistura de carbonato de cálcio com carbonato de magnésio, na proporção de Ca: Mg de 1,5:1,0, em quantidades obtidas com o uso do V₂ da fórmula para cálculo da calagem igual a 50%. O solo de cada vaso foi umedecido até 70% da capacidade de retenção de água com água desionizada e mantido pelo período de 35 dias para reação dos corretivos aplicados.

Combinações de cinco doses de nitrogênio (0; 100; 200; 300 e 400 mg dm⁻³) com cinco doses de enxofre (0; 10; 20; 30 e 40 mg dm⁻³) foram estudadas em fatorial 5² fracionado, de acordo com Littell e Mott (1975). As 13 combinações entre essas doses foram: 0-0; 0-20; 0-40; 100-10; 100-30; 200-0; 200-20; 200-40; 300-10; 300-30; 400-0; 400-20 e 400-40 mg dm⁻³, distribuídas em blocos ao acaso com quatro repetições. O nitrogênio foi fornecido como nitrato de amônio e o enxofre como sulfato de cálcio, ambos reagentes para análises. Todos os vasos receberam 200; 150; 50; 1,5; 2,5; 2,0 e 0,25 mg dm⁻³ de P; K; Mg; B; Cu; Zn e Mo, respectivamente e tiveram a quantidade de cálcio balanceada.

A umidade do solo no sistema solo + planta foi mantida por um sistema auto-irrigante subsuperficial, preparado como descrito por Bonfim-Silva, Monteiro e Silva (2007), que permitiu a reposição contínua de água de acordo com a necessidade das plantas, mantendo-se o solo na capacidade de retenção de água. Esse sistema possui uma cápsula de cerâmica porosa (vela de filtro com diâmetro de 5 cm e altura de 7 cm), inserida no solo, na porção superior do vaso. Um

microtubo flexível foi conectado à cápsula de cerâmica para manter o reservatório de capacidade de 1,8 L com nível constante de água e situado abaixo do vaso. Nesse reservatório é que foram realizadas reposições de água a cada dois ou três dias. O potencial de água no solo foi estabelecido pela altura da coluna de água entre o vaso e o reservatório (altura = 30 cm). Dessa forma, a transpiração da gramínea garantiu a reposição automática da água para o solo, tornando o sistema auto-irrigante. Uma escala de nível presa externamente ao reservatório possibilitou quantificar o consumo de água em cada unidade experimental.

As mudas do capim-marandu foram germinadas em sementeiras de areia lavada e foram transplantadas para os vasos quando tinham 5 cm de altura. Foram transplantadas 15 mudas em cada vaso, sendo realizados desbastes até permanecerem cinco plantas por vaso.

Três cortes foram realizados nas plantas, nos seguintes períodos de crescimento: 35 dias após o transplântio das mudas, 28 dias após o primeiro corte e 27 dias após o segundo corte. O corte das plantas foi realizado a 5 cm de altura da superfície do solo e todo o material colhido foi secado em estufa de ventilação forçada a 65 °C, até massa constante e posteriormente pesado. Na ocasião do corte, determinou-se a área foliar com o uso do aparelho integrador de área foliar LICOR®, modelo LI 3100.

Os valores parciais de consumo de água foram integralizados como total acumulado em cada crescimento da gramínea forrageira. A eficiência do uso da água, expressa por meio da razão massa seca e água consumida pelo capim-marandu, foi calculada em função das combinações de doses de nitrogênio e doses de enxofre.

Os resultados foram submetidos às análises estatísticas utilizando-se o aplicativo “Statistical Analysis System” (SAS Institute, 2000). A análise de regressão para os componentes de primeiro e segundo grau foi realizada pelo PROC GLM. No caso de significância da interação doses de nitrogênio e doses de enxofre utilizou-se o PROC RSREG.

4.3 Resultados e discussão

O consumo de água pelo capim-marandu variou conforme o período de crescimento (Figura 1). Os resultados de consumo de água no primeiro e segundo períodos de crescimento da gramínea mostraram efeitos significativos apenas da adubação com nitrogênio. No entanto, no

terceiro período de crescimento foi verificada significância para a interação doses de nitrogênio $\times$ doses de enxofre para a quantidade de água consumida pelas plantas.

O máximo consumo de água (7936 mL/vaso) durante o primeiro período de crescimento da gramínea forrageira foi observado na dose de nitrogênio de 297 mg dm⁻³ (Figura 1a), correspondendo ao consumo médio diário de 226,7 mL/vaso. Parte da água contabilizada como consumida nesse período foi perdida via evaporação da superfície do solo e não propriamente utilizada no metabolismo das plantas. No segundo período de crescimento do capim-marandu, o máximo consumo de água (13503 mL/vaso) foi verificado na dose de nitrogênio de 321 mg dm⁻³ (Figura 1b) e o consumo médio diário foi de 482,3 mL/vaso. Para essa mesma dose de nitrogênio no primeiro período de crescimento, o consumo médio diário foi de 226,4 mL, ou seja, não diferiu do consumo máximo atingido e foi 2,13 vezes inferior ao consumo de água observado no segundo período de crescimento da planta forrageira.

Aumentando o suprimento de nitrogênio no primeiro período de crescimento (fase inicial de estabelecimento da gramínea) o consumo de água não foi incrementado, o que pode ser explicado pela diminuta área foliar. Assim, as plantas tiveram pequena absorção, translocação e transpiração de água, ocorreu evaporação da água da superfície do solo, além da pequena densidade radicular em relação à profundidade do solo, o que resultou em menor extração de água e nutrientes do solo, como consequência do sistema radicular encontrar-se em formação. De acordo com Bergamaschi et al. (2004), no início do período de desenvolvimento da cultura, é reduzido o efeito da área foliar das plantas, e a evaporação do solo tende a ser maior, mas esta perde importância quando a área foliar das plantas é suficiente para diminuir a área exposta de solo.

A partir do segundo período de crescimento da planta forrageira, o sistema radicular já se encontrava formado, o metabolismo da planta tornou-se mais intenso, a área foliar aumentada promoveu maior interceptação da energia solar incidente e, por conseguinte, melhor assimilação de carbono. Como consequência, ocorreu aumento na produção de massa seca do capim, e diminuição da área exposta de solo, refletindo em aumento no consumo de água pela gramínea forrageira.

Figura 1 – Consumo de água pelo capim-marandu em resposta às doses de nitrogênio durante o primeiro e segundo períodos de crescimento (a e b) e às combinações das doses de nitrogênio com doses de enxofre no terceiro (c) período de crescimento

A quantidade de água absorvida pelo sistema radicular depende da quantidade de água disponível no solo para a planta, do arejamento, da temperatura do solo, da concentração da solução e da taxa de transpiração do vegetal.

Observou-se que tanto para o primeiro quanto para o segundo período de crescimento do capim-marandu, não houve resposta significativa da aplicação de doses de enxofre, devido à baixa demanda desse nutriente pela planta, principalmente no primeiro período de crescimento e ao teor de enxofre no solo ser suficiente para o seu desenvolvimento. Essa disponibilidade de enxofre no solo pode ser atribuída à adubação com doses de enxofre e à mineralização da matéria orgânica do solo (NASCIMENTO; MORELLI, 1980), estimulada pela alta temperatura e pela adequada umidade do solo nos vasos, o que supriu a demanda de enxofre pelo capim.

Na época de condução do terceiro período de crescimento das plantas, a temperatura na casa de vegetação chegou a atingir nível elevado (máxima de 46°C), o que aumentou a transpiração e diminuiu a condutância estomática (SALIENDRA; MEINZER, 1991). Valores elevados de consumo de água e produção de massa seca foram observados nesse período em relação ao primeiro período de crescimento da gramínea. Porém em relação ao segundo período, não se observou grande variação no consumo de água e na produção de massa seca, visto que em altas temperaturas, a planta transpirou mais e não aumentou sua produção, devido ao elevado gasto energético para manter o balanço hídrico. A energia requerida para esse processo é principalmente oriunda da radiação solar direta, e em menor grau da temperatura do ar (ALLEN et al., 2005). As doses de nitrogênio e doses de enxofre que promoveram o máximo consumo de água foram de 329 e 31 mg dm⁻³, respectivamente (Figura 1c), com relação N:S na adubação de 10,6:1 e consumo médio diário de água pela gramínea forrageira de 492,8 mL/vaso.

Para gramíneas, Dijkshoorn e van Wijk (1967) sugeriram a relação N:S no tecido vegetal próxima de 14:1 como adequada para essas plantas, apesar de acima da encontrada nesse experimento, as plantas não demonstraram problemas em seu desenvolvimento, relacionados ao excesso ou falta de nutrientes. O incremento no consumo de água pelo capim-marandu com a combinação de doses de nitrogênio e doses de enxofre (Figura 1c) está relacionado diretamente ao efeito positivo no aumento da produção de massa seca desse capim proporcionado pela adição concomitante desses nutrientes. Tanto o nitrogênio quanto o enxofre desempenham funções na planta responsáveis pelo aumento da produção e mesmo sendo o enxofre requerido pelas plantas em pequenas quantidades, ele está intimamente relacionado ao metabolismo do nitrogênio

(CRAWFORD et al., 2000). Dessa maneira, observa-se que a adubação com nitrogênio e enxofre passa a ter efeito indireto no consumo de água por meio da fisiologia da planta forrageira. Porém, sabe-se que se o solo não tiver adequada disponibilidade de água, a absorção dos nutrientes pode ser limitada. Nesse experimento a água foi fornecida por um sistema auto-irrigante, o qual manteve a umidade do solo a 70% da capacidade de retenção de água durante todo o experimento, não sendo assim, fator limitante para a absorção de nutrientes. Bittman e Simpson (1987) observaram que em condições de baixa disponibilidade de água no solo, a área foliar da gramínea é reduzida, pois o equilíbrio entre a produção de assimilados e a demanda para o desenvolvimento dos órgãos reprodutivos é afetado (GERIK; FAVER; THAXTON, 1996).

Analisando-se o consumo de água nos três períodos de crescimento do capim, nota-se que, em relação ao total do ciclo, o consumo de água durante a fase inicial de desenvolvimento, foi em torno de 26,2%, considerados apenas os primeiros 35 dias. Esse consumo de água foi baixo se comparado ao 38,9% representado pelo consumo no segundo período de crescimento, estágio fenológico em que a cultura atinge o máximo desenvolvimento e crescimento, demandando maior quantidade de água. Para o terceiro período de crescimento o consumo de água representou 34,9% do total de água consumida pelo capim-marandu durante todo o ciclo de desenvolvimento. Com isso, observa-se a variação na necessidade de água em cada estágio fenológico da planta.

Batista e Monteiro (2006), para o capim-marandu, porém em solo com baixa MO e teor de $S-SO_4^{2-}$ 2,8 vezes superior ao deste estudo, obtiveram as mesmas respostas para o consumo de água pela planta nos três períodos de crescimento da planta. De Bona e Monteiro (2008), para o mesmo capim e em solo com muito alta MO e o mesmo teor de $S-SO_4^{2-}$ do experimento de Batista e Monteiro (2006), não constatarem efeito significativo para a aplicação de doses de nitrogênio e doses de enxofre no primeiro período de crescimento, porém observaram efeito significativo para a interação doses de nitrogênio x doses de enxofre no segundo e terceiro períodos de crescimento. Bonfim-Silva, Monteiro e Silva (2007) para o capim-braquiária (*Brachiaria decumbens*) em um solo com alta MO e teor de $S-SO_4^{2-} = 4,32 \text{ mg dm}^{-3}$, verificaram resposta significativa à aplicação de doses de enxofre no primeiro período de crescimento do capim, indicando maior exigência de enxofre pelo capim-braquiária em relação ao capim-marandu nesse período de desenvolvimento e que o baixo teor de enxofre disponibilizado pela mineralização da matéria orgânica não foi suficiente para atender a necessidade da cultura em relação a esse nutriente (TISDALE; BEATON; NELSON, 1985). No segundo e terceiro períodos de crescimento obtiveram resposta

significativa apenas para as doses de nitrogênio. Conclui-se com esses experimentos, que apesar das diferenças nos teores de matéria orgânica e enxofre-sulfato dos solos em questão, a exigência por enxofre pelo capim-marandu na fase de estabelecimento foi baixa, estando relacionada também com a menor produção de massa seca nesse período e consequentemente menor consumo de água pela planta. Para o capim-braquiária, o aumento da produção de massa verde demandou elevadas doses de nitrogênio combinadas com elevadas doses de enxofre e, por conseguinte, maior consumo de água pela planta, enquanto para o segundo e terceiro períodos, a planta já suprida em enxofre respondeu significativamente apenas às doses de nitrogênio.

A demanda por nutrientes varia com a espécie vegetal, com o estágio de desenvolvimento da planta e a absorção destes vai depender da disponibilidade dos nutrientes e de água no solo. Segundo Petry et al. (2007), a vegetação define a velocidade de extração de água do solo, a qual também é variável com o tempo, em função do crescimento da área foliar e da expansão do sistema radicular. O aumento da área foliar das plantas permite maior interceptação da radiação, elevando a demanda de água da cultura e, ocasionando uma melhor eficiência do uso da água do solo pela planta.

A eficiência do uso da água no primeiro período de crescimento do capim foi significativamente influenciada pela adubação nitrogenada (Figura 2a). O fornecimento de até 250 mg dm⁻³ de nitrogênio resultou em aumento na eficiência do uso da água pelo capim no primeiro período de crescimento (Figura 2a), sendo que a dose de nitrogênio de 219 mg dm⁻³ proporcionou a máxima eficiência do uso da água (2 g L⁻¹). As plantas apresentaram alta capacidade em converter o volume de água consumido em produção de massa seca. A água é importante para a formação e transporte de todas as substâncias solúveis, fotossintatos e carboidratos da fonte para a transformação em massa seca da parte aérea do capim. Além disso, a água absorvida pela planta é via importante de condução de nutrientes dissolvidos do solo até a superfície radicular, para que ocorra a absorção (TAIZ; ZEIGER, 2004), sendo muito significativo para o nitrogênio e enxofre, os quais são absorvidos por fluxo de massa.

De Bona e Monteiro (2008) verificaram que o nitrogênio é imprescindível para a planta ser mais eficiente no uso da água no primeiro e terceiro períodos de crescimento do capim-marandu, sendo que as doses de nitrogênio que proporcionaram a máxima eficiência do uso da água do solo para produção de massa seca pelo capim foram de 336 e 254 mg dm⁻³, respectivamente.

Figura 2 – Eficiência no uso da água pelo capim-marandu em resposta às doses de nitrogênio durante o primeiro período de crescimento (a) e às combinações das doses de nitrogênio com doses de enxofre no segundo (b) e terceiro (c) períodos de crescimento

Calvache et al. (1997), para a cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris*), Shangguan, Shao e Dyckmans (2000), para o trigo de inverno (*Triticum aestivum*) e Cabrera-Bosque et al. (2007) para a cultura do trigo duro (*Triticum durum*) observaram que a planta usou mais eficientemente a água quando submetida a altas doses de nitrogênio, proporcionando aumento na produção de massa seca. Angus e Herwaarden (2001) verificaram que a fertilização com nitrogênio afetou a eficiência do uso da água pela cultura do trigo. Tesha e Kumar (1978) para a cultura do café (*Coffea arabica*) e Shangguan, Shao e Dyckmans (2000), para o trigo de inverno, comprovaram que o fornecimento de nitrogênio em condições adequadas de disponibilidade de água no solo aumenta a condutância estomática, resultando em incremento na eficiência do uso da água pela planta.

Segundo Correia et al. (2005), o fornecimento de elevadas doses de nitrogênio afeta a taxa de assimilação de carbono, já que esse nutriente faz parte dos principais componentes do sistema fotossintético, tais como clorofila, carboxilase/oxigenase da ribulose 1,5 bisfosfato (RubisCO) e carboxilase do fosfoenolpiruvato (PEPcase). Essa relação entre nitrogênio e fotossíntese (REDDY et al., 1996) aumenta a eficiência no uso da água pela planta e de acordo com Kowal e Kassam (1973), a eficiência do uso da água está intimamente relacionada com o potencial da água no solo e o índice de área foliar.

Hubick, Farquhar e Shorter (1986) observaram alto coeficiente de correlação para a produção de massa seca e a transpiração pela planta, quando analisaram genótipos de amendoins (*Arachis hupogaea*), afetando a eficiência do uso da água pelas plantas.

French e Schultz (1984) observaram que a absorção de nutriente pela planta está relacionada ao uso da água. Para a produção de 55 kg ha⁻¹ de massa seca por mm de água transpirada, a planta responde à absorção de nitrogênio por fluxo de massa de 0,65 kg ha⁻¹.

Para o segundo e terceiro períodos de crescimento, foi verificada significância para a interação doses de nitrogênio x doses de enxofre na eficiência do uso da água pela planta forrageira, observando que, dentro de qualquer das doses de enxofre, à medida que se incrementou a dose de nitrogênio o capim foi mais eficiente no uso da água (Figuras 2b e 2c). A eficiência do uso da água tanto no segundo quanto no terceiro períodos de crescimento da gramínea forrageira teve o valor máximo por volta de 3 g L⁻¹ (Figura 2b e 2c). Os valores de eficiência do uso da água encontrados nesse experimento concordam com os obtidos por Batista e Monteiro (2006) e De Bona e Monteiro (2008) que estudaram doses de nitrogênio e doses de

enxofre para capim-marandu, observando valores de eficiência do uso da água também por volta de 3 g L^{-1} . Bonfim-Silva, Monteiro e Silva (2007) para capim-braquiária, aplicando as mesmas doses de nitrogênio e enxofre, verificaram valores de eficiência do uso da água de 3 g L^{-1} para o primeiro período de crescimento da gramínea e valores próximos a 7 g L^{-1} para o segundo e terceiro períodos de crescimento da planta. Cabe destacar, que todos esses experimentos, incluindo o em estudo, fizeram uso de sistema de irrigação, ou seja, a disponibilidade de água no solo foi constante durante toda a condução do experimento, não ocorrendo déficit hídrico e não sendo este o fator limitante para o desenvolvimento da planta. Nesse sentido, a contribuição da aplicação de doses de nitrogênio e enxofre foi importante para aumentar a produção de massa seca da gramínea, aumentando a evapotranspiração, a qual determinou a quantidade de água consumida pelas plantas. O resultado é que a planta bem nutrida em nitrogênio e enxofre torna-se mais eficiente no uso da água disponível no solo.

4.4 Conclusões

O pronunciado aumento no consumo e na eficiência do uso da água pela *Brachiaria brizantha* cv. Marandu foi devido ao fornecimento dos nutrientes nitrogênio e enxofre. Na fase de estabelecimento do capim, observou-se efeito isolado da aplicação de doses de nitrogênio para o consumo e eficiência no uso da água. A falta de resposta ao enxofre foi devida à baixa demanda do capim-marandu na fase de estabelecimento. O aumento no consumo de água pela gramínea no segundo período de crescimento foi também em função apenas das doses de nitrogênio, a qual contribuiu para maior produção de massa seca, aumentando a evapotranspiração, o que resultou no aumento no consumo de água pela planta. O fornecimento simultâneo de doses de nitrogênio e doses de enxofre foi mais efetivo no aumento do consumo de água no terceiro período de crescimento e na eficiência no uso da água pelas plantas em dois períodos de crescimento do capim-marandu.

Referências

ALLEN, R.G.; ASCE, M.; PEREIRA, L.S.; ASCE, M.; SMITH, M.; RAES, D.; WRIGTH, J.L. FAO-56 dual crop coefficient method for estimating evaporation from soil and application extensions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering ASCE**, Reston, v. 131, p. 2-13, 2005.

ANGUS, J.F.; Van HERWAARDEN, A.F. Increasing water use and water use efficiency in dryland wheat. **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, p. 290-298, 2001.

BARBANTI, L.; MONTI, A.; VENTURI, G. Nitrogen dynamics and fertilizer use efficiency in leaves of different ages of sugar beet (*Beta vulgaris*) at variable water regimes. **Annals of Applied Biology**, Hoboken, v. 150, p. 197-205, 2007.

BATISTA, K.; MONTEIRO, F.A. Respostas morfológicas e produtivas do capim-marandu adubado com doses combinadas de nitrogênio e enxofre. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 35, p. 1281-1288, 2006.

BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G.A.; BERGONCI, J.I.; BIANCHI, C.A.M.; MÜLLER, A.G.; COMIRAN, F.; HECKLER, B.M.M. Distribuição hídrica no período crítico do milho e produção de grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, p. 831-839, 2004.

BITTMAN, S.; SIMPSON, G.M. Soil water deficit effect on yield, leaf area, and net assimilation rate of three forage grasses: crested wheatgrass, Madison smooth brome grass and altai wildrye. **Agronomy Journal**, Madison, v. 79, p. 768-774, 1987.

BONFIM-SILVA, E.M.; MONTEIRO, F.A.; SILVA, T.J.A. Nitrogênio e enxofre na produção e no uso de água pelo capim-Braquiária em degradação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 309-317, 2007.

CABRERA-BOSQUE, L.; MOLERO, G.; BORT, J.; NOGUÉS, S.; ARAUS, J.L. The combined effect of constant water deficit and nitrogen supply on WUE, NUE and $\Delta^{13}\text{C}$ in durum wheat potted plants **Annals of Applied Biology**, Hoboken, v. 151, p. 277-289, 2007.

CALVACHE, A.M.; REICHARDT, K.; MALAVOLTA, E.; BACCHI, O.O.S. Efeito da deficiência hídrica e da adubação nitrogenada na produtividade e na eficiência do uso de água em uma cultura do feijão. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 54, p. 232-240, 1997.

CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.A.S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Campinas: Instituto Agronômico, 1986. 94 p. (IAC. Boletim Técnico, 106).

CORREIA, C.M.; MOUTINHO PEREIRA, J.M.; COUTINHO, J.F.; BJÖRN, L.O.; TORRES-PERREIRA, J.M.G. Ultraviolet-B radiation and nitrogen affect the photosynthesis of maize: a Mediterranean field study. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 22, p. 337-347, 2005.

CRAWFORD, N.M.; KAHN, M.L.; LEUSTEK, T.; LONG, S.R. Nitrogen and sulphur. In: BUCHANAN, B.B.; GRUISSEM, W.; JONES, R.L. (Ed.). **Biochemistry and molecular biology of plants**. Rockville: American Society of Plant Physiologists, 2000. chap. 16, p. 786- 849.

DE BONA, F.D.; MONTEIRO, F.A. Nitrogênio e enxofre na eficiência do uso da água pelo capim-Marandu em estabelecimento. **Ecossistema**, Espírito Santo do Pinhal, v. 32, p. 17-22, 2008.

DIJKSHOORN, W.; Van WIJK, A.L. The sulphur requirements of plants as evidenced by the sulphur-nitrogen ratio in the organic matter: A review of published data. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 26, p. 129-157, 1967.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 1999. 412 p.

FRENCH, R.J.; SCHULTZ, J.E. Water use efficiency of wheat in a mediterranean-type environment. II. Some limitations to efficiency. **Australian Journal of Agricultural Research**, Collingwood, v. 35, p. 765-775, 1984.

GERIK, T.J.; FAVER, K.L.; THAXTON, P.M. Late season water stress in cotton: I. Plant growth, water uses, and yield. **Crop Science**, Madison, v. 36, p. 914-921, 1996.

HATFIELD, J.L.; SAUER, T.J.; PRUEGER, J.H. Managing soils to achieve greater water use efficiency: a review. **Agronomy Journal**, Madison, v. 93, p. 271-280, 2001.

HUBICK, K.T.; FARQUHAR, G.D.; SHORTER, R. Correlation between water-use efficiency and carbon isotope discrimination in diverse peanut (*Arachis*) germplasm. **Australian Journal of Plant Physiology**, Rockville, v. 13, p. 803-816, 1986.

KOWAL, J.M.; KASSAM, A.H. Water use, energy balance and growth of maize at Samaru, Northern Nigeria. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 12, p. 391-406, 1973.

LAL, C.; HARIPRASANNA, K.; RATHNAKUMAR, A.L.; GOR, H.K.; CHIKANI, B.M. Gene action for surrogate traits of water-use-efficiency and harvest index in peanut (*Arachis hypogaea*). **Annals of Applied Biology**, Hoboken, v. 148, p. 165-172, 2006.

LEMAIRE, G.; HERBERT, Y.; CHARRIER, X. Nitrogen uptake capacities of maize and sorghum crops in different nitrogen and water supply conditions. **Agronomie**, Paris, v. 16, p. 231-246, 1997.

LITTELL, R.C.; MOTT, G.O. Computer assisted design and analysis of response surface experiments in agronomy. **Soil and Crop Society of Florida Proceedings**, Ona, v. 34, p. 94-97, 1975.

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

NELSON, C.J.; VOLENEC, J.J. Integrative environmental and physiological aspects of forage management: the science of grassland agriculture. In: BARNES, R.F.; MILLER, D.A.; NELSON, C.J. (Ed.). **Forages**. Ames: Iowa State University Press, 1995. v. 1: An introduction to grassland agriculture, p. 55-69.

PÁEZ, A.; GONZÁLES, M.E.; YARUSQUI, O.X. Water stress and clipping management effects on guinea grass: I Growth and biomass allocation. **Agronomy Journal**, Madison, v. 87, p. 698-707, 1995.

PETRY, M.T.; ZIMMERMANN, F.Z.; CARLESSO, R.; MICHELON, J.C.; KUNZ, J.H. Disponibilidade de água do solo ao milho cultivado sob sistemas de semeadura direta e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 531-539, 2007.

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

REDDY, A.R.; REDDY, K.R.; PADJUNG, R.; HODGES, H.F. Nitrogen nutrition and photosynthesis in leaves of pima cotton. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v. 19, p. 755-770, 1996.

SALIENDRA, N.Z.; MEINZER, F.C. Symplast volume, turgor, stomatal conductance and growth in relation to osmotic and elastic adjustment in droughted sugarcane. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 42, p. 1251-1259, 1991.

SAS INSTITUTE. **SAS/STAT**: user's guide, version 8.0. Cary, 2000. 1 CD-ROM.

SHANGGUAN, Z.P.; SHAO, M.A.; DYCKMANS, J. Nitrogen nutrition and water stress effects on leaf photosynthetic gas exchange and water use efficiency in winter wheat. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 44, p. 141-149, 2000.

SINCLAIR, T.R.; TANNER, C.B.; BENNETT, J.M. Water use efficiency in crop production. **BioScience**, Washington, v. 34, p. 36-40, 1984.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.

TESHA, A.J.; KUMAR, D. Effect of fertilizer nitrogen on drought resistance in *Coffea arabica* L. **Journal of Agricultural Science**, New York, v. 90, p. 625-631, 1978.

TISDALE, S.L.; BEATON, J.D.; NELSON, W.L. **Soil fertility and fertilizers**. 4th ed. New York: Mac Millan, 1985. 754 p.

5 ADUBAÇÕES COM NITROGÊNIO E ENXOFRE E AS VARIÁVEIS ESTRUTURAIS, NA PRODUÇÃO DE MASSA SECA E NO ACÚMULO DESSES NUTRIENTES PELO CAPIM-MARANDU

Resumo

A adubação com de nitrogênio tem proporcionado alterações estruturais e produtivas nos capins, mas há necessidade de conhecer a demanda por enxofre principalmente em solos com baixa disponibilidade nesse nutriente. Dessa maneira, objetivou-se avaliar as combinações de doses de nitrogênio e doses de enxofre nas variáveis estruturais, na produção de massa seca e na quantidade acumulada desses nutrientes pela *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. O experimento foi conduzido em casa de vegetação de setembro a dezembro de 2008, utilizando-se um solo classificado como Neossolo Quartzarênico, com muito baixo teor de matéria orgânica e baixo teor de enxofre-sulfato. Foram estudadas cinco doses de nitrogênio (0; 100; 200; 300 e 400 mg dm⁻³) combinadas com cinco doses de enxofre (0; 10; 20; 30 e 40 mg dm⁻³) em um fatorial 5² fracionado, com quatro repetições. A parte aérea do capim foi cortada três vezes em intervalos aproximados de 30 dias. O número de folhas, número de perfilhos, área foliar, massa seca da parte aérea e as quantidades acumuladas de nutrientes pela parte aérea do capim, responderam significativamente à adubação nitrogenada no primeiro corte das plantas, mas houve a necessidade de adicionar o enxofre na adubação com nitrogênio para maximizar essas variáveis nos dois crescimentos posteriores do capim-marandu.

Palavras-chave: Área foliar; *Brachiaria brizantha*; Número de perfilhos

Abstract

Nitrogen fertilization provides structural and productive changes in grass, but there is need to know the demand for sulphur, mainly in soil with low availability of this nutrient. Thus, the objective of this study was to evaluate the effects of nitrogen and sulphur application rates on structural characteristics, aboveground forage yield and nutrient content in the *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. The experiment was carried out under greenhouse conditions from September to December, 2008, with an Entisol that had low contents of organic matter and sulphate-sulphur. Five nitrogen rates (0; 100; 200; 300 and 400 mg dm⁻³) and five sulphur rates (0; 10; 20; 30 and 40 mg dm⁻³) were combined in a fractionated 5² factorial, with four replications. Numbers of leaves, number of tillers, leaf area, shoot dry mass and nitrogen content in the shoots of forage grass showed significant responses to nitrogen fertilization in the first harvest but it was necessary to add sulphur in the fertilization to maximize these variables for following two harvests of the grass. Nitrogen $\times$ sulphur rates interaction was significant for the sulphur content in the forage in the first harvest.

Keywords: *Brachiaria brizantha*; Leaf area; Number of tillers

5.1 Introdução

As pastagens consistem na opção alimentar mais abundante e de menor custo para a alimentação de bovinos. No Brasil, foram introduzidas gramíneas tropicais que se adaptaram bem e mostraram boa produtividade, quando adequadamente manejadas e adubadas. Entre elas, destaca-se a *Brachiaria brizantha* cv. Marandu, a qual foi lançada pela EMBRAPA como opção forrageira para a região dos Cerrados (NUNES et al., 1985).

A produtividade das gramíneas forrageiras está intrinsecamente relacionada à contínua emissão de folhas e perfilhos, as quais são responsáveis pela restauração da área foliar e aumento da capacidade fotossintética do dossel após o corte mecânico ou pastejo das plantas. Os processos de formação e desenvolvimento de folhas são fundamentais para o crescimento vegetal, para a produção de massa seca, visto que as folhas são essenciais para a fotossíntese, que é o ponto de partida para a formação de novos tecidos (LEMAIRE; CHAPMAN, 1996). O surgimento de perfilhos ajuda o pasto a cobrir o solo em menos tempo, diminuindo a chance de invasão da área com plantas indesejáveis, principalmente durante o estabelecimento da pastagem.

Nos trópicos, normalmente ocorrem limitações em termos de fertilidade do solo para a nutrição das plantas. Assim, a reposição de nutrientes ao solo pela adubação pode aumentar a capacidade de produção da pastagem, sobretudo pela adubação nitrogenada, por seu efeito positivo no fluxo de biomassa (DURU; DUCROCQ, 2000). Em virtude das características morfofisiológicas, como arquitetura de planta e eficiência fotossintética, as plantas forrageiras tropicais respondem muito bem até a elevadas doses de nitrogênio (CANTARUTTI et al., 2002).

O nitrogênio está presente nos aminoácidos e proteínas, participa da molécula de clorofila e é essencial para a utilização de carboidratos na planta, além de estimular o crescimento de folhas, caules e raízes, promovendo absorção de maior quantidade dos outros nutrientes (TAIZ; ZEIGER, 2004).

A importância do enxofre para a nutrição da planta também é destacada, visto que é componente da acetil CoA, das vitaminas tiamina e biotina, além de ser constituinte dos aminoácidos cisteína, metionina e cistina, os quais contêm cerca de 99% do total do elemento na planta (LEUSTEK et al., 2000). O uso de enxofre simultaneamente ao nitrogênio na adubação pode incrementar a quantidade desses nutrientes retiradas do solo e aumentar a produção de massa seca das gramíneas (MATHOT et al., 2008), pois o enxofre está intimamente ligado ao

metabolismo do nitrogênio (CRAWFORD et al., 2000). De acordo com Friedrich e Schrader (1978), plantas deficientes em enxofre diminuem a taxa fotossintética e a concentração de clorofila nas folhas, porém quando bem supridas com esse nutriente aumentam a utilização de nitrogênio na síntese protéica, aumentando a taxa fotossintética das folhas.

Considerando a adubação simultânea de nitrogênio e enxofre como fundamentais para o desenvolvimento das variáveis estruturais e produtivas das gramíneas forrageiras, objetivou-se avaliar a quantidade emitida de folhas e perfilhos, a área foliar, a produção de massa seca e quantidade acumulada de nitrogênio e enxofre pela parte aérea da *Brachiaria brizantha* Stapf. cv. Marandu, em três ciclos de crescimento, quando submetida a combinações de doses de nitrogênio com doses de enxofre, em solo com baixa disponibilidade desses nutrientes.

5.2 Material e métodos

O experimento foi conduzido em casa de vegetação em Piracicaba-SP, no período de setembro a dezembro de 2008, utilizando-se a gramínea forrageira *Brachiaria brizantha* cv. Marandu (capim-marandu). Foi empregada amostra de solo (camada de 0-20 cm) classificado como Neossolo Quartzarênico, que foi seca ao ar, passada em peneira de 4 mm de malha e homogeneizada. Os atributos químicos do solo, determinados de acordo com os métodos descritos em Raij et al. (2001), revelaram: P resina = 3 mg dm⁻³; MO = 9,5 g dm⁻³; pH em CaCl₂ = 4,0; K⁺ = 2,3 mmol_c dm⁻³; Ca²⁺ = 6 mmol_c dm⁻³; Mg²⁺ = 2 mmol_c dm⁻³; Al³⁺ = 8 mmol_c dm⁻³; H + Al = 40 mmol_c dm⁻³; CTC a pH 7,0 = 50,3 mmol_c dm⁻³; Soma de bases = 10,3 mmol_c dm⁻³; saturação por bases (V) = 20%; S-SO₄²⁻ = 2,6 mg kg⁻¹; Cu = 0,74 mg kg⁻¹; Fe = 39,5 mg kg⁻¹; Mn = 26,5 mg kg⁻¹; Zn = 0,57 mg kg⁻¹ e B = 0,36 mg kg⁻¹. Os teores iniciais de N-total, N-NH₄⁺, N-NO₃⁻ foram de: 400; 2,2 e 3,4 mg kg⁻¹, respectivamente.

Foi realizada a correção da acidez do solo mediante a aplicação de doses de carbonato de cálcio e de magnésio na proporção de Ca: Mg de 1,5:1,0, as quais foram calculadas com base nos resultados das determinações químicas do solo e das exigências nutricionais do capim-marandu, considerando o V₂ = 50% na fórmula de necessidade de calagem. O solo de cada vaso foi umedecido até 70% da capacidade de retenção de água com água desionizada e mantido pelo período de 35 dias para reação dos corretivos aplicados.

Foram estudadas cinco doses de nitrogênio (0; 100; 200; 300 e 400 mg dm⁻³) e cinco doses de enxofre (0; 10; 20; 30 e 40 mg dm⁻³) combinadas em fatorial 5² fracionado, de acordo com Littell e Mott (1975). Foram empregadas 13 combinações entre essas doses: 0-0; 0-20; 0-40; 100-10; 100-30; 200-0; 200-20; 200-40; 300-10; 300-30; 400-0; 400-20 e 400-40 mg dm⁻³, as quais foram distribuídas em blocos ao acaso, com quatro repetições. O nitrogênio foi fornecido como nitrato de amônio e o enxofre como sulfato de cálcio, ambos reagentes para análises. Todos os vasos receberam 200; 150; 50; 1,5; 2,5; 2,0 e 0,25 mg dm⁻³ de P; K; Mg; B; Cu; Zn e Mo, respectivamente e tiveram a quantidade de cálcio balanceada. A umidade dos vasos foi mantida por sistema auto-irrigante subsuperficial, segundo Bonfim-Silva, Monteiro e Silva (2007), o qual repunha a água conforme a necessidade do capim-marandu.

Cinco plantas de capim-marandu foram cultivadas por vaso. Três cortes foram realizados nas plantas, com os seguintes períodos de crescimento: 35 dias após o transplântio das mudas, 28 dias após o primeiro corte e 27 dias após o segundo corte. As diferenças de tempo que ocorreram entre os ciclos de crescimento das plantas são devidas às variações climáticas ocorridas no período experimental, pois as plantas sempre foram colhidas no estágio inicial de senescência. O corte das plantas foi realizado a 5 cm de altura da superfície do solo. Todo o material colhido foi secado em estufa de ventilação forçada a 65 °C, até massa constante, posteriormente pesado e moído para caracterização química. Na colheita foram quantificados os números de folhas e perfilhos e a área foliar das plantas. A área foliar foi determinada com o uso do aparelho integrador de área foliar LI-COR®, modelo LI 3100. As concentrações de nitrogênio e de enxofre total foram determinadas segundo metodologia descrita por Sarruge e Haag (1974) e a partir delas foram calculadas as quantidades acumuladas dos dois nutrientes na parte aérea do capim.

Os resultados foram submetidos às análises estatísticas utilizando-se o aplicativo “Statistical Analysis System” (SAS INSTITUTE, 2000). No caso de significância da interação doses de nitrogênio $\times$ doses de enxofre utilizou-se o comando PROC RSREG. Porém, quando não foi significativa essa interação, utilizou-se a análise de regressão pelo PROC GLM, para os componentes de primeiro e segundo graus. Foi considerado o nível de significância de 5% em todos os testes estatísticos.

5.3 Resultados e discussão

A aplicação de doses de nitrogênio elevou o número de perfilhos no primeiro corte do capim-marandu (Figura 1a) e o máximo número de perfilhos foi obtido na dose de nitrogênio de 307 mg dm⁻³. A adição dessa dose de nitrogênio aumentou em 71% o número de perfilhos, em relação ao não suprimento desse nutriente. A resposta positiva do perfilhamento à adubação nitrogenada está associada ao estímulo do nitrogênio no crescimento e na multiplicação de células vegetais, uma vez que esse nutriente constitui as proteínas e os ácidos nucleicos celulares. Nabinger (1996) afirmou que o déficit de nitrogênio aumenta o número de gemas dormentes, enquanto o suprimento desse nutriente proporciona mais elevado perfilhamento.

Garcez Neto et al. (2002) verificaram efeito expressivo do suprimento de nitrogênio no número de perfilhos (21% na densidade populacional de perfilhos) do capim-mombaça (*Panicum maximum* cv. Mombaça). Segundo esses autores, o perfilhamento em gramíneas é uma característica estrutural determinante da plasticidade morfogênica das plantas forrageiras influenciada por combinações de fatores nutricionais, ambientais e de manejo.

Rodrigues et al. (2008), trabalhando com capim-marandu em dois solos, sendo um adubado recentemente e o outro que não recebeu adubação, verificaram influência da adubação nitrogenada no número de perfilhos para os dois solos, sendo que para o máximo perfilhamento foram necessários a aplicação de nitrogênio de 184 e 161 mg kg⁻¹ para o solo recentemente adubado e o que não recebeu adubação, respectivamente.

A combinação de doses de nitrogênio com doses de enxofre foi significativa na produção de perfilhos no segundo e terceiro cortes da gramínea forrageira (Figuras 1b e 1c). As doses de nitrogênio e doses de enxofre que promoveram o máximo perfilhamento foram respectivamente de 358 e 29 mg dm⁻³ para o segundo e de 299 e 35 mg dm⁻³ para o terceiro corte do capim-marandu. A adição de nitrogênio de 300 mg dm⁻³ sem a aplicação de doses de enxofre produziu, em média, 34 e 53 perfilhos no segundo e terceiro cortes, respectivamente. Com a adição de 30 mg dm⁻³ de enxofre, o número de perfilhos foi elevado para 50 e 87 no segundo e terceiro cortes, respectivamente, o que representa aumento de 47 e 64% no número de perfilhos com a adição de enxofre no solo que havia recebido aquela dose de nitrogênio. A resposta positiva da adubação conjunta de nitrogênio e de enxofre na produção das plantas pode ser explicada pela interdependência das rotas bioquímicas de assimilação desses nutrientes (CRAWFORD et al., 2000).

Figura 1 - Número de perfilhos do capim-marandu em resposta às doses de nitrogênio à época do primeiro corte (a) e às combinações das doses de nitrogênio com doses de enxofre nas ocasiões do segundo e terceiro (b e c) cortes das plantas

O aumento do número de perfilhos do primeiro para o segundo corte do capim-marandu é devido ao fato de que, no período de crescimento inicial a planta concentra grande parte da energia para o seu estabelecimento, com a formação do sistema radicular e da parte aérea, enquanto que no segundo e terceiro períodos de crescimento, a planta já estabelecida e com mais elevado volume radicular, tem a capacidade de absorver maior quantidade de nutrientes do que as plantas em desenvolvimento inicial. Também, segundo Langer (1974), a ação do primeiro corte promove o desenvolvimento das gemas basais e a quebra de dormência apical, originando maior número de perfilhos nos períodos posteriores de crescimento.

O número de folhas do capim-marandu, à época do primeiro corte, foi significativamente alterado pelas doses de nitrogênio, sendo o mais elevado número de folhas obtido na dose de nitrogênio de 297 mg dm^{-3} (Figura 2a). Ruggieri, Favoretto e Malheiros (1994) observaram aumento no número de folhas em todos os períodos de crescimento avaliados do capim-marandu, com o incremento das doses de nitrogênio. O aumento no número de folhas justifica-se pelo fato de que a aplicação de doses de nitrogênio estimula a formação de novos tecidos foliares (OLIVEIRA et al., 2007).

Para o segundo e terceiro cortes da gramínea forrageira foi observada significância da interação doses de nitrogênio $\times$ doses de enxofre para o número de folhas (Figuras 2b e 2c). As doses de nitrogênio e doses de enxofre que resultaram no mais elevado número de folhas foram de 363 e 29 e 300 e 36 mg dm^{-3} , para as épocas do segundo e do terceiro cortes do capim, respectivamente. O equilíbrio estabelecido entre os dois nutrientes no capim maximizou a produção de folhas.

Verificando os resultados dos três períodos de crescimento do capim-marandu observou-se maior número de folhas nas ocasiões do segundo e terceiro cortes do capim do que no primeiro. Esse fato está relacionado com o mais elevado número de perfilhos emitidos nas rebrotações nesses períodos, visto que o número de folhas por perfilho é relativamente constante.

Com esses resultados, verifica-se que para se obter o máximo número de folhas expandidas foi necessário alto suprimento de nitrogênio combinado com altas doses de enxofre. Neste contexto, como para a adequada produtividade da pastagem é importante ter maior número de folhas e perfilhos, fica evidente que o fornecimento de alta dose de nitrogênio à gramínea deve ser acompanhado de adequado suprimento de enxofre, o que concorda com os resultados apresentados por Mattos e Monteiro (2003).

Figura 2 - Número de folhas do capim-marandu em resposta às doses de nitrogênio à época do primeiro corte (a) e às combinações das doses de nitrogênio com doses de enxofre na ocasião do segundo e terceiro (b e c) cortes das plantas

A adubação nitrogenada influenciou positivamente a área foliar do capim-marandu na época do primeiro corte das plantas (Figura 3a). Santos Júnior e Monteiro (2003) também observaram efeitos significativos da aplicação de doses de nitrogênio para esse mesmo capim. Martuscello et al. (2005) verificaram incremento da área foliar em até 130% no capim-xaraés (*Brachiaria brizantha* cv. Xaraés) para a aplicação da dose de nitrogênio de 120 mg dm⁻³, em comparação com a ausência do emprego desse nutriente.

Diferentemente do verificado na ocasião do primeiro corte da gramínea forrageira, no segundo e terceiro cortes foi observada significância para a interação doses de nitrogênio $\times$ doses de enxofre, em termos de área foliar (Figuras 3b e 3c). Para o segundo corte das plantas, a máxima área foliar do capim-marandu não foi atingida com as doses de nitrogênio e doses de enxofre utilizadas nesse experimento. No terceiro corte, a máxima área foliar foi obtida na dose de nitrogênio de 371,6 mg dm⁻³ combinada com a dose de enxofre de 39,5 mg dm⁻³ (relação entre essas doses de 9,5:1). Batista e Monteiro (2008) verificaram aumento na área foliar da gramínea forrageira mediante as adubações com nitrogênio e com enxofre, obtendo o máximo valor de área foliar na relação 7:1 entre as doses de nitrogênio e doses de enxofre, na ocasião do segundo corte do capim-marandu.

A área foliar determinada ao final do primeiro corte do capim-marandu foi menor do que aquela encontrada para o segundo e terceiro cortes. Isso ocorreu porque após o primeiro período de crescimento das plantas a energia utilizada para a formação do sistema radicular foi bem menor, e consequentemente mais energia foi disponibilizada para o crescimento da parte aérea da gramínea forrageira. O aumento da área foliar da planta forrageira resulta em maior eficiência fotossintética da planta, pois incrementa a área de interceptação luminosa e é importante fator para a produtividade da pastagem. A adubação nitrogenada promove aumento direto na área foliar fotossintetizante.

A folha é responsável pela captação de energia solar, de tal forma que mais área foliar proporciona maior exposição à luz, o que por sua vez, é importante fator para a produtividade do capim. Chapman e Lemaire (1993) apontaram que o suprimento de nitrogênio influi na elongação foliar, resultando em maior área foliar.

Também, o nitrogênio é fator controlador dos processos de crescimento e desenvolvimento das plantas e proporciona aumento de biomassa devido ao incremento na fixação de carbono

Figura 3 - Área foliar do capim-marandu em resposta às doses de nitrogênio à época do primeiro corte (a) e às combinações das doses de nitrogênio com doses de enxofre nas ocasiões do segundo e terceiro (b e c) cortes das plantas

(NABINGER, 2001). Assim, a maior área para captação de energia pode resultar em maior acúmulo de biomassa.

A produção de massa seca da parte aérea do capim-marandu no primeiro corte respondeu significativamente à adubação nitrogenada (Figura 4a), enquanto para o segundo e terceiro cortes foram verificados efeitos significativos da interação doses de nitrogênio $\times$ doses de enxofre na produção de massa seca da parte aérea do capim (Figuras 4b e 4c). A máxima produção de massa seca no primeiro corte foi obtida na dose de nitrogênio de 387 mg dm^{-3} , enquanto no segundo e terceiro cortes do capim as máximas produções foram atingidas com as combinações de doses de nitrogênio e doses de enxofre de 345 e 31 mg dm^{-3} e de $316,8$ e 32 mg dm^{-3} , respectivamente. A relação entre as doses de nitrogênio e as doses de enxofre para se obter a máxima produção de massa seca na parte aérea do capim foi de $11,1:1$ e de $9,9:1$ para a segunda e terceira colheitas, respectivamente.

A intensificação do perfilhamento e do incremento da área foliar (Figuras 1 e 3) provavelmente aumentaram a exigência nutricional do capim para o enxofre a partir do segundo período de crescimento, pois foi constatada a importância do suprimento de enxofre para o capim adubado com nitrogênio, a partir daquele período de crescimento. O solo, ainda que apresentando muito baixo teor de enxofre ($2,6 \text{ mg kg}^{-1}$ no extraído com solução de fosfato de cálcio) não se constituiu em limitação para o desenvolvimento inicial do capim-marandu (Figura 4).

Para a segunda e terceira colheitas do capim, a produção média de massa seca do capim que não recebeu nitrogênio e enxofre foi 21 vezes menor do que a produção obtida quando a gramínea teve fornecida a dose de nitrogênio de 300 mg dm^{-3} combinada com a dose de enxofre de 30 mg dm^{-3} . Para pastagens que se encontram em estabelecimento com gramínea, a produção depende primordialmente do fornecimento de doses de nitrogênio, porém em situações em que se busca a intensificação da exploração dessas pastagens, com a aplicação de adubos nitrogenados, em solo com baixo enxofre disponível há a necessidade de atender a demanda do capim pelo enxofre.

Esses resultados estão de acordo com os relatados por Mattos e Monteiro (2003) e Batista e Monteiro (2008), indicando que o incremento de nitrogênio conduz à necessidade de suprir mais enxofre para maximizar as respostas produtivas de *Brachiaria decumbens* e de *Brachiaria brizantha*, respectivamente. Além das respostas do capim ao enxofre, quando também recebem nitrogênio, a aplicação desse nutriente pode influir na eficiência da adubação nitrogenada.

Figura 4 – Produção da massa seca da parte aérea do capim-marandu em resposta às doses de nitrogênio à época do primeiro corte (a) e às combinações das doses de nitrogênio com doses de enxofre na ocasião do segundo e terceiro (b e c) cortes das plantas

A resposta do capim à aplicação de enxofre, quando também houve emprego da adubação com nitrogênio, foi reportada por Phillips e Sabbe (1994), ao estudarem o efeito do enxofre na coastal Bermuda (*Cynodon dactylon*) desenvolvida em solos arenosos, pobres em enxofre e com baixo teor de matéria orgânica. Nessa situação concluíram que a adubação com enxofre necessitou de 100 kg ha⁻¹ para aumentar a produção de massa seca da forragem.

De Bona e Monteiro (2010) em Neossolo Quartzarênico, com alto teor de matéria orgânica e teor de enxofre-sulfato 2,8 vezes superior ao desse experimento, também não obtiveram resposta à aplicação de doses de enxofre para o primeiro crescimento das plantas em termos de produção de massa seca, número de perfilhos e área foliar, comprovando assim a baixa demanda de enxofre pelo capim-marandu na fase de estabelecimento. A partir do segundo período de crescimento, a adição de nitrogênio ao solo favoreceu a ativação dos tecidos meristemáticos, o aumento da área fotossintetizante, incrementou a área de interceptação luminosa, ou seja, proporcionou aumento na quantidade absorvida de nutrientes, translocação e absorção de água e consequentemente, maior produção de massa seca da gramínea, o que resultou em aumento na demanda de nitrogênio e enxofre pelo capim-marandu.

As variáveis estruturais e produção de massa seca do capim-marandu apresentaram a mesma forma de respostas em cada um dos períodos de crescimento avaliados. Foi observada resposta quadrática para as doses de nitrogênio aplicadas no primeiro corte e significância da interação doses de nitrogênio $\times$ doses de enxofre no segundo e terceiro cortes das plantas.

A quantidade acumulada de nitrogênio no primeiro período de crescimento respondeu de forma isolada à aplicação das doses de nitrogênio, já que no segundo e terceiro períodos de crescimento foi observada significância para a combinação de doses de nitrogênio com doses de enxofre. Para a quantidade acumulada de enxofre verificou-se significância da interação doses de nitrogênio $\times$ doses de enxofre nos três períodos de crescimento (Tabela 1). As equações de regressão referentes às quantidades acumuladas de nitrogênio e enxofre pela parte aérea da planta nos três períodos de crescimento são apresentadas na Tabela 2.

Os baixos teores de nitrato e de amônio e de enxofre-sulfato na amostra inicial de terra refletiu na quantidade acumulada desses nutrientes pela planta, como pode ser verificado na Tabela 1, principalmente nos das plantas que não receberam doses de nitrogênio e doses de enxofre. Para o primeiro período de crescimento do capim, apesar do baixo teor desses nutrientes no solo, após a calagem e com a possível mineralização da matéria orgânica, proporcionada pela

temperatura e umidade adequada do solo, garantiram bom desenvolvimento do capim, principalmente em relação à demanda por enxofre, a qual foi baixa na fase de estabelecimento e

Tabela 1 - Nitrogênio e enxofre acumulado na parte aérea da planta em função da adubação com combinações de doses de nitrogênio (N) e doses de enxofre (S) na ocasião dos três cortes do capim-marandu

N x S	Nitrogênio absorvido			Enxofre absorvido		
	1 Corte	2 Corte	3 Corte	1 Corte	2 Corte	3 Corte
	-----mg/vaso-----					
N ₀ S ₀	78,7	21,6	12,6	8,9	1,4	0,8
N ₀ S ₂₀	90,4	19,1	14,6	8,3	1,5	0,8
N ₀ S ₄₀	72,8	24,3	10,9	7,5	2,0	1,1
N ₁₀₀ S ₁₀	234,3	192,7	243,2	22,1	9,8	16,4
N ₁₀₀ S ₃₀	260,4	244,2	254,1	27,7	11,4	19,8
N ₂₀₀ S ₀	369,9	277,5	133,3	33,7	6,4	2,7
N ₂₀₀ S ₂₀	454,9	430,9	474,7	36,5	19,8	28,8
N ₂₀₀ S ₄₀	450,5	509,9	460,5	38,8	21,2	28,4
N ₃₀₀ S ₁₀	482,2	577,7	597,8	32,0	19,3	24,8
N ₃₀₀ S ₃₀	501,8	638,6	688,2	33,6	29,7	38,3
N ₄₀₀ S ₀	556,9	449,0	235,7	39,1	7,2	3,6
N ₄₀₀ S ₂₀	606,1	829,4	775,3	29,2	29,2	38,6
N ₄₀₀ S ₄₀	479,0	791,2	924,1	25,2	31,3	41,9
Média	356,8	385,1	371,1	26,4	14,6	18,9
Efeito ^a	QUAD	INT	INT	INT	INT	INT
N x S	(N)	(N x S)	(N x S)	(N x S)	(N x S)	(N x S)

^a INT: interação significativa; QUAD: ajuste dos resultados ao modelo quadrático. Entre parênteses: fator da combinação nitrogênio e enxofre que influenciou significativamente a variável resposta de acordo com o modelo matemático especificado

Tabela 2 – Equações de regressão referentes aos acúmulos de nitrogênio e enxofre na parte aérea da planta na ocasião dos três cortes do capim-marandu, em relação às doses de nitrogênio (N) e de enxofre (S)

Variável ^a	Equação de Regressão	R ² (b)
-----Primeiro corte-----		
N abs	$y = 76,426 + 2,158N - 0,002N^2$	0,84**
S abs	$y = 6,938 + 0,226N - 0,0004N^2 - 0,0008NS - 0,089S + 0,005S^2$	0,76*
-----Segundo corte-----		
Nabs	$y = 22,542 + 1,757N - 0,001N^2 + 0,020NS + 8,047S - 0,189S^2$	0,94**
Sabs	$y = 1,074 + 0,063N - 0,0001N^2 + 0,002NS + 0,567S - 0,014S^2$	0,90**
-----Terceiro corte-----		
N abs	$y = 12,633 + 1,247N - 0,001N^2 + 0,042NS + 13,513S - 0,357S^2$	0,93**
S abs	$y = 3,245 + 0,083N - 0,0001N^2 + 0,002NS - 1,096S - 0,026S^2$	0,92**

^a N abs. = nitrogênio absorvido pela planta; S acum. = nitrogênio absorvido pela planta

^b Os símbolos (*) e (**) indicam significância de 5 e 1 %, respectivamente

justifica a falta de resposta da gramínea por esse nutriente para as variáveis estruturais e para a massa seca da parte aérea (Figuras 1, 2, 3 e 4). Observa-se que com a ausência de adubação com

nitrogênio e enxofre, a quantidade acumulada desses nutrientes pelo capim diminui de um corte para outro, devido ao esgotamento desses nutrientes no solo pelas plantas e a pequena mineralização da matéria orgânica, devido ao teor de enxofre no solo.

A partir do segundo período de crescimento da gramínea forrageira, fica evidente a necessidade de adubação com doses de nitrogênio e doses de enxofre, visto que a disponibilidade desses nutrientes no solo era baixa, justificando assim a resposta da planta à adição simultânea de nitrogênio e enxofre para as variáveis estruturais e na massa seca da parte aérea no segundo e terceiro períodos de crescimento (Figuras 1, 2, 3 e 4). À medida que aumentou a demanda da planta por nitrogênio, também aumentou a demanda por enxofre, observando maior acúmulo desses nutrientes na parte aérea da planta. Como pode ser notado na Tabela 1, altas doses de nitrogênio combinadas com altas doses de enxofre proporcionaram aumento na quantidade acumulada de nitrogênio e de enxofre pelo capim-marandu no segundo e terceiro períodos. Observa-se que na combinação de nitrogênio de 400 mg dm^{-3} com enxofre de 0 mg dm^{-3} , a quantidade acumulada de nitrogênio foi de 449,0 e 235,7 mg/vaso e de enxofre foi 7,2 e 3,6 mg/vaso, enquanto na combinação de nitrogênio de 400 mg dm^{-3} com enxofre de 40 mg dm^{-3} a quantidade acumulada de nitrogênio foi de 791,2 e 924,1 mg/vaso e de enxofre foi 31,3 e 41,9 mg/vaso, para o segundo e terceiro períodos, respectivamente.

De Bona e Monteiro (2010) observaram efeito significativo da interação doses de nitrogênio $\times$ doses de enxofre para as quantidades acumuladas de nitrogênio e de enxofre nas plantas em três cortes do capim-marandu, sendo que altas doses de nitrogênio combinadas com baixas doses de enxofre na adubação diminuíram consideravelmente o nitrogênio acumulado na parte aérea das plantas.

Kalmbacher et al. (2005), trabalhando com as espécies de gramíneas *Dactylis glomerata* e *Paspalum notatum*, também verificaram interação significativa adubação com nitrogênio $\times$ adubação com enxofre, na quantidade acumulada de nitrogênio na parte aérea das plantas.

5.4 Conclusões

No primeiro período de crescimento para o número de folhas, área foliar, número de perfilhos, produção de massa seca e quantidade acumulada de nutrientes pela parte aérea do capim, somente a adubação com nitrogênio é responsável por estimular o desenvolvimento do

capim-marandu. A falta de resposta ao enxofre é devida à baixa demanda desse nutriente na fase inicial de desenvolvimento. A interação doses de nitrogênio $\times$ doses de enxofre na adubação foi significativa para todas as variáveis estruturais, massa seca e para a quantidade acumulada de nitrogênio na parte aérea do capim no segundo e terceiro períodos de crescimento da gramínea, e para a quantidade acumulada de enxofre nos três períodos de crescimento, mostrando que os benefícios da adubação nitrogenada na produção da planta são maximizados pelo suprimento conjunto com enxofre no segundo e terceiro cortes das plantas.

Referências

- BATISTA, K.; MONTEIRO, F.A. Nitrogênio e enxofre nas características morfológicas do capim-marandu em substituição ao capim-braquiária em degradação em solo com baixo teor de matéria orgânica. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 37, p. 1151-1160, 2008.
- BONFIM-SILVA, E.M.; MONTEIRO, F.A.; SILVA, T.J.A. Nitrogênio e enxofre na produção e no uso de água pelo capim-braquiária em degradação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 309-317, 2007.
- CANTARUTTI, R.B.; FONSECA, D.M.; SANTOS, N.Q.; ANDRADE, C.M.S. de. Adubação de pastagens: uma análise crítica. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO ESTRATÉGICO DA PASTAGEM, 1., 2002, Viçosa. **Anais...** Viçosa: SIMFOR, 2002. p. 43-84.
- CHAPMAN, D.F, LEMAIRE, G. Morphogenetic and structural determinants of regrowth after defoliation. In: INTERNATIONAL GRASSLAND CONGRESS, 17., 1993, New Zealand. **Proceedings...** New Zealand, 1993. p. 95-104.
- CRAWFORD, N.M.; KAHN, M.L.; LEUSTEK, T.; LONG, S.R. Nitrogen and sulphur. In: BUCHANAN, B.B.; GRUISSEM, W.; JONES, R.L. (Ed.). **Biochemistry and molecular biology of plants**. Rockville: American Society of Plant Physiologists, 2000. chap. 16, p. 786-849.
- DE BONA, D.; MONTEIRO, F.A. Marandu palisadegrass growth under nitrogen and sulphur for replacing Signal grass in degraded tropical pasture. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 67, p. 570-578, 2010.
- DURU, M.; DUCROCQ, H. Growth and senescence of the successive leaves on a Cocksfoot tiller. Ontogenic development and effect of temperature. **Annals of Botany**, Oxford, v. 85, p. 635-643, 2000.
- FRIEDRICH, J.W.; SCHRADER, L.E. Sulfur deprivation and nitrogen-metabolism in maize seedlings. **Plant Physiology**, Rockville, v. 61, p. 900-903, 1978.

GARCEZ NETO, A.F.; NASCIMENTO JÚNIOR, D.; REGAZZI, A.J.; FONSECA, D. M.; MOSQUIM, P.R.; GOBBI, K.F. Respostas morfogênicas e estruturais de *Panicum maximum* cv. Mombaça sob diferentes níveis de adubação nitrogenada e alturas de corte. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 31, p. 1890-1900, 2002.

KALMBACHER, R.S.; EZENWA, I.V.; ARTHINGTON, J.D.; MARTIN, F.G. Sulfur fertilization of bahiagrass with varying levels of nitrogen fertilization on a Florida Spodosol. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, p. 661-667, 2005.

LANGER, R.H.M. **How grasses grow**. London: Edward Arnold, 1974. 66 p.

LEMAIRE, G.; CHAPMAN, D.F. Tissue flows in grazed plant communities. In: HODGSON, J.; ILLIUS, A.W. (Ed.). **The ecology and management of grazing systems**. Oxon: CAB International, 1996. p. 3-36.

LEUSTEK, T.; MARTIN, M.N.; BICK, J.A.; DAVIES, J.P. Pathways and regulation of sulfur metabolism revealed through molecular and genetic studies. **Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology**, Palo Alto, v. 51, p. 141-165, 2000.

LITTELL, R.C.; MOTT, G.O. Computer assisted design and analysis of response surface experiments in agronomy. **Soil and Crop Society of Florida Proceedings**, Ona, v. 34, p. 94-97, 1975.

MARTUSCELLO, J.A.; FONSECA, D.M.; NASCIMENTO Jr., D.; SANTOS, P.M.; RIBEIRO Jr., J.I.; CUNHA, D.N.F.V.; MOREIRA, L.M. Características morfogênicas e estruturais do capim-xaraés submetido à adubação nitrogenada e desfolhação. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 34, p. 1475-1482, 2005.

MATHOT, M.; MERTENS, J.; VERLINDEN, G.; LAMBERT, R. Positive effects of sulphur fertilization on grasslands yields and quality in Belgium. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 28, p. 655-658, 2008.

MATTOS, W.T.; MONTEIRO, F.A. Produção e nutrição de capim-braquiária em função de doses de nitrogênio e enxofre. **Boletim de Indústria Animal**, Nova Odessa, v. 60, p. 1-10, 2003.

NABINGER, C. Princípios da exploração intensiva de pastagens. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DA PASTAGEM, 13., 1996, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: FEALQ, 1996. p. 15-96.

_____. Manejo da desfolha In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO DA PASTAGEM, 14., 2001, Piracicaba. **Anais...** Piracicaba: FEALQ, 2001. p. 192-210.

NUNES, S.G.; BOOK, A.; PENTEADO, M.I.O.; GOMES, D.T. **Brachiaria brizantha** cv. **Marandu**. 2. ed. Campo Grande: EMBRAPA CNPQC, 1985. 31 p. (EMBRAPA. CNPQC, Documentos, 21).

OLIVEIRA, A.B.; PIRES, A.J.V.; MATOS NETO, U.; GLEIDSON CARVALHO, G.P.; VELOSO, C.M.; SILVA, F.F. Morfogênese do capim-tanzânia submetido a adubações e intensidades de corte. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 36, p. 1006-1013, 2007.

PHILLIPS, J.M.; SABBE, W.E. Effects of sulfur on nitrogen recovery in coastal bermudagrass as influenced by sulfur fertilization. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 25, p. 1763-1769, 1994.

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

RODRIGUES, R.C.; HERLING, V.R.; FAFTINE, O.L.; STEFANO, M.R.; PLESE, L.P.M.; LUZ, H.C.; CABRAL, L.S. Acúmulo de forragem e raízes, perfilhamento e área foliar do capim-marandu submetido a doses de nitrogênio em solos de diferentes fertilidades. **Boletim de Indústria Animal**, Nova Odessa, v. 65, p. 43-50, 2008.

RUGGIERI, A.C.; FAVORETTO, V.; MALHEIROS, E.B. Características de crescimento e produção de matéria seca de *Brachiaria brizantha* (Hochst) Stapf. cv. Marandu em função de níveis de nitrogênio e regimes de corte. **Boletim de Indústria Animal**, Nova Odessa, v. 51, p. 149-155, 1994.

SANTOS JUNIOR, J.D.G.; MONTEIRO, F.A. Nutrição em nitrogênio do capim-marandu submetido a doses de nitrogênio e idades de crescimento. **Boletim de Indústria Animal**, Nova Odessa, v. 60, p. 139-146, 2003.

SARRUGE, J.R.; HAAG, H.P. **Análises químicas em plantas**. Piracicaba: ESALQ, 1974. 56 p.

SAS INSTITUTE. **SAS/STAT**: user's guide, version 8.0. Cary, 2000. 1 CD-ROM.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.

6 DIAGNOSE NUTRICIONAL DE NITROGÊNIO E ENXOFRE NO CAPIM-MARANDU ADUBADO COM DOSES DESSES NUTRIENTES

Resumo

A diagnose foliar fornece informações sobre o estado nutricional das plantas, como forma de direcionar o manejo das adubações para produções máximas. Dessa maneira, objetivou-se avaliar os efeitos das combinações de doses de nitrogênio com doses de enxofre na diagnose foliar desses nutrientes e no valor SPAD do capim-marandu, tratando de buscar as concentrações críticas desses nutrientes e o valor SPAD nas folhas diagnósticas desse capim. Um experimento foi conduzido em casa de vegetação, em vasos contendo solo classificado como Neossolo Quartzarênico, com baixos teores de nitrogênio e enxofre-sulfato, no período de setembro a dezembro de 2008. Cinco doses de nitrogênio (0; 100; 200; 300 e 400 mg dm⁻³) foram combinadas com cinco doses de enxofre (0; 10; 20; 30 e 40 mg dm⁻³) em um fatorial 5² fracionado, com quatro repetições. A parte aérea do capim foi cortada três vezes em intervalos aproximados de 30 dias. Para o valor SPAD, concentrações de nitrogênio e de enxofre e a relação N:S nas folhas diagnósticas do capim, apenas a adubação com nitrogênio foi significativa no primeiro período de crescimento, enquanto as combinações de doses de nitrogênio com doses de enxofre foram significativas no segundo e terceiro períodos de crescimento. A concentração de nitrogênio nas folhas diagnósticas respondeu de forma isolada à adubação com doses de nitrogênio no segundo período de crescimento das plantas. A concentração crítica de nitrogênio nas folhas diagnósticas foi de 29,70; 26,72 e 27,23 g kg⁻¹, correspondendo aos valores SPAD de 48; 21 e 33 para o primeiro, segundo e terceiro períodos de crescimento, respectivamente.

Palavras-chave: Folha diagnóstica; Nível crítico; SPAD

Abstract

Foliar diagnosis provides information about the nutritional status of plants as a way to help the fertilization management for maximum yield. The objective of was to evaluate the effects the combinations of nitrogen rates with sulphur rates on nutritional diagnosis of these nutrients and in SPAD value in the Marandu palisadegrass, trying to obtain the critical levels of these nutrients and a critical SPAD value in the diagnostics leaves of this grass. An experiment was carried out in a greenhouse, in pots containing an Entisol with a low content of nitrogen and sulphate-sulphur, from September to December 2008. Five nitrogen rates (0; 100; 200; 300 and 400 mg dm⁻³) were combined with five sulphur rates (0; 10; 20; 30 and 40 mg dm⁻³) in a fractionated 5² factorial, with four replications. Forage was harvest three times at 30-d intervals. SPAD value, concentrations of both nitrogen and sulphur and N: S ratio in the diagnostic leaves of grass significantly changed with nitrogen fertilization in the first growth period, while the combinations of nitrogen rates and sulphur rates were significant in the second and third growth periods. The nitrogen concentration in diagnostic leaves varied significantly with nitrogen fertilization in the second growth. The critical nitrogen concentrations in the diagnostic leaves of this grass were 29.70; 26.72 e 27.23 g kg⁻¹, and corresponded to SPAD values of 48; 21 and 33 for the first, second and third growth periods, respectively.

Keywords: Critical level; Diagnostic leaves; SPAD

6.1 Introdução

A maioria das espécies forrageiras tropicais e subtropicais apresenta grande potencial de produção de massa. Porém, como normalmente são cultivadas em solos de baixa fertilidade e de forma extrativista apresentam produção e qualidade inferiores aos níveis considerados ideais, que são passíveis de serem obtidas, tanto do ponto de vista biológico quanto do ponto de vista operacional (MELLO; PEDREIRA, 2004). O esgotamento da fertilidade do solo, em consequência da ausência da adubação, tem sido apontado como uma das principais causas da degradação de pastagens cultivadas. A intensificação do uso das pastagens está diretamente ligada ao emprego da adubação, principalmente a nitrogenada. O nitrogênio é um dos nutrientes requeridos em maior quantidade pelas gramíneas e está relacionado com a síntese de proteínas (CRAWFORD et al., 2000). O enxofre, apesar de exigido pelas plantas em menor quantidade quando comparado ao nitrogênio, está associado à síntese e ao metabolismo do nitrogênio.

A estimativa da disponibilidade do nitrogênio e do enxofre para as plantas é complicada, pois esses nutrientes apresentam ciclos que são controlados por fatores físicos, químicos e biológicos, e são afetados por condições climáticas difíceis de prever, limitando principalmente as recomendações de fertilizantes nitrogenados (VARVEL et al., 2007). Normalmente a recomendação desses nutrientes tem sido feita com base na expectativa de produtividade, histórico da área e teores de matéria orgânica do solo (CANTARELLA, 2007). Esse tipo de recomendação tem seus méritos, porém não considerar a disponibilidade do nitrogênio no solo, o que pode resultar em sérios prejuízos para a produção de plantas.

A diagnose foliar é uma ferramenta importante, pois permite a determinação do estado nutricional das plantas por meio do nível crítico interno, uma vez que torna possível buscar concentração adequada de nutrientes para o máximo desempenho da planta (SMITH; LONERAGAN, 1997). Se a concentração de um elemento essencial no tecido da planta estiver abaixo do nível necessário ao crescimento ótimo, diz-se que a planta está deficiente (EPSTEIN; BLOOM, 2006). A folha, na maioria dos casos, é o órgão da planta onde ocorrem as alterações fisiológicas devido a distúrbios nutricionais. No caso das gramíneas forrageiras, vários autores (MANARIM; MONTEIRO, 2003; LAVRES JUNIOR; MONTEIRO, 2006) mostraram ser as

lâminas de folhas recém-expandidas as mais indicadas para a diagnose foliar. Com a existência de um valor ótimo para a concentração foliar de um nutriente podem ser estabelecidos padrões de interpretação da análise química, para uma determinada cultura e padronização da amostragem (MUNSON; NELSON, 1973).

A determinação indireta do teor de clorofila na planta, empregando-se o clorofilômetro (SPAD), tem sido uma alternativa eficaz para auxiliar na avaliação da nutrição em nitrogênio e em enxofre em culturas (LEMAIRE et al., 2008). De acordo com Friedrich e Schrader (1978), plantas deficientes em enxofre diminuem a taxa fotossintética e a concentração de clorofila nas folhas, porém quando bem supridas com esse nutriente aumentam a utilização de nitrogênio na síntese protéica, aumentando a taxa fotossintética das folhas.

Objetivou-se avaliar os efeitos das combinações de doses de nitrogênio com doses de enxofre na diagnose foliar desses nutrientes e no valor SPAD do capim-marandu, tratando de buscar as concentrações críticas desses nutrientes nas folhas diagnósticas e o valor crítico SPAD nesse capim.

6.2 Material e métodos

O estudo foi conduzido com solo classificado como Neossolo Quartzarênico (EMBRAPA, 1999), amostrado na camada de 0-20 cm, secada ao ar, passada em peneira de 4 mm de malha e homogeneizada. Os atributos químicos do solo, antes de receber qualquer corretivo ou fertilizante, determinados de acordo com os métodos descritos em Raij et al. (2001), tiveram os seguintes resultados: P resina = 3 mg dm⁻³; MO = 9,5 g dm⁻³; pH em CaCl₂ = 4,0; K⁺ = 2,3 mmol_c dm⁻³; Ca²⁺ = 6 mmol_c dm⁻³; Mg²⁺ = 2 mmol_c dm⁻³; Al³⁺ = 8 mmol_c dm⁻³; H+Al = 40 mmol_c dm⁻³; CTC a pH 7,0 = 50,3 mmol_c dm⁻³; Soma de bases = 10,3 mmol_c dm⁻³; saturação por bases (V) = 20%; Cu = 0,74 mg kg⁻¹; Fe = 39,5 mg kg⁻¹; Mn = 26,5 mg kg⁻¹; Zn = 0,57 mg kg⁻¹ e B = 0,36 mg kg⁻¹. Os teores iniciais de N-total, N-NH₄⁺, N-NO₃⁻, S-total e S-SO₄²⁻, foram os seguintes: 400; 2,2; 3,4; 49,8 e 2,6 mg kg⁻¹, respectivamente. Do solo seco homogeneizado foram retirados 5,6 kg para compor cada unidade experimental.

O experimento foi conduzido em casa de vegetação em Piracicaba-SP, cultivando-se a *Brachiaria brizantha* cv. Marandu (capim-marandu), no período de setembro a dezembro de 2008. Considerando as exigências nutricionais do capim-marandu e com base nos resultados das

determinações químicas do solo, realizou-se calagem, calculada com o emprego do $V_2 = 50\%$ na fórmula de determinação da necessidade de calagem, empregou-se uma mistura de carbonato de cálcio e de magnésio. O solo de cada vaso foi umedecido com água desionizada até 70% da capacidade de retenção de água e incubado pelo período de 35 dias, para reação dos corretivos aplicados.

Cinco doses de nitrogênio (0; 100; 200; 300 e 400 mg dm^{-3}) e cinco doses de enxofre (0; 10; 20; 30 e 40 mg dm^{-3}) foram combinadas em fatorial 5^2 fracionado, de acordo com Littell e Mott (1975). As 13 combinações foram: 0-0; 0-20; 0-40; 100-10; 100-30; 200-0; 200-20; 200-40; 300-10; 300-30; 400-0; 400-20 e 400-40 mg dm^{-3} , distribuídas em blocos ao acaso, com quatro repetições. O nitrogênio e o enxofre foram fornecidos como NH_4NO_3 e $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, respectivamente, sendo a quantidade de cálcio igualada nas unidades experimentais pelo emprego do $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. As adubações de base com macronutrientes para o estabelecimento do capim-marandu foram: fósforo = 200 mg dm^{-3} , potássio = 150 mg dm^{-3} e magnésio = 50 mg dm^{-3} fornecidos pelas seguintes fontes: CaH_2PO_4 , KH_2PO_4 , KCl e $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ e a dos micronutrientes boro, cobre, zinco e molibdênio foi realizada com as seguintes fontes e quantidades dos produtos: $\text{H}_3\text{BO}_3 = 1,5$ mg dm^{-3} ; $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = 2,5$ mg dm^{-3} ; $\text{ZnCl}_2 = 2,0$ mg dm^{-3} e $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} = 0,25$ mg dm^{-3} .

A umidade do solo foi mantida por um sistema auto-irrigante subsuperficial, segundo Bonfim-Silva, Monteiro e Silva (2007), que permitiu a reposição contínua de água, de acordo com a necessidade das plantas, mantendo-se o solo na capacidade de retenção de água.

Cultivaram-se cinco plantas por vaso. Três cortes foram realizados nas plantas, com os seguintes períodos de crescimento: 35 dias após o transplante das mudas, 28 dias após o primeiro corte e 27 dias após o segundo corte. O corte das plantas foi realizado a 5 cm de altura da superfície do solo e todo o material colhido foi secado em estufa de ventilação forçada a 65 °C, até massa constante e posteriormente foi pesado. As avaliações do teor de clorofila foram realizadas aos 21 dias após o transplante das mudas e 21 dias após o primeiro e segundo cortes das plantas, utilizando-se o Chlorophyll Meter SPAD-502, em duas lâminas de folhas recém-expandidas (LR), de cinco plantas por vaso, evitando-se a nervura central, computando-se a média de dez medições.

A avaliação do estado nutricional das plantas de capim-marandu em relação aos nutrientes nitrogênio e enxofre foi realizada nas folhas recém-expandidas (folhas diagnósticas, também

designadas como LR). As concentrações de nitrogênio e de enxofre total foram determinadas segundo metodologia descrita por Sarruge e Haag (1974). Com base nos valores de concentração de nitrogênio e de enxofre nas LR e nas produções de massa seca do capim-marandu, determinou-se a concentração crítica desses nutrientes.

Os resultados foram submetidos às análises estatísticas utilizando-se o aplicativo “Statistical Analysis System” (SAS INSTITUTE, 2000). No caso de significância da interação doses de nitrogênio $\times$ doses de enxofre utilizou-se o PROC RSREG, mas quando essa interação não foi significativa, efetuou-se a análise de regressão para os componentes de primeiro e segundo grau com emprego do PROC GLM.

6.3 Resultados e discussão

A concentração de nitrogênio e enxofre na planta reflete a disponibilidade desses nutrientes pelo solo (Figuras 1 e 2), enquanto a diagnose foliar mede o estado nutricional da planta e se baseia na associação entre concentração de nutrientes nos tecidos vegetais e a produção da cultura (LEMAIRE et al., 2008).

A concentração de nitrogênio nas lâminas de folhas recém-expandidas (LR) foi significativa e linear à aplicação das doses de nitrogênio tanto no primeiro quanto no segundo período de crescimento do capim-marandu (Figuras 1a e 1b). A concentração de nitrogênio nas LR foi maior no primeiro período (16,3 a 42,3 g kg⁻¹) do que no segundo período (12,9 a 26,6 g kg⁻¹) de crescimento do capim, para a não-aplicação e a aplicação da mais alta dose de nitrogênio, respectivamente. Elevados valores de concentração de nitrogênio nas LR são justificados pelo fato de que as plantas transferem o nitrogênio absorvido para os tecidos mais novos, e estes mais importam do que exportam nutrientes, até atingirem o período de maturidade (MARSCHNER, 1995).

No terceiro período de crescimento da gramínea, a interação doses de nitrogênio $\times$ doses de enxofre foi significativa para a concentração de nitrogênio nas LR, sendo que as mais altas concentrações de nitrogênio nessa parte da planta foram atingidas com elevadas doses de nitrogênio combinadas com baixas doses de enxofre (Figura 1c).

Figura 1 – Concentração de nitrogênio total nas lâminas de folhas recém-expandidas (LR) do capim-marandu em resposta às doses de nitrogênio no primeiro e segundo períodos de crescimento (a e b) e às combinações das doses de nitrogênio com doses de enxofre no terceiro (c) período de crescimento da gramínea

Os valores encontrados para a concentração de nitrogênio das LR do capim-marandu, nesse experimento, variaram de 11,3 a 33,0 g kg⁻¹, indicando que a planta se encontra bem nutrida em relação a esse nutriente. Volpe et al. (2008) relataram que a concentração de nitrogênio de 20,0 g kg⁻¹ nas folhas diagnósticas do capim-massai (*Panicum maximum* cv. Massai) não foi limitante ao adequado crescimento desse capim.

Para a concentração de enxofre nas folhas diagnósticas no primeiro período de crescimento da gramínea constatou-se efeito isolado e linear das doses de nitrogênio (Figura 2a). A concentração de enxofre nas folhas diagnósticas variou de 1,5 a 2,6 g kg⁻¹ para a ausência de adubação com doses de nitrogênio e a mais alta dose de nitrogênio aplicada. Esse aumento na concentração de enxofre na folha diagnóstica pode ter ocorrido devido à disponibilidade, mesmo que baixa, de enxofre-sulfato no solo e à possível mineralização da matéria orgânica do solo.

No segundo e terceiro períodos de crescimento do capim-marandu foi observada significância para a interação doses de nitrogênio $\times$ doses de enxofre (Figura 2b e 2c). Verifica-se que entre os três períodos de crescimento ocorreu uma diminuição na concentração de enxofre nas folhas diagnósticas, devido à alta produção de massa seca proporcionada pelo aumento da adubação com nitrogênio, resultando em possível efeito diluição. Tanto para o segundo como para o terceiro períodos de crescimento da gramínea, os valores mais elevados de concentração de enxofre nas folhas diagnósticas foram proporcionados pela combinação de altas doses de nitrogênio com altas doses de enxofre.

Goldman et al. (2002), trabalhando com nitrogênio e enxofre na cultura do milho (*Zea mays*), observaram aumento na concentração de enxofre nas folhas quando aumentou a disponibilidade de nitrogênio no solo.

A análise química da planta se baseia na existência de correlação entre a disponibilidade de nutriente no solo e a concentração de nutriente na planta e aumento ou decréscimos de nutrientes gerarem maior ou menor produção. Isso pode ser verificado nesse experimento, visto que aumentando a disponibilidade de nutriente no solo, houve aumento na concentração do nitrogênio na planta, refletindo em maior produção de massa seca (dados não apresentados), a qual foi favorecida pelas doses de enxofre. Porém, para a concentração de enxofre na planta, como já citado, pelo aumento da produção ocorreu efeito diluição desse nutriente na planta.

Figura 2 – Concentração de enxofre total nas lâminas de folhas recém-expandidas (LR) do capim-marandu em resposta às doses de nitrogênio no primeiro período de crescimento (a) e às combinações das doses de nitrogênio com doses de enxofre no segundo e terceiro (b e c) períodos de crescimento da gramínea

A relação N:S nas folhas diagnósticas coletadas do capim-marandu na ocasião da colheita foi alterada pela adubação nitrogenada, de acordo com o modelo quadrático (Figura 3a). A mais elevada relação N:S não foi obtida com as doses de nitrogênio utilizadas nesse experimento, porém a relação variou de 10,9:1 a 16,5:1 para a ausência de adubação com nitrogênio ou enxofre e a dose de nitrogênio de 400 mg dm⁻³, respectivamente. Nas mais altas doses de nitrogênio, a relação N:S na planta se encontra dentro dos valores adequados para boa nutrição da planta. De acordo com Dijkshoorn e Van Wijk (1967) e Bolton et al. (1976), a relação N:S de 14:1 caracteriza adequado estado nutricional de plantas nesses nutrientes.

Nas folhas diagnósticas amostradas na segunda e terceira colheitas da gramínea, a relação N:S respondeu significativamente à adubação simultânea com doses de nitrogênio e doses de enxofre (Figuras 3b e 3c). Constataram-se valores elevados de relações N:S, para altas doses de nitrogênio combinadas com baixas doses de enxofre, o que indica, segundo Dijkshoorn e Van Wijk, (1967), desbalanço metabólico nas plantas.

Para Cassel et al. (1996), relação N:S maior do que 16 nas folhas, mostraram a deficiência de enxofre na formação de proteínas na cultura do milho, visto que o enxofre está relacionado à síntese de proteína e ao metabolismo do nitrogênio (CRAWFORD et al., 2000).

Os valores encontrados para o segundo e terceiro períodos de crescimento ficaram bem acima do recomendado como ideal, o que é explicado pela diminuição da concentração de enxofre nas lâminas foliares a partir do segundo período de crescimento, devido ao aumento de produção de massa seca ocasionado pela adubação nitrogenada, em consequência do efeito da diluição. Apesar da alta relação N:S nas folhas diagnósticas não foram observadas limitações para o efeito do nitrogênio na planta devido à baixa concentração de enxofre.

Os resultados desse experimento concordam com os verificados por De Bona e Monteiro (2010) para o capim-marandu adubado com nitrogênio e enxofre, e cultivado em solo com alta matéria orgânica. Esses autores constataram que a ausência de enxofre na adubação culminou em relações N:S altas no tecido foliar, principalmente quando associadas à adubação nitrogenada elevada (400 mg dm⁻³). Batista e Monteiro (2007), trabalhando com nitrogênio e enxofre, obtiveram relação N:S variando de 2,8:1 a 37,2:1 para as folhas diagnósticas do capim-marandu. Esses resultados confirmam as sugestões de Monteiro et al. (2004), que adubação com enxofre deve ser recomendada quando o pasto encontra-se bem nutrido em nitrogênio.

Figura 3 – Relação N:S nas lâminas de folhas recém-expandidas do capim-marandu em resposta às doses de nitrogênio no primeiro período de crescimento (a) e às combinações das doses de nitrogênio com doses de enxofre no segundo e terceiro (b e c) períodos de crescimento da gramínea

A utilização do clorofilômetro tem sido útil para auxiliar a diagnosticar as deficiências de nitrogênio e enxofre na planta. O valor SPAD nas lâminas recém-expandidas, avaliado durante o primeiro período de crescimento do capim-marandu, apresentou resposta significativa para as doses de nitrogênio, sendo que o máximo valor não foi atingido com as doses utilizadas nesse experimento (Figura 4a).

Samborski, Tremblay e Fallon (2009) verificaram que existe uma relação entre a adubação nitrogenada e os valores SPAD para a cultura do trigo de inverno (*Triticum aestivum*), pois o valor SPAD aumentou em 0,05 unidades a medida em que foi adicionado 10 kg ha⁻¹ de nitrogênio.

O capim-marandu não apresentou respostas significativas para o valor SPAD com a aplicação de doses de enxofre, o que significa que a demanda desse nutriente no período de crescimento inicial da gramínea foi baixa, a ponto de não responder nas unidades SPAD às variações no fornecimento de enxofre.

Lavres Júnior, Monteiro e Schiavuzzo (2008) observaram que doses de enxofre influenciaram positivamente o valor SPAD do capim-marandu cultivado em solução nutritiva, sendo que o máximo valor foi atingido na dose de enxofre de 52 mg L⁻¹. Isto mostra a influência do enxofre no valor SPAD, visto que está envolvido na síntese da clorofila e na fotossíntese, como componente das ferredoxinas e tioredoxinas (MALAVOLTA, 2006).

As doses de nitrogênio e doses de enxofre que proporcionaram o máximo valor SPAD no segundo e terceiro períodos de crescimentos dessa espécie de planta forrageira extrapolaram as combinações de doses utilizadas nesse estudo (Figuras 3b e 3c). O valor SPAD no primeiro crescimento do capim variou entre 32 e 54 (entre a não-aplicação de nitrogênio e a mais elevada dose de nitrogênio), enquanto para o segundo e terceiro períodos de crescimentos essa variação foi de 17 a 42 e de 16 a 39, respectivamente (para a não aplicação dos dois nutrientes e as mais elevadas combinações de nitrogênio e enxofre). Os baixos valores de leitura SPAD na ausência de adubação (17 e 16 para o segundo e terceiro períodos de crescimento do capim-marandu, respectivamente), justificam-se pelos reduzidos teores de nitrogênio e enxofre no solo e pelo esgotamento dos mesmos pelas plantas, o que resultou em plantas com coloração verde menos intensa. Esses valores baixos de SPAD representam provável deficiência de nitrogênio ou de enxofre no capim. Abreu e Monteiro (1999) para o capim-marandu também observaram efeito do nitrogênio no valor SPAD.

Figura 3 – Valor SPAD do capim-marandu em resposta às doses de nitrogênio no primeiro período de crescimento (a) e às combinações das doses de nitrogênio com doses de enxofre no segundo e terceiro (b e c) períodos de crescimento da gramínea

Bullock e Anderson (1998) relataram que, com o aumento da disponibilidade de nitrogênio para as plantas, mais clorofila é produzida nas folhas, resultando em aumento da intensidade do verde. Esse aumento de teor de clorofila, porém, atinge um patamar no ponto de maturidade fotossintética, a partir do qual se mantém invariável, mesmo com o aumento da concentração de nitrogênio no tecido, o qual pode estar associado a outros compostos de reserva (COSTA et al., 2001). Plantas bem supridas com enxofre aumentam a utilização de nitrogênio na síntese protéica, incrementando a taxa fotossintética das folhas (FRIEDRICH; SCHRADER, 1978).

A correlação entre a concentração de nitrogênio nas lâminas de folhas recém-expandidas e a produção de massa seca da parte aérea foi significativa nos três períodos de crescimento do capim-marandu, porém para a concentração de enxofre nessas lâminas foliares, verificou-se correlação significativa apenas no primeiro período de crescimento (Tabela 1). O valor crítico de nitrogênio nessas folhas diagnósticas para atingir 90% da máxima produção, foi de 29,70; 26,72 e 27,23 g kg⁻¹, como pode ser verificado na Tabela 1. Esses valores encontram-se acima dos observados por diversos autores (MANARIN; MONTEIRO, 2002; LAVRES JUNIOR; MONTEIRO; SCHIAVUZZO, 2008) nas diagnósticas do capim.

Debaeke, Rouet e Justes (2006), trabalhando com trigo (*Triticum durum*), verificaram que existe correlação entre o nível crítico de nitrogênio e o valor SPAD na planta, independente do cultivar e do estágio de desenvolvimento do trigo.

De acordo com Lemaire et al. (2008), existe estreita relação entre a concentração de nitrogênio nas plantas e a produção da cultura, de modo que é possível verificar a nutrição da planta em relação a esse nutriente. Porém a determinação é destrutiva, tem alto custo e leva-se tempo para obter o diagnóstico, dificultando assim a sua realização ao longo de todo o período de crescimento vegetativo da planta em condições práticas, sendo necessário desenvolver métodos indiretos por meio de procedimentos mais operacionais, tais como o uso do clorofilômetro, o qual oferece vantagem em relação à análise química de tecido, por não ser destrutivo e apresentar diagnóstico rápido (ORTUZAR-IRAGORRI et al., 2005).

Manarin e Monteiro (2003) relataram altos coeficientes de correlação entre a concentração de nitrogênio nas folhas diagnósticas e a produção de massa seca da parte aérea em dois períodos de crescimento do capim-mombaça (*Panicum maximum* cv. Mombaça).

Tabela 1 - Produção de massa seca da parte aérea (MSPA), em função das concentrações de nitrogênio (N) e de enxofre (S) nas lâminas de folhas recém-expandidas nos três períodos de crescimento do capim-marandu

Equação regressão	R ²	Nível Crítico N	Nível Crítico S
-----1º corte-----			
	g kg ⁻¹		
MSPA = - 21,469* + 2,378**N - 0,036*N ²	0,74**	29,70	-
MSPA = - 55,432* + 63,377*S - 13,803*S ²	0,74**	-	2,07
-----2º corte-----			
MSPA = - 40,699 + 4,632N - 0,078*N ²	0,61*	26,72	-
-	ns	-	-
-----3º corte-----			
MSPA = - 44,448* + 4,719*N - 0,078*N ²	0,43*	27,23	-
-	ns	-	-

* e ** = Significativos a 5 e 1 % pelo teste F, respectivamente

A correlação entre o valor SPAD e a concentração de nitrogênio nas folhas diagnósticas mostrou-se significativa nos três períodos de crescimento da gramínea forrageira (Figura 4). Para a concentração de enxofre nas folhas diagnósticas foi observado correlação significativa com os valores SPAD apenas no primeiro período de crescimento do capim-marandu. Com base nessas relações, foi possível calcular as concentrações críticas de nitrogênio e enxofre (Tabela 1) e a relação entre a concentração de nitrogênio e o valor SPAD (Figura 5).

Apesar de não ter sido observada relação entre valor o SPAD e a concentração de enxofre nas folhas diagnósticas em dois dos períodos avaliados, sabe-se que o enxofre intensifica a coloração verde das folhas, ou seja, aumenta o teor de clorofila, quando associado com nitrogênio (Figuras 1b e 1c). Pagani et al. (2009) também observaram para a cultura do milho, efeito significativo da interação doses de nitrogênio $\times$ doses de enxofre na intensificação do verde das folhas.

A concentração crítica de nitrogênio nas folhas diagnósticas do capim-marandu foi de 29,70; 26,72 e 27,23 g kg⁻¹ no primeiro, segundo e terceiro períodos de crescimento, respectivamente. O valor SPAD correspondente à concentração crítica de nitrogênio nas folhas diagnósticas do capim, no primeiro, segundo e terceiro períodos de crescimento, respectivamente, foram de 48, 21 e 33 unidades SPAD (Figuras 5a, 5b e 5c). Esses resultados confirmam o uso do clorofilômetro como uma ferramenta útil na avaliação do estado nutricional do capim-marandu, em termos do nitrogênio.

Figura 5 – Relação entre o valor SPAD e concentração de nitrogênio nas lâminas de folhas recém-expandidas coletadas no capim-marandu nas ocasiões da primeira, segunda e terceira (a, b e c) coheitas, respectivamente

Lavres Junior e Monteiro (2006), para o capim-aruaa, observaram valor SPAD correspondente à concentração crítica de nitrogênio nas folhas diagnósticas, na primeira e segunda colheitas do capim, respectivamente, de 49 e 43 unidades SPAD.

Segundo Wolfe et al. (1988), a relação SPAD e concentração de nitrogênio é justificada, uma vez que a intensidade do verde está associada com a concentração de clorofila, que por sua vez, está associada com a concentração de nitrogênio na folha.

6.4 Conclusões

Apenas a adubação com nitrogênio foi significativa no primeiro período de crescimento, enquanto as combinações de doses de nitrogênio com doses de enxofre no segundo e terceiro períodos de crescimento foram significativas, para o valor SPAD, concentrações de nitrogênio e de enxofre e relação N:S nas folhas diagnósticas do capim. A concentração de nitrogênio nas folhas diagnósticas respondeu de forma isolada à adubação com doses de nitrogênio no segundo período. Elevados coeficientes de correlação entre a concentração de nitrogênio nas folhas diagnósticas e o valor SPAD foram observadas para os três períodos de crescimento do capim-marandu. A concentração crítica de nitrogênio nas folhas diagnósticas foi de 29,70; 26,72 e 27,23 g kg⁻¹, correspondendo aos valores SPAD de 48; 21 e 33 para o primeiro, segundo e terceiro períodos de crescimento, respectivamente. A utilização do clorofilômetro para verificar o estado nutricional do capim-marandu em relação ao nitrogênio e enxofre pode ser uma ferramenta útil, principalmente quando a parte avaliada corresponder às folhas diagnósticas.

Referências

- ABREU, J.B.R.; MONTEIRO, F.A. Produção e nutrição do capim-marandu em função de adubação nitrogenada e estágios de crescimento. **Boletim de Indústria Animal**, Nova Odessa, v. 56, p. 137-146, 1999.
- BATISTA, K.; MONTEIRO, F.A. Nitrogen and sulphur in marandu grass: relationship between supply and concentration in leaf tissues. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 64, p. 44-51, 2007.

BOLTON, J.; NOWAKOWSKI, T.Z.; LAZARUS, W. Sulphur-nitrogen interaction effects on the yield and composition of protein-N, non-protein-N and soluble carbohydrates in perennial ryegrass. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, West Sussex, v. 27, p. 533-560, 1976.

BONFIM-SILVA, E.M.; MONTEIRO, F.A.; SILVA, T.J.A. Nitrogênio e enxofre na produção e no uso de água pelo capim-braquiária em degradação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 309-317, 2007.

BULLOCK, D.G.; ANDERSON, D.S. Evaluation of the Minolta SPAD-502 chlorophyll meter for nitrogen management in corn. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v. 21, p. 741-755, 1998.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 375-470.

CASSEL, D.K.; KAMPRATH, E.J.; SIMMONS, F.W. Nitrogen-sulfur relationships in corn as affected by landscape attributes and tillage. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, p. 133-140, 1996.

COSTA, C.; DWYER, L.M.; DUTILLEUL, P.; STEWART, D.W.; MA, B.L.; SMITH, D.L. Inter-relationships of applied nitrogen, SPAD and yield of leafy and non-leafy maize genotypes. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v. 24, p. 1173-1194, 2001.

CRAWFORD, N.M.; KAHN, M.L.; LEUSTEK, T.; LONG, S.R. Nitrogen and sulphur. In: BUCHANAN, B.B.; GRUISSEM, W.; JONES, R.L. (Ed.). **Biochemistry and molecular biology of plants**. Rockville: American Society of Plant Physiologists, 2000. chap. 16, p. 786-849.

DEBAEKE, P.; ROUET, P.; JUSTES, E. Relationship between the normalized SPAD index and the nitrogen nutrition index: application to durum wheat. **Journal of Plant Nutrition**, Philadelphia, v. 29, p. 75-92, 2006.

DE BONA, D.; MONTEIRO, F.A. Marandu palisadegrass growth under nitrogen and sulphur for replacing Signal grass in degraded tropical pasture. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 67, p. 570-578, 2010.

DIJKSHOORN, W.; Van WIJK, A.L. The sulphur requirements of plants as evidenced by the sulphur-nitrogen ratio in the organic matter: a review of published data. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 26, p. 129-157, 1967.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 1999. 412 p.

EPSTEIN, E.; BLOOM, A.J. **Mineral nutrition of plants: principles and perspectives**. 2nd ed. Sunderland: Sinauer, 2005. 225 p.

FRIEDRICH, J.W.; SCHRADER, L.E. Sulfur deprivation and nitrogen-metabolism in maize seedlings. **Plant Physiology**, Rockville, v. 61, p. 900-903, 1978.

GOLDMAN, V.; ECHEVERRIA, H.E.; ANDRADE, F.H.; UHART, S. Impact of nitrogen fertilization on nutrient concentration in corn. **Ciencia del Suelo**, Buenos Aires, v. 20, p. 27-35, 2002.

LAVRES JUNIOR, J.; MONTEIRO, F.A. Diagnose nutricional do nitrogênio no capim-aruaana em condições controladas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, p. 829-837, 2006.

LAVRES JÚNIOR, J.; MONTEIRO, F.A.; SCHIAVUZZO, P.F. Concentração de enxofre, valor SPAD e produção do capim-marandu em resposta ao enxofre. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 3, p. 225-231, 2008.

LEMAIRE, G.; JEUFFROY, M.H.; GASTAL, F. Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage. Theory and practices for crop N management. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 28, p. 614-624, 2008.

LITTELL, R.C.; MOTT, G.O. Computer assisted design and analysis of response surface experiments in agronomy. **Soil and Crop Society of Florida Proceedings**, Ona, v. 34, p. 94-97, 1975.

MUNSON, R.D.; NELSON, W.L. Principles and practices in plant analysis. In: WALSH, L.M.; BEATON, J.D. (Ed.). **Soil testing and plant analysis**. Madison: Soil Science Society of America, 1973. chap. 15, p. 223-248.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Agronômica Ceres, 2006. 631 p.

MANARIN, C.A.; MONTEIRO, F.A. Nitrogênio na produção e diagnose foliar do capim-mombaça. **Boletim de Indústria Animal**, Nova Odessa, v. 59, p. 115-123, 2003.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2nd ed. London: Academic Press, 1995. 889 p.

MELLO, A.C.L.; PEDREIRA, C.G.S. Respostas morfológicas do capim-tanzânia (*Panicum maximum* Jacq. cv. Tanzânia). **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 33, p. 282-289, 2004.

MONTEIRO, F.A.; VENDEMIATTI, J.A.; SILVEIRA, C.P. Concentração de enxofre e relação N:S em folhas diagnósticas de capim-tanzânia suprido com doses de nitrogênio e enxofre. In: REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 41., 2004, Campo Grande. Campo Grande: SBZ, 2004. 1 CD-ROM.

ORTUZAR-IRAGORRI, M.A.; ALONSO, A.; CASTELLON, A.; BESGA, G.; ESTAVILLO, J.M.; AIZPURUA, A. N-tester use in soft winter wheat: evaluation of nitrogen status and grain yield prediction. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, p. 1380-1389, 2005.

PAGANI, A.; ECHEVERRÍA, H.E.; ANDRADE, F.H.; ROZAS, H.R.S. Characterization of corn nitrogen status with a greenness index under different availability of sulfur. **Agronomy Journal**, Madison, v. 101, p. 315-322, 2009.

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

SAMBORSKI, S.M.; TREMBLAY, N.; FALLON, E. Strategies to make use of plant sensors-based diagnostic information for nitrogen recommendations. **Agronomy Journal**, Madison, v. 101, p. 800-816, 2009.

SARRUGE, J.R.; HAAG, H.P. **Análises químicas em plantas**. Piracicaba: ESALQ, 1974. 56 p.

SAS INSTITUTE. **SAS/STAT**: user's guide, version 8.0. Cary, 2000.

SMITH, F.W.; LONERAGAN, J.F. Interpretation of plant analysis: concepts and principles. In: REUTER, D. J.; ROBINSON, J. B. (Ed.). **Plant analysis**: an interpretation manual. Collingwood: CSIRO, 1997. chap. 1, p. 1-33.

VARVEL, G.E.; WILHELM, W.W.; SHANAHAN, J.F.; SCHEPERS, J.S. An algorithm for corn nitrogen recommendations using a chlorophyll meter based sufficiency index. **Agronomy Journal**, Madison, v. 99, p. 701-706, 2007.

VOLPE, E.; MARCHETTI, M.E.; MACEDO, M.C.M.; LEMPP, B. Acúmulo de forragem e características do solo e da planta no estabelecimento de capim-massai com diferentes níveis de saturação por bases, fósforo e nitrogênio. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 37, p. 228-237, 2008.

WOLFE, D.W.; HENDERSON, D.W.; HSIAO, T.C.; ALVINO, A. Interactive water and nitrogen effects on senescens of maize. II. Photosynthetic decline and longevity of individual leaves. **Agronomy Journal**, Madison, v. 80, p. 865-870, 1988.

7 CONCLUSÕES GERAIS

Na fase de estabelecimento do capim-marandu, observou-se efeito isolado das doses de nitrogênio em número de folhas, área foliar, número de perfilhos, produção de massa seca da parte aérea, quantidade acumulada de nitrogênio pela parte aérea da planta, valor SPAD, concentrações de nitrogênio e de enxofre nas folhas diagnósticas, relação N:S nas folhas diagnósticas e no consumo e eficiência no uso da água pela planta. A falta de resposta ao enxofre é devida à baixa demanda desse nutriente nessa fase inicial de desenvolvimento do capim.

A interação doses de nitrogênio $\times$ doses de enxofre na adubação foi responsável por estimular o desenvolvimento do capim no segundo e terceiro crescimentos para o número de folhas, área foliar, número de perfilhos, produção de massa seca da parte aérea, quantidade acumulada de nitrogênio pela parte aérea da planta, valor SPAD, concentrações de nitrogênio e de enxofre e relação N:S nas folhas diagnósticas e no consumo e eficiência no uso da água. No segundo crescimento, apenas a concentração de nitrogênio nas folhas diagnósticas e o consumo de água pela planta responderam de forma isolada à adubação com doses de nitrogênio.

A interação nitrogênio $\times$ enxofre foi significativa para a produção de massa seca de raízes e concentrações de enxofre, nitrato e enxofre-sulfato nas raízes do capim. O comprimento, a superfície radicular e as concentrações de nitrogênio total e de amônio responderam positivamente à adubação com doses de nitrogênio.

As quantidades acumuladas de nitrogênio e enxofre no total de três cortes do capim-marandu, foram influenciadas pelas combinações de doses de nitrogênio com doses de enxofre. A adubação com nitrogênio aumentou as frações inorgânicas de nitrato e amônio, nitrogênio total hidrolisável, nitrogênio amoniacal hidrolisável, nitrogênio na forma de aminoaçúcar e nitrogênio não identificado. A aplicação de enxofre incrementou enxofre-éster e o enxofre residual do solo.

Na fase inicial de estabelecimento do capim-marandu no Neossolo Quartzarênico em estudo, sugere-se à aplicação de nitrogênio sem a complementação com enxofre. Para os crescimentos subsequentes há necessidade da aplicação conjunta de nitrogênio e de enxofre para maximizar o desempenho do capim.