

UTILIZAÇÃO DO NITROGÊNIO (^{15}N) RESIDUAL DE COBERTURAS DE SOLO E DA URÉIA PELA CULTURA DO MILHO⁽¹⁾

Edson Cabral da Silva⁽²⁾, Takashi Muraoka⁽³⁾, Salatiér Buzetti⁽⁴⁾,
Geovane Lima Guimarães⁽⁵⁾, Paulo César Ocheuze Trivelin⁽³⁾ &
Marcos Emanuel da Costa Veloso⁽⁶⁾

RESUMO

Geralmente, grande parte do N de fertilizantes minerais e de plantas de cobertura de solo não é aproveitada pelo milho no cultivo imediato à aplicação, o qual pode ser absorvido pelas culturas cultivadas subsequente. O objetivo deste trabalho foi avaliar o aproveitamento pelo milho do N residual da uréia, da crotalária (*Crotalaria juncea*) e do milheto (*Pennisetum americanum*) marcados com ^{15}N , aplicados ao milho cultivado em sistema plantio direto, no ano agrícola anterior, num Latossolo Vermelho distroférico no Cerrado. O estudo foi desenvolvido na fazenda experimental da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira-UNESP, Selvíria (MS), em áreas distintas. O delineamento experimental foi de blocos ao acaso com 15 tratamentos e quatro repetições, aplicados ao milho em 2001/02 e 2002/03. Os tratamentos foram dispostos em esquema fatorial 3 x 5, compreendendo a combinação de três coberturas de solo: crotalária juncea, milheto e vegetação espontânea (pousio), e cinco doses de N-uréia: 0, 30, 80, 130 e 180 kg ha⁻¹. Após a colheita do milho, as duas áreas permaneceram em pousio nas entressafras e, em seguida, cultivadas novamente com milho, safras 2002/03 (experimento 1) e 2003/04 (experimento 2), utilizando adubação similar em todas as parcelas, para

⁽¹⁾ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor, apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências do Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo – CENA/USP. Recebido para publicação em julho de 2005 e aprovado em outubro de 2006.

⁽²⁾ Pós-doutorando da Universidade de São Paulo – CENA/USP. Av. Centenário 303, CEP 13416-970 Piracicaba (SP). Bolsista da FAPESP. E-mail: ecsilva@cena.usp.br

⁽³⁾ Professores Associados do CENA/USP. Bolsistas do CNPq. E-mails: muraoka@cena.usp.br; pcoolive@cena.usp.br

⁽⁴⁾ Professor Titular do Departamento de Fitossanidade, Engenharia Rural e Solos da Universidade Estadual Paulista – FEIS/UNESP. Av. Brasil 56, CEP 15385-000 Ilha Solteira (SP). Bolsista do CNPq. E-mail: sbuzetti@agr.feis.unesp.br

⁽⁵⁾ Doutorando em Sistemas de Produção Vegetal, FEIS/UNESP. E-mail: geovanegui@aluno.feis.unesp.br

⁽⁶⁾ Doutorando em Irrigação e Drenagem da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” – ESALQ/USP. Av. Pádua Dias 11, CEP 13418-900 Piracicaba (SP). E-mail: meveloso@esalq.usp.br

distinguir o efeito do N residual. O aproveitamento médio do N residual da parte aérea do milho e da crotalária pelo milho foi inferior a 3,5 e 3 %, respectivamente, da quantidade inicial. A quantidade de N residual da uréia absorvida pelo milho aumentou de forma quadrática, no experimento 1, e linear, no experimento 2, em relação à dose de N aplicada, sendo o aproveitamento desta inferior a 3 %. As coberturas de solo não influenciaram o aproveitamento pelo milho do N residual da uréia, e vice-versa.

Termos de indexação: *Zea mays*, crotalária juncea, milho, adubação nitrogenada, ¹⁵N.

SUMMARY: UTILIZATION OF RESIDUAL NITROGEN (¹⁵N) FROM COVER CROP AND UREA BY CORN

The majority of N from mineral fertilizers and cover crops is usually not used by the very next corn crop, but can be absorbed by follow-up crops. The objective of this study was to evaluate the use of residual nitrogen from urea, sunnhemp (Crotalaria juncea) and millet (Pennisetum americanum) labeled with ¹⁵N, applied to no-tillage corn in the previous growing season, in a Red Latosol of the Cerrado. The study was conducted in an experimental farm of the Sao Paulo State University (UNESP), Ilha Solteira, in Selvíria county (MS), Brazil, in different areas. The experiment had a randomized complete block design, with 15 treatments and four replications. Treatments were applied to corn crop in the 2001/02 and 2003/04 growing seasons. They were distributed in a 3 x 5 factorial layout, representing the combination of three cover crops: sunnhemp, millet and spontaneous vegetation (fallow) and five N rates (as urea): 0, 30, 80, 130, and 180 kg ha⁻¹ of N. After corn harvest, the two areas were fallowed in the dry season and were followed by corn crop in the 2002/03 (experiment 1) and 2003/04 (experiment 2) growing seasons, using the same fertilizer rate on all plots to distinguish the residual effect of N sources. The average use of residual N from the millet and sunnhemp residues (above-ground part) by corn crop was less than 3.5 and 3 %, respectively, of the initial amount. The corn uptake of residual N from urea increased in a quadratic manner in experiment 1 and linearly in experiment Two as a response to the applied N rates, and the recover was below 3 %. The cover crop type did not affect the use of residual N of urea by corn, and vice-versa.

Index terms: *Zea mays*, sunnhemp, millet, nitrogen fertilization, ¹⁵N.

INTRODUÇÃO

Geralmente, nas regiões tropicais e subtropicais cultivadas intensivamente, a diminuição do potencial produtivo dos solos tem sido atribuída à erosão do solo e à não-reposição da matéria orgânica (MOS). O não revolvimento do solo e a reposição do carbono orgânico, por meio de culturas de cobertura ou comerciais, são medidas fundamentais na adição e busca da manutenção da MOS, que se caracteriza como a principal responsável pela capacidade de troca de cátions (CTC) dos solos tropicais e como importante fonte de N para as culturas (Amado et al., 2002; Sousa & Lobato, 2004).

O N aplicado ao solo sob a forma de adubos verdes ou de fertilizantes minerais segue diferentes caminhos:

uma parte é absorvida pelas plantas; outra, perdida do sistema solo-planta por processos de lixiviação, volatilização, erosão e desnitrificação (Lara Cabezas et al., 2000), e o restante permanece no solo, predominantemente na forma orgânica (Coelho et al., 1991; Scivittaro et al., 2003). O conhecimento dos processos envolvidos na incorporação e transformação do N no sistema solo-planta-atmosfera é imprescindível ao desenvolvimento de estratégias de manejo que aumentem o seu aproveitamento pelas culturas. No caso do milho, no cultivo que recebeu a aplicação, o aproveitamento raramente ultrapassa 50 % do aplicado como fertilizante mineral (Lara Cabezas et al., 2004) e 20 % do aplicado como adubos verdes (Scivittaro et al., 2000), permanecendo N residual no solo que poderia ser aproveitado por cultivos subsequentes (Harris et al., 1994; Amado et al., 1999).

A qualidade do resíduo vegetal, sobretudo sua reação C/N, influencia a taxa de mineralização dos resíduos vegetais e conseqüente transferência de N às culturas em rotação. Mascarenhas et al. (1998), avaliando o efeito da crotalária juncea cultivada na entressafra sobre a rotação soja/arroz/milho no verão, por três anos, verificaram maior produtividade de milho e de arroz no terceiro ano de cultivo, comparado à testemunha (monocultivo de milho e de arroz), atribuindo tal fato, possivelmente, ao maior fornecimento de N residual pela crotalária. Silva (2002) verificou efeito residual da crotalária juncea, isolada ou consorciada com sorgo, por dois anos sucessivos, na produtividade de brócolo. Perin et al. (2004) não evidenciaram efeito residual dos adubos verdes crotalária e milheto, isolados ou consorciados, cultivados antecedendo a cultura do milho, sobre a produtividade do brócolo cultivado, subseqüentemente, tanto na ausência quanto na presença de 150 kg ha⁻¹ de N na forma de uréia.

Apesar de os resultados experimentais demonstrarem que o cultivo de plantas de cobertura em sistema de rotação/sucessão promove incremento no estoque de N do solo (Gonçalves et al., 2000; Amado et al., 2002), estudos que caracterizam o efeito residual deste nutriente nas culturas a longo prazo são escassos. Amado et al. (1999), comparando o efeito imediato e o residual das leguminosas ervilhaca (*Vicia sativa* L.) e caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) e da aveia preta (*Avena strigosa* Schreb.), por nove anos, sobre a produtividade de milho cultivado em preparo convencional, reduzido e plantio direto, verificaram que a associação de aveia com as leguminosas promoveu incremento imediato de 45,6 % e residual de 19 %, em relação ao uso contínuo da sucessão aveia/milho. O acréscimo no rendimento do milho foi atribuído ao aumento da capacidade do solo em suprir N, graças ao uso prolongado de leguminosas. Arf et al. (1999) também verificaram que a produtividade de trigo foi inferior nos pré-cultivos que envolviam milho consorciado aos adubos verdes labe-labe (*Dolichos lab-lab*) e mucuna preta (*Mucuna aterrima*), em comparação ao trigo cultivado imediatamente em sucessão à adubação verde.

A cultura de cobertura antecessora já constitui um dos critérios para a recomendação de adubação nitrogenada para o milho em sistema plantio direto (SPD), nos Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina (Amado et al., 2002). Para as condições edafoclimáticas do Cerrado, Sousa & Lobato (2004) recomendam considerar, dentre os critérios para o cálculo da dose de N para o milho, a contribuição do N mineralizado dos resíduos das três últimas culturas de verão, por meio de um fator específico para gramíneas ou leguminosas.

Na região do Cerrado, as gramíneas têm sido mais utilizadas como plantas de cobertura, com destaque para o milheto e braquiárias, não só pela maior tolerância destas espécies ao déficit hídrico com maior

produção de biomassa (Lara Cabezas et al., 2004) e do menor custo das sementes, mas também pelas elevadas temperaturas associadas à alta umidade no verão que promovem rápida decomposição dos resíduos vegetais de baixa relação C/N (Sousa & Lobato, 2004). Power et al. (1986), avaliando o aproveitamento do N dos resíduos de soja e milho marcados com ¹⁵N pela mesma cultura em sucessão, verificaram que praticamente todo N-orgânico contido no resíduo da soja foi utilizado pelo cultivo subseqüente, mas não houve aproveitamento do N-orgânico proveniente do resíduo de milho pela mesma cultura produzida em sucessão.

O aproveitamento baixo do N de fontes minerais e, principalmente, de fontes orgânicas, evidencia o efeito residual deste nutriente em cultivos nos anos agrícolas subseqüentes à sua aplicação (Azam et al., 1985; Scivittaro et al., 2000). Alguns estudos com adubos verdes marcados com ¹⁵N indicam que a maior proporção do N contido na sua matéria seca tem como destino o solo (Harris & Hesterman, 1990). O uso de uma fonte marcada com ¹⁵N permite quantificar, com maior precisão, o aproveitamento desse nutriente (Lara Cabezas et al., 2000), comparado ao método da diferença ou indireto, bem como possibilita quantificar a contribuição do N proveniente do solo (Timmons & Baker, 1992; Muraoka et al., 2002).

Para o milho, o N é o nutriente aplicado em maior quantidade, o mais limitante para o crescimento e desenvolvimento da planta e o que mais onera o custo de produção (Amado et al., 2002). Portanto, é de grande importância o conhecimento de seu efeito residual no ano subseqüente à sua aplicação, para auxiliar na tomada de decisão quanto a formas de manejo que, além de promoverem aumento da produtividade, resultem em redução de custos e minimizem riscos ambientais.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o aproveitamento pelo milho do N residual da uréia, da crotalária (*Crotalaria juncea*) e do milheto (*Pennisetum americanum*) marcados com ¹⁵N, aplicados ao milho cultivado em sistema plantio direto, no ano agrícola anterior, num Latossolo Vermelho distroférico no Cerrado.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado na fazenda experimental da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP, localizada no município de Selvíria, MS (51 ° 22 ' W, 20 ° 22 ' S, altitude 335 m), apresentando média anual de 1.370 mm, 24,5 ° C e 64,8 %, respectivamente, de precipitação pluvial, temperatura e umidade relativa. O solo da área experimental foi classificado como Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) típico A moderado textura argilosa (530 g kg⁻¹ de argila) fase cerrado tropical subcaducifólio relevo suave ondulado (Embrapa, 1999).

A caracterização química do solo amostrado antes da instalação dos ensaios, nas camadas de 0–0,1 e 0,1–0,2 m, apresentou os seguintes resultados, respectivamente: pH (CaCl₂): 5,2 e 4,7; N total: 1 e 0,8 g kg⁻¹; M.O.: 20 e 14,1 g dm⁻³; P (resina): 13 e 5,8 mg dm⁻³; Ca²⁺: 20 e 10,3 mmol_c dm⁻³; Mg²⁺: 15 e 8 mmol_c dm⁻³; K⁺: 3,2 e 1,8 mmol_c dm⁻³; H + Al: 26,9 e 30,8 mmol_c dm⁻³; S: 9,2 e 5,2 mg dm⁻³; SB: 38 e 20,1 mmol_c dm⁻³; CTC: 65 e 51 mmol_c dm⁻³ e saturação por bases de 59 e 40 %.

Esta área apresentava um histórico de 19 anos de plantio convencional, seguido nos últimos seis anos pelo cultivo em sistema plantio direto (SPD). Metade da área foi cultivada no inverno/primavera de 2001 com crotalária juncea e milho (variedade BN-2), e parte deixada em pousio na entressafra (vegetação espontânea). O restante da área foi cultivado semelhantemente no mesmo período no ano subsequente (2002). A marcação isotópica do milho e da crotalária, nos dois anos, foi realizada, simultaneamente, numa área adjacente à do experimento, utilizando-se a dose de 30 kg ha⁻¹ de N-uréia, enriquecida em 10 % de átomos de ¹⁵N em excesso, exceto para o milho em 2002, quando foram utilizados 5 % de átomos de ¹⁵N em excesso. Realizou-se irrigação suplementar por aspersão nos períodos de estiagem prolongada para as plantas de cobertura, sendo o manejo destas realizado com triturador de palha (triton). Maiores detalhamentos sobre o cultivo e marcação das culturas de coberturas podem ser consultados em Silva et al. (2006b).

Logo em seqüência ao manejo das plantas de coberturas, anos agrícolas 2001/02 e 2002/03, as duas áreas foram cultivadas com milho, utilizando-se um delineamento experimental de blocos ao acaso, com quatro repetições, dispostos em esquema fatorial 5 x 3. Os tratamentos compreenderam cinco doses de N, na forma de uréia: 0, 30, 80, 130 e 180 kg ha⁻¹, parcelando-se 30 kg ha⁻¹ de ¹⁵N na sementeira e o restante no estádio de quatro folhas, incorporado ao solo em um sulco de 0,2 m da linha do milho, e três coberturas de solo: vegetação espontânea (pousio na entressafra) e crotalária e milho marcados com ¹⁵N. As quantidades de N aplicadas como crotalária ou milho foram, respectivamente, de 169 e 68,5 kg ha⁻¹ em 2001/02, e de 189 e 64 kg ha⁻¹, em 2002/03. As parcelas experimentais constituíram-se de oito linhas espaçadas de 0,8 m de largura com 7 m de comprimento. Dentro destas, alocaram-se microparcelas de 1 x 2,4 m (três fileiras de milho) para a medição das variáveis isotópicas. A parte aérea das plantas não marcadas foi substituída pela das plantas marcadas, previamente fragmentadas com facão, tentando-se simular o triturador de palha.

Após a colheita do milho (2002 e 2003), as duas áreas experimentais permaneceram em pousio na entressafra. Em 26/11/02 e 04/12/03, a vegetação espontânea foi manejada quimicamente com os herbicidas glyphosate e 2,4 D, nas doses de 1.080 e 670 g ha⁻¹ de i.a., respectivamente.

As sementeiras do milho foram feitas em 28/11/02 (experimento 1) e 06/12/03 (experimento 2), utilizando-se um híbrido simples (Pioneer 30F80), de ciclo semiprecoce, na densidade de 65.000 sementes por hectare, no mesmo espaçamento entre linhas (0,8 m) do cultivo precedente (2001/02 e 2002/03). As parcelas e as microparcelas foram alocadas sobre o mesmo local do cultivo anterior, para possibilitar distinguir o efeito do N residual da crotalária, do milho e da uréia.

A adubação foi semelhante em todas as parcelas e microparcelas, correspondendo, na sementeira, a 25, 85, 50 e 2 kg ha⁻¹, respectivamente, de N, P₂O₅, K₂O e Zn, com base na análise do solo e recomendação descrita em Raij et al. (1996), para uma produtividade esperada de 6 a 8 Mg ha⁻¹ de grãos. A adubação nitrogenada de cobertura constou de 50 kg ha⁻¹ de N na forma de uréia (comercial), aplicada mecanicamente em um sulco de 0,2 m da linha da cultura, quando as plantas apresentavam quatro folhas totalmente expandidas. O controle de plantas daninhas em pós-emergência foi efetuado com a aplicação do herbicida nicossulfuron, na dose de 60 g ha⁻¹ de i.a.. Para o controle da *Spodoptera frugiperda* (lagarta do cartucho), utilizou-se o inseticida deltamethrin, na dose de 75 mL ha⁻¹.

Para determinar a produtividade de grãos, foram coletadas as espigas das quatro linhas centrais da área útil da parcela, desprezando-se um metro nas extremidades. As espigas foram trilhadas mecanicamente, e os dados transformados em kg ha⁻¹ de grãos, padronizados a 13 % de umidade. A determinação da produtividade de matéria seca do restante da parte aérea (palha) foi determinada, por ocasião da maturação fisiológica, em cinco plantas na área útil da parcela. Para a análise do enriquecimento isotópico em ¹⁵N e do teor de N total nos grãos e na palha, foram coletadas, após a maturação fisiológica, três plantas na linha central das microparcelas, cujas amostras foram analisadas em espectrômetro de massa (IRMS), interfaceado com um analisador elementar de N no Laboratório de Isótopos Estáveis do CENA/USP, conforme método descrito em Barrie & Prosser (1996). A seqüência de cálculos para a determinação do aproveitamento do N pelo milho foi realizada, conforme descrito em Lara Cabezas et al. (2000) e Silva et al. (2006b).

Os dados foram submetidos à análise de variância, aplicando-se o teste F, comparando-se as médias dos tratamentos pelo teste de Tukey (p < 0,05) e análise de regressão polinomial (p < 0,05). As análises estatísticas foram feitas com base no programa estatístico "SAS System for Windows-release 6.11" (SAS, 1996).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando que o aproveitamento do N da uréia aplicado nos anos agrícolas 2001/02 e 2002/03 foi, em média, de 53, 44 e 49 %, respectivamente, para o milho

cultivado em sucessão à crotalária, milho e vegetação espontânea (Silva et al., 2006a), e de 16 e 8 %, para o N da crotalária e do milho, respectivamente (Silva et al., 2006b), verifica-se que mais de 80 % do N acumulado na parte aérea da crotalária e mais de 85 % do N do milho não foram absorvidos pelo milho. Tal fato é indicativo da decomposição incompleta dos adubos verdes durante o ciclo do milho e da permanência de grande parte do N da uréia no solo, podendo este ter sido convertido a formas orgânicas, a exemplo do verificado em outros estudos (Azam et al., 1985; Harris & Hesterman, 1990; Scivittaro et al., 2000). Além disso, os resíduos do milho normalmente retornam uma porção do N absorvido ao solo (em torno de 35 %) por meio da mineralização dos resíduos culturais (Coelho et al., 1991; Lara Cabezas et al., 2000; Sousa & Lobato, 2004; Silva et al., 2006a,b).

Por outro lado, parte do N da uréia e das coberturas de solo pode ter sido perdida por lixiviação, volatilização, erosão ou desnitrificação. No entanto, esses processos de perdas de N provavelmente não foram acentuados, em virtude do padrão gradual de mineralização dos resíduos vegetais e da grande interação que o N mineralizado destes resíduos sofre com o N do solo (Azam et al., 1985; Harris & Hesterman, 1990; Muraoka et al., 2002). Além disso, no caso da uréia, esta foi incorporada ao solo o que diminui as perdas de N por volatilização em SPD (Cantarella, 1993; Lara Cabezas et al., 1997). Deste modo, possivelmente, a maior porção do N remanescente, principalmente das culturas de cobertura, deve ter permanecido no solo dentro da zona explorada pelas raízes do milho, a exemplo do verificado por Azam et al. (1985), para N de culturas de cobertura, e de Coelho et al. (1991), para o N da uréia. A maior recuperação no solo do N oriundo de fontes orgânicas é bastante citada na literatura, encontrando-se entre 44 e 89 % do N para adubos verdes, e entre 12 e 53 % para fertilizantes minerais (Azam et al., 1985; Harris & Hesterman, 1990; Harris et al., 1994; Scivittaro et al., 2003), o que se deve, em parte, à maior absorção do N de fontes minerais pela planta em curto prazo (Ladd & Amato, 1986).

Em ambos os experimentos (experimento 1, 2002/03, e experimento 2, 2003/04), a análise de variância revelou efeito significativo da cobertura de solo utilizada no cultivo precedente sobre a produtividade de grãos de milho. Não houve, porém, efeito significativo da dose de N nem interativo desta versus a cultura de cobertura, provavelmente em razão da interação entre o N residual da uréia e o N do solo, favorecida pela sua maior solubilidade. Ademais, o N da uréia foi absorvido em maior quantidade do que o N das coberturas de solo pelo milho cultivado imediato à sua aplicação. Em adição, a vegetação espontânea que se desenvolveu na área na entressafra que antecedeu o cultivo do milho, deve, possivelmente, ter absorvido maior quantidade do N residual da uréia, comparado ao N das coberturas de solo, por estar tal fonte mais prontamente disponível às plantas, suprimindo, assim, sua disponibilidade no solo.

A maior produtividade de grãos de milho no experimento 1 (Quadro 1) foi obtida nos tratamentos em que a crotalária foi usada como cobertura de solo no ano agrícola anterior (2001/02). No entanto, no experimento 2, não houve diferença na produtividade de grãos, em razão do uso de crotalária ou de milho no ano agrícola precedente, sendo a produtividade nos três sistemas de cobertura inferior à observada no experimento 1. Isto, provavelmente, deveu-se à prolongada estiagem (veranico) ocorrida em janeiro de 2004 (Figura 1), quando a cultura encontrava-se em pleno desenvolvimento vegetativo. O efeito da crotalária deve-se, em parte, à sua maior produção de massa seca, capacidade de fixação biológica de N e maior acúmulo de N (Silva et al., 2006b). Silva (2002) também verificou efeito residual do emprego, por dois anos sucessivos, da crotalária juncea, isolada ou consorciada com sorgo, na produtividade de brócolo. Já Perin et al. (2004) não evidenciaram efeito residual da crotalária juncea e milho, isolados ou consorciados, em pré-cultivo ao milho, sobre a produtividade do brócolo, tanto na ausência quanto na presença de 150 kg ha⁻¹ de N-uréia. Dessa forma, efeitos residuais de fontes de N, seja mineral, seja orgânica, apresentam-se diferentemente para cada

Quadro 1. Produtividade de grãos de milho em 2002/03 (experimento 1) e 2003/04 (experimento 2), considerando a cultura de cobertura utilizada no ano agrícola antecedente

Cobertura de solo	Produtividade de grãos de milho	
	Experimento 1 (2002/03)	Experimento 2 (2003/04)
	kg ha ⁻¹	
Crotalária	6129 a ⁽¹⁾	5012 a
Milho	5539 b	4799 a
Pousio	5666 b	4531 b

⁽¹⁾ Médias seguidas por letras distintas, na coluna, diferem entre si pelo teste de Tukey (p& 0,05).

sistema adotado, e a magnitude de resposta depende, em parte, das práticas de manejo do solo e dos resíduos vegetais, culturas empregadas, intensidade de exploração da área e das condições climáticas, as quais influenciam diretamente a atividade da microbiota do solo, mediadora dos processos de mineralização/imobilização do N.

Em ambos os experimentos, a vegetação espontânea no ano agrícola antecedente proporcionou menor produtividade de grãos de milho, comparada à das culturas de cobertura, embora não tenha diferido do milho no experimento 1 (Quadro 1). Mascarenhas et al. (1998) também verificaram maior produtividade de milho e de arroz em sucessão à crotalária no terceiro ano de cultivo, comparada a do pousio com monocultivo de milho e de arroz, atribuindo tal fato ao maior fornecimento de N residual pela crotalária. Tais constatações demonstram que parte do N e de outros nutrientes contidos na massa seca da crotalária e do milho pode favorecer os cultivos subseqüentes, evidenciando os benefícios do cultivo de culturas de cobertura na entressafra na manutenção do potencial produtivo do solo a longo prazo.

Neste contexto, Ladd et al. (1981) enfatizaram que o benefício principal da incorporação de leguminosas ao solo ocorre em longo prazo, mantendo concentrações de N orgânico para assegurar colheitas futuras, o que corrobora as observações feitas por Jensen (1994) que observou, após três cultivos consecutivos, que entre 41 e 45 % do N contido nos resíduos vegetais ainda se encontravam na forma orgânica. Ressalta-se que resíduos vegetais proporcionam, geralmente, também outros efeitos benéficos às culturas, muitas vezes difíceis de ser mensurados, como, por exemplo, o fornecimento de outros macro e micronutrientes, aumento na retenção de umidade, aeração, redução da amplitude térmica, eliminação de camadas compactadas, controle de plantas invasoras, de pragas e de doenças (Calegari, 2004). O principal efeito, porém, é o de evitar o desencadeamento do processo erosivo do solo (Amado et al., 2002; Sousa & Lobato 2004).

O maior aporte de N pela crotalária favoreceu, provavelmente, o maior desenvolvimento do sistema radicular do milho, promovendo o maior aproveitamento do N e de outros nutrientes do solo (Jenkinson et al., 1985; Muraoka et al., 2002), bem como a mineralização do N do solo (Rao et al., 1992; Scivittaro et al., 2003), efeito conhecido como "priming". Esse efeito é relatado, com mais frequência, na literatura em resposta à aplicação de fertilizantes minerais (Rao et al., 1992). No entanto, Azam et al. (1985); Scivittaro et al. (2000) e Muraoka et al. (2002) observaram o mesmo efeito quando da aplicação ao solo de resíduos orgânicos com alto teor de N.

Observa-se, no quadro 2, que o aproveitamento do N residual da crotalária pelo milho foi inferior a 3 % do total contido inicialmente nos resíduos: 169 e 189 kg ha⁻¹, respectivamente, em 2001 e 2002. Para o N remanescente do milho, o aproveitamento pelo

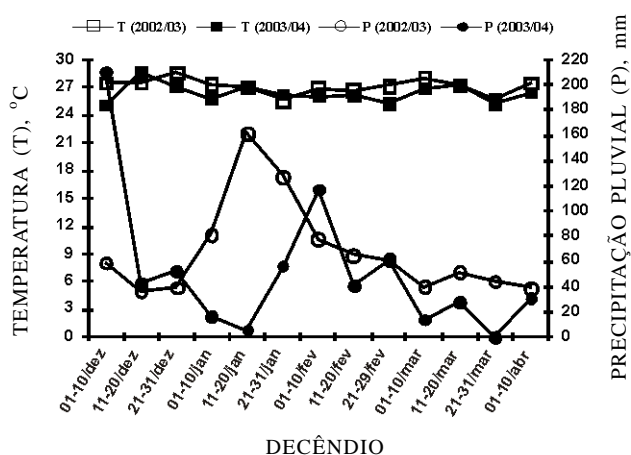


Figura 1. Precipitação pluvial (P) e temperatura média (T) ocorridas durante os experimentos, anos agrícolas 2002/03 e 2003/04.

milho foi pouco superior ao do N da crotalária, porém a quantidade de N no milho proveniente desta gramínea foi menor, em virtude da menor quantidade de N acumulado na sua massa seca inicialmente: 68,5 e 64 kg ha⁻¹, respectivamente, em 2001 e 2002. Ladd et al. (1983) encontraram, também, valores menores do que 5 % de recuperação do N de leguminosas pelo trigo no segundo cultivo. O baixo aproveitamento do N pelo milho no ano agrícola subseqüente deve-se, provavelmente, ao fato de o N remanescente das culturas de cobertura e do fertilizante mineral ser encontrado, predominantemente, sob a forma de compostos orgânicos e sua disponibilidade seguir o padrão de mineralização da MOS (Harris et al., 1994). Por esta razão, o aproveitamento por cultivos subseqüentes é, em geral, bastante pequeno, da ordem de 1 a 6 % do montante aplicado (Harris & Hesterman, 1990; Scivittaro et al., 2000).

Verificou-se que a velocidade de mineralização da matéria orgânica do solo tem alta dependência do sistema de cultivo e, no caso do SPD, pelo fato de não se promoverem o revolvimento do solo e a incorporação dos resíduos vegetais, a mineralização é mais lenta do que no plantio convencional, onde os resíduos são incorporados e, normalmente, fragmentados pelos arados e, ou, grades, acelerando a atividade microbiana (Amado et al., 2002). No entanto, no SPD, a contribuição desses materiais é fundamental para a manutenção do potencial produtivo do solo a longo prazo (Azam et al., 1985), principalmente pelos efeitos benéficos sobre a CTC (Sousa & Lobato, 2004).

Verifica-se, pela figura 2, que, independentemente da dose de uréia aplicada no ano agrícola anterior, a absorção pelo milho do N residual desta fonte foi relativamente pequena, em média, inferior a 4 kg ha⁻¹, tendo sido os dados ajustados a um modelo quadrático, no experimento 1, e linear, no experimento 2. A absorção baixa de N residual possivelmente deveu-se à interação que o N residual sofreu do N do solo e do

Quadro 2. Quantidade de N residual na planta de milho (palha, grãos e palha + grãos), proveniente das coberturas de solo (QNMPCS), crotalária e do milheto e aproveitamento do N da crotalária e do milheto, cultivados, no ano agrícola antecedente, pelo milho, 2002/03 (experimento 1) e 2003/04 (experimento 2)

Cobertura de solo	QNMPCS			Aproveitamento		
	Grão	Palha	Palha + grão	Grão	Palha	Palha + grão
	g kg ⁻¹			%		
	Experimento 1 (2002/03)					
Crotalária	2.630 a ⁽¹⁾	1.200 a	3.830 a	1,56 b	0,71 b	2,27 b
Milheto	1.760 b	950 b	2.710 b	2,59 a	1,39 a	3,98 a
	Experimento 2 (2003/04)					
Crotalária	3.260 a	1.720 a	4.980 a	1,73 a	0,91 b	2,64 b
Milheto	1.030 b	820 b	1.850 b	1,62 a	1,29 a	2,91 a

⁽¹⁾ Médias seguidas por letras distintas, na coluna, dentro do mesmo ano agrícola, diferem entre si pelo teste de Tukey (p ≤ 0,05).

fato de os resíduos do milho (palha), que acumularam, em média, 34 % do N absorvido no ano anterior, possuírem alta relação C/N e somente lentamente serem mineralizados, podendo ter imobilizado parte do N residual da uréia para a realização desse processo, a exemplo do observado por Sampaio & Salcedo (1993). Além disso, deve ser considerado que o trabalho foi realizado no campo em microparcelas não confinadas, podendo ter ocorrido perda lateral de N (Coelho et al., 1991; Villas Bôas et al., 1999; Lara Cabezas et al., 2000). Ressalta-se, ainda, que a área permaneceu em pousio na entressafra precedente à avaliação do efeito residual, podendo grande parte do N remanescente do fertilizante ter sido absorvido pela vegetação espontânea que se desenvolveu no local e somente lentamente com sua decomposição/mineralização tornar-se disponível.

O aproveitamento do N remanescente da uréia aplicada ao milho no anterior foi menor no experimento 2, comparado ao do experimento 1 (Figura 3), provavelmente em razão das condições climáticas distintas entre os anos agrícolas, principalmente a menor precipitação pluvial na fase vegetativa do milho, em janeiro de 2004 (Figura 1). Isto deve ter condicionado o menor crescimento e desenvolvimento do milho e, conseqüentemente, promovido a dinâmica e absorção do N residual e da adubação aplicada no experimento 2. Tal fato, provavelmente, condicionou a menor produtividade tanto de grãos quanto de palha, que foram, em média, 20 % inferiores no experimento 2 (Quadro 1), e promoveu a menor proporção de N residual da uréia acumulado. No experimento 1, os dados se ajustaram a um modelo quadrático em relação às doses de N. Já no experimento 2, os dados não se ajustaram a nenhum modelo testado, sendo o aproveitamento, em média para os dois experimentos, inferior a 3 %, o que assemelha ao observado por

Fernandes (2006), que verificou aproveitamento pelo milho do N residual do sulfato de amônio (120 kg ha⁻¹ de N) menor do que 3 % (3 kg ha⁻¹ de N) do aplicado na mesma cultura no ano agrícola precedente.

A distribuição do N residual acumulado nas diferentes partes da parte aérea do milho foi semelhante em todos os tratamentos. Em média, 67 % do N alocaram-se nos grãos e 33 % no restante da parte aérea do milho, evidenciando que o maior dreno de N na planta são os grãos e que grande quantidade de N das partes vegetativas foi translocada para eles, passando a fazer parte de aminoácidos, proteínas e outros compostos. Distribuição semelhante tem sido observada em outros estudos, tanto em plantio direto como convencional, demonstrando a mesma partição de N (Timmons & Baker, 1992; Lara Cabezas et al., 2000; Sousa & Lobato, 2004).

Considerando a partição do N residual absorvido pelo milho da crotalária e do milheto (Quadro 2) e da uréia (Figuras 2 e 3), observou-se que cerca de um terço deste nutriente (33 %) retornou novamente ao solo pelos resíduos da cultura (palha), devendo parte interagir com a MOS mais estável do solo e o restante deverá ser remineralizada, podendo ser absorvido novamente por cultivos subseqüentes (Amado et al., 2002). No entanto, Sampaio & Salcedo (1993) verificaram que a maior parte do nitrogênio da palha do milho (¹⁵N) não foi absorvida pelo milheto, cinco meses após sua aplicação, e causou decréscimo na disponibilidade de N da uréia, dada a imobilização. Semelhantemente, Power et al. (1986) também verificaram que não houve aproveitamento do N proveniente do resíduo de milho pela mesma cultura produzida em sucessão. Assim, a maior parte do N incorporado aos resíduos do milho no primeiro cultivo permaneceu, provavelmente, estocada na forma orgânica.

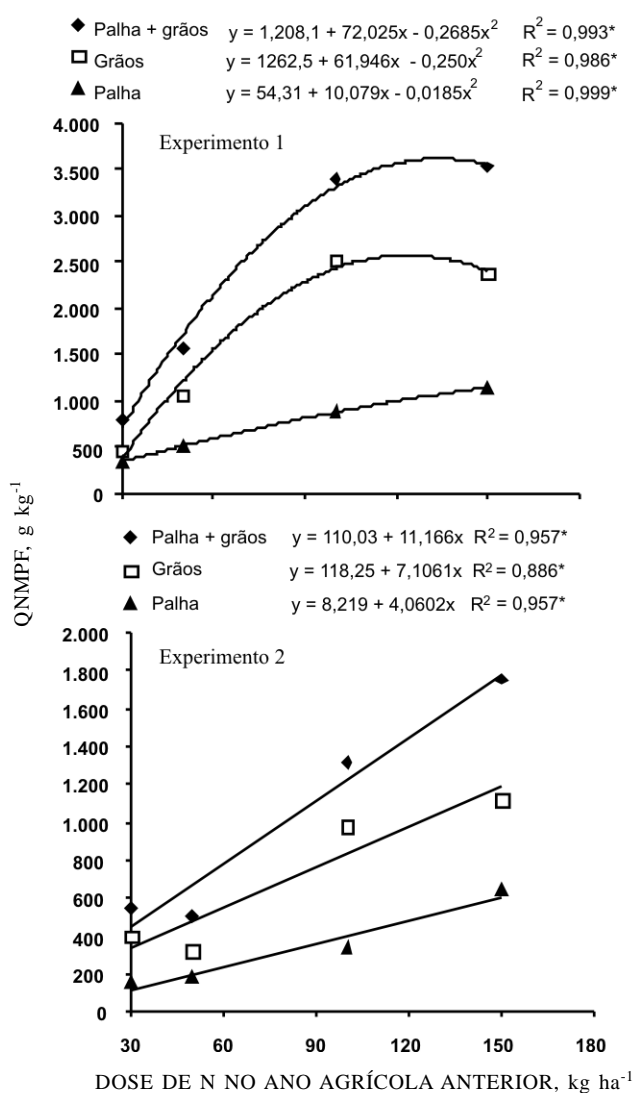


Figura 2. Quantidade de N residual da uréia no milho (palha, grãos e palha + grãos) (QNMPF) em 2002/03 (experimento 1) e 2003/04 (experimento 2), considerando a dose de N aplicada ao milho no ano agrícola antecedente.

A combinação entre cultura de cobertura e N mineral no ano precedente não otimizou a eficiência de utilização do N residual destas fontes, o que ficou comprovado pela não-ocorrência de interação entre esses fatores na análise de variância. Tal fato deve estar relacionado com o efeito do N de culturas de cobertura, sobretudo de leguminosas (menor relação C/N) e, principalmente, de fontes minerais, no cultivo imediato à aplicação (Amado et al., 1999). A quantidade de N residual da crotalária e do milheto absorvida pelo milho neste estudo corresponde a menos do que seis e duas vezes, respectivamente, à absorvida pelo milho no cultivo que recebeu a aplicação (Silva et al., 2006b). Já para o N residual da uréia, corresponde a menos do que vinte vezes (Silva et al., 2006a). Isto difere do que foi observado por Ladd & Amato (1986),

que encontraram maior disponibilidade de ¹⁵N residual de fertilizantes minerais na segunda colheita de trigo em relação ao N de resíduos de leguminosas; estes autores, porém, aplicaram quantidades iniciais de N equivalentes em todos os tratamentos.

Arf et al. (1999) também verificaram menor produtividade de trigo em pré-cultivos que envolviam milho consorciado aos adubos verdes labe-labe e mucuna preta, em comparação ao trigo cultivado imediatamente em sucessão à adubação verde. Os efeitos residuais de vegetais de culturas antecessoras apresentam-se diferentemente para cada sistema adotado e dependem principalmente das condições climáticas, do sistema de cultivo, da cultura empregada, do manejo promovido sobre os resíduos (fragmentação ou dessecção), da intensidade de exploração da área e das características do resíduo,

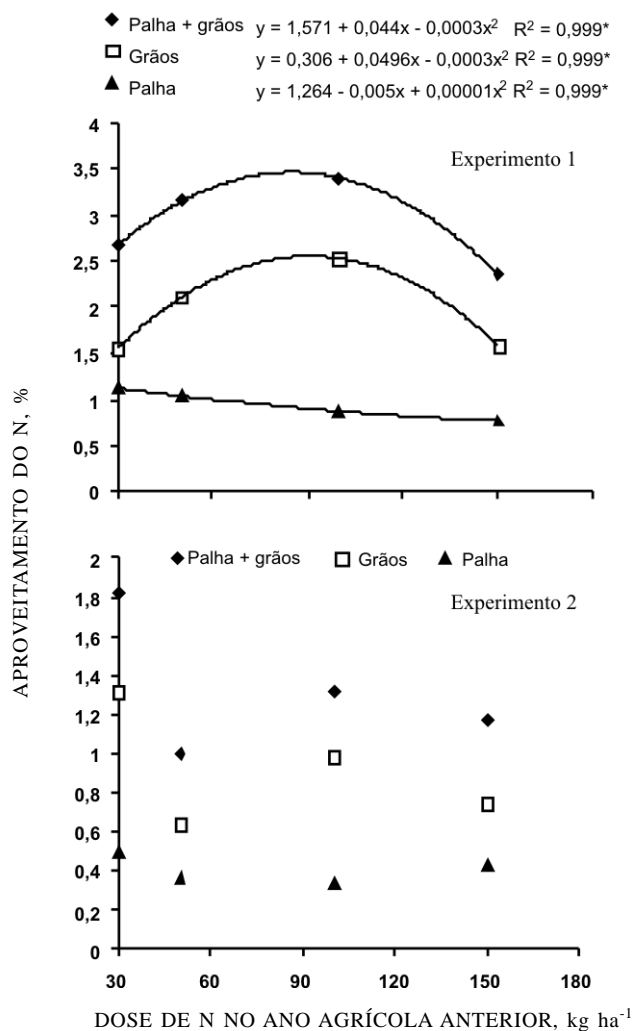


Figura 3. Aproveitamento do N residual da uréia pelo milho (palha, grãos e palha + grãos) em 2002/03 (experimento 1) e 2003/04 (experimento 2), considerando a dose de N aplicada ao milho no ano agrícola antecedente.

sobretudo sua relação C/N. Ressalta-se que, tanto o aproveitamento do N residual das culturas de cobertura quanto o da uréia neste estudo estão subestimados, por não ter sido contabilizado o N acumulado no sistema radicular do milho e o proveniente do sistema radicular das culturas de cobertura, a exemplo do relatado por Azam et al. (1985).

O aproveitamento baixo do N residual tanto da uréia quanto das culturas de cobertura mostra a permanência de grande parte deste no solo. Tal fato indica a necessidade de adoção de sistemas de manejos que promovam a reciclagem e manutenção deste nutriente no sistema solo-planta, contribuindo para o aumento da produtividade, redução de custos e riscos ambientais.

CONCLUSÕES

1. A maior fração do N residual das culturas de cobertura e da uréia não foi aproveitada pelo milho na safra subsequente à aplicação.

2. O aproveitamento médio do N residual da parte aérea do milho e da crotalária, pelo milho foi inferior a 3,5 e 3 %, respectivamente, da quantidade inicial.

3. A absorção de N remanescente da uréia pelo milho aumentou de forma quadrática, no experimento 1, e linear, no experimento 2, em relação à dose de N aplicada inicialmente, sendo o aproveitamento, em média, inferior a 3 %.

4. As coberturas de solo não influenciaram o aproveitamento pelo milho do N residual da uréia, e vice-versa.

5. A crotalária proporcionou na segunda safra após seu cultivo, maior produtividade de grãos ao milho, comparada ao solo em pousio.

AGRADECIMENTOS

À FAPESP, pela concessão de bolsa de estudo (Processo 01/02427-4); à International Atomic Energy Agency - IAEA, pelo apoio financeiro (Processo BRA. 10954/RB), e à UNESP/FEIS, pela concessão de espaço físico, máquinas e implementos.

LITERATURA CITADA

AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J. & AITA, C. Recomendação de adubação nitrogenada para o milho no RS e SC adaptada ao uso de culturas de cobertura do solo, sob sistema plantio direto. R. Bras. Ci. Solo, 26:241-248, 2002.

AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J.; FERNANDES, S.B.V. & BAYER, C. Culturas de cobertura, acúmulo de nitrogênio total no solo e produtividade do milho. R. Bras. Ci. Solo, 23:679-686, 1999.

ARF, O.; SILVA, L.S.; BUZZETTI, S.; ALVES, M.C.; SÁ, M.E.; RODRIGUES, R.A.F. & HERNANDEZ, R.B.T. Efeitos na cultura do trigo da rotação com o milho e adubos verdes, na presença e na ausência de adubação nitrogenada. Bragantia, 58:323-334, 1999.

AZAM, F.; MALIK, K.A. & SAJJAD, M.I. Transformations in soil and availability to plants of ¹⁵N Applied as inorganic fertilizer and legume residues. Plant Soil, 86:3-13, 1985.

BARRIE, A. & PROSSER, S.J. Automated analysis of light-element stable isotopes by isotope ratio mass spectrometry. In: BOUTTON, T.W. & YAMASAKI, S., eds. Mass spectrometry of soils. New York, Marcel Dekker, 1996. p.1-46.

CALEGARI, A. Alternativa de rotação de culturas para plantio direto. R. Plantio Direto, 80:62-70, 2004.

CANTARELLA, H. Calagem e adubação do milho. In: BÜLL, L.T. & CANTARELLA, H., eds. Cultura do milho: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba, POTAFOS, 1993. p.148-196.

COELHO, A.M.; FRANÇA, G.C.; BAHIA, A.F.C. & GUEDES, G.A. Balanço de nitrogênio ¹⁵N em Latossolo Vermelho-Escuro, sob vegetação de cerrado, cultivado com milho. R. Bras. Ci. Solo, 95:187-193, 1991.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, Serviço de Produção de informações, 1999. 412p.

FERNANDES, F.C.S. Dinâmica do nitrogênio na cultura do milho (*Zea mays* L.), em cultivo sucessivo com aveia preta (*Avena strigosa*), sob implantação do sistema plantio direto. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2006. 176p. (Tese de Doutorado)

GONÇALVES, C.N.; CERETTA, C.A. & BASSO, C.J. Sucessões de culturas com plantas de cobertura e milho em plantio direto e sua influência sobre o nitrogênio do solo. R. Bras. Ci. Solo, 24:153-159, 2000.

HARRIS, G.H. & HESTERMAN, O.B. Quantifying the nitrogen contribution from alfafa to soil and two succeeding crops using nitrogen-15. Agron. J., 82:129-134, 1990.

HARRIS, G.H.; HESTERMAN, O.B.; PAUL, E.A.; PETERS, S. & E.JANKE, R.R. Fate of legume and fertilizer nitrogen-15 in a long term cropping systems experiment. Agron. J., 86:910-915, 1994.

JENKINSON, D.S.; FOX, R.H. & RAINER, J.H. Interactions between fertilizer nitrogen and soil nitrogen - the so-called priming effect. J. Soil Sci., 36:425-444, 1985.

JENSEN, E.S. Availability of nitrogen in ¹⁵N-labelled mature pea residues to subsequent crops in the field. Soil Biol. Biochem., 26:465-472, 1994.

LADD, J.N. & AMATO, M. The fate of nitrogen from legume and fertilizer sources in soils successively cropped with wheat under field conditions. Soil Biol. Biochem., 18:417-425, 1986.

- LADD, J.N.; AMATO, M.; JACKSON, R.B.; BUTLER, J.H.A. Utilization by wheat crops of nitrogen from legume residues decomposing in soils in the field. *Soil Biol. Biochem.*, 15:231-238, 1983.
- LADD, J.N.; OADES, J.M. & AMATO, M. Distribution and recovery of nitrogen from legume residues decomposing in soils sown to wheat in the field. *Soil Biol. Biochem.*, 13:251-256, 1981.
- LARA CABEZAS, W.A.R.; KONDÖRFER, G.H. & MOTTA, S.A. Volatilização de N-NH₃ na cultura de milho: I efeito da irrigação e substituição parcial da uréia por sulfato de amônio. *R. Bras. Ci. Solo*, 21:481-487, 1997.
- LARA CABEZAS, W.A.R.; TRIVELIN, P.C.O.; KORNODÓRF, G.H. & PEREIRA, S. Balanço da adubação nitrogenada sólida e fluida de cobertura na cultura do milho em sistema plantio direto no Triângulo Mineiro. *R. Bras. Ci. Solo*, 14:363-376, 2000.
- LARA CABEZAS, W.R.L.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S. & SANTANA, D.G. Influência da cultura antecessora e da adubação nitrogenada na produtividade de milho em sistema plantio direto e solo preparado. *Ci. Rural*, 34:1005-1013, 2004.
- MASCARENHAS, H.A.A.; NOGUEIRA, S.S.S.; TANAKA, R.T.; MARTINS, A.L.M. & CARMELLO, Q.A.C. Efeito na produtividade da rotação de culturas de verão e crotalária no inverno. *Sci. Agric.*, 55:534-537, 1998.
- MURAOKA, T.; AMBROSANO, E.J.; ZAPATA, F.; BORTOLETTO, N.; MARTINS, A.L.M.; TRIVELIN, P.C.O.; BOARETTO, A.E. & SCIVITTARO, W.B. Eficiência de abonos verdes (crotalaria y mucuna) y urea, aplicadas solos o juntamente, como fuentes de N para el cultivo de arroz. *Terra*, 20:17-23, 2002.
- PERIN, A.; SANTOS, R.H.S.; URQUIAGA, S.; GUERRA, J.G.M. & CECON, P.R. Efeito residual da adubação verde no rendimento do brócolo (*Brassica oleracea* L. var. Itálica) cultivado em sucessão ao milho (*Zea mays* L.). *Ci. Rural*, 34:1739-1745, 2004.
- POWER, J.F.; DORAN, J.W. & WILHELM, W.W. Uptake of nitrogen from soil, fertilizer and crop residues by no till corn and soybean. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 50:137-142, 1986.
- RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. & FURLANI, A.M.C. Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. 2.ed. Campinas, Instituto Agrônomo de Campinas, 1996. 285p. (Boletim Técnico, 100)
- RAO, A.C.S.; SMITH, J.L.; PARR, J.F. & PAPENDICK, R.I. Considerations in estimating nitrogen recovery efficiency by the difference and isotopic dilution methods. *Fert. Res.*, 33:209-217, 1992.
- SAMPAIO, E.V.S.B. & SALCEDO, L.H. Mineralização e absorção por milho do nitrogênio do solo, da palha de milho (¹⁵N) e da uréia (¹⁵N). *R. Bras. Ci. Solo*, 17:423-429, 1993.
- SAS INSTITUTE INCORPORATION. The SAS-System for Windows release 6.11 (software). Cary, 1996.
- SCIVITTARO, W.B.; MURAOKA, T.; BOARETTO, A.E. & TRIVELIN, P.C.O. Utilização de nitrogênio de adubos verdes e mineral pelo milho. *R. Bras. Ci. Solo*, 24:917-926, 2000.
- SCIVITTARO, W.B.; MURAOKA, T.; BOARETTO, A.E. & TRIVELIN, P.C.O. Transformações do nitrogênio proveniente de mucuna-preta e uréia utilizados como adubo na cultura do milho. *Pesq. Agropec. Bras.*, 38:1427-1433, 2003.
- SILVA, E.C.; MURAOKA, T.; BUZZETTI, S. & TRIVELIN, P.C.O. Manejo de nitrogênio no milho em Latossolo Vermelho sob plantio direto com diferentes plantas de cobertura. *Pesq. Agropec. Bras.*, 41:477-486, 2006a.
- SILVA, E.C.; MURAOKA, T.; BUZZETTI, S.; VELOSO, M.E.C. & TRIVELIN, P.C.O. Aproveitamento do nitrogênio (¹⁵N) da crotalária e do milho pelo milho sob plantio direto em Latossolo Vermelho de Cerrado. *Ci. Rural*, 36:739-746, 2006b.
- SILVA, V.V. Efeito de cultivos de adubos verdes na produção orgânica de brócolos (*Brassica oleracea* L. var. Itálica) em sistema plantio direto. Seropédica, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2002. 86p. (Tese de Mestrado)
- SOUSA, D.M.G. & LOBATO, E. Adubação com nitrogênio. In: SOUSA, D.M.G. & LOBATO, E., eds. Cerrado: correção do solo e adubação. 2.ed. Planaltina, DF, Embrapa Cerrados, 2004. p.129-144.
- TIMMONS, D.R. & BAKER, J.K. Fertilizer management effect on recovery of labeled nitrogen by continuous no-till. *Agron. J.*, 84:490-496, 1992.
- VILLAS BÔAS, R.L.; BOARETTO, A.E.; BÜLL, L.T. & GUERRINI, I.A. Parcelamento e largura da faixa de aplicação da uréia na recuperação do nitrogênio pela planta de milho. *Sci. Agric.*, 56:1177-1184, 1999.