

Fixação biológica de nitrogênio e fertilizantes nitrogenados no balanço de nitrogênio em soja, milho e algodão

Bruno José Rodrigues Alves⁽¹⁾, Lincoln Zotarelli⁽²⁾, Francisco Marques Fernandes⁽³⁾, João Carlos Heckler⁽³⁾, Ricardo Antonio Tavares de Macedo⁽¹⁾, Robert Michael Boddey⁽¹⁾, Cláudia Pozzi Jantalia⁽¹⁾ e Segundo Urquiaga⁽¹⁾

⁽¹⁾Embrapa Agrobiologia, BR 465, Km 7, CEP 23890-000 Seropédica, RJ. E-mail: bruno@cnpab.embrapa.br, bob@cnpab.embrapa.br, urquiaga@cnpab.embrapa.br ⁽²⁾Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Dep. de Solos, BR 465, Km 7, CEP 23890-000 Seropédica, RJ. E-mail: lzotarelli@ufrj.br, ric.macedo@ibest.com.br ⁽³⁾Embrapa Agropecuária Oeste, BR 163, Km 253,6, CEP 79804-970 Dourados, MS. E-mail: fmarques@cpao.embrapa.br, heckler@cpao.embrapa.br

Resumo – O objetivo deste trabalho foi avaliar os efeitos da fixação biológica de nitrogênio (FBN) da cultura da soja, e a eficiência do uso de fertilizantes nitrogenados (EUFN) pelas culturas de milho e algodão, no balanço de N de um Latossolo Vermelho distroférico, sob plantio direto, em Dourados, MS. O estudo foi feito em dois anos, concentrando-se nas safras de verão. A contribuição da FBN para a soja foi avaliada pela técnica de abundância natural de ¹⁵N. A EUFN foi avaliada mediante a substituição dos fertilizantes nitrogenados convencionais pelos enriquecidos com ¹⁵N, nas culturas do milho e algodão. No primeiro ano, foram adicionados 115 kg ha⁻¹ de N, de forma parcelada, para ambas as culturas; somente a parte aérea das plantas foi avaliada. No segundo ano, somente a cultura do milho foi avaliada, tendo recebido 70 kg ha⁻¹ de N aos 29 DAE. Nesse ano, além da parte aérea do milho, amostrou-se também o solo, na profundidade de 0–20 cm. Nos dois anos de avaliação, a FBN foi superior a 80% do N nas plantas de soja, o que resultou em alta produtividade e em balanço positivo de N para o solo. A EUFN na parte aérea de milho e algodão, no primeiro ano, foi de 48 e 61%, respectivamente. No segundo ano, a EUFN, na parte aérea do milho, foi de 46%, tendo-se observado que 24% do N do fertilizante permaneceu nos primeiros 20 cm de solo. Para os níveis de produtividade das culturas de milho e algodão, o manejo do fertilizante nitrogenado resulta em balanços negativos de N para o solo.

Termos para indexação: ¹⁵N, eficiência do uso de N, plantio direto.

Biological nitrogen fixation and nitrogen fertilizer on the nitrogen balance of soybean, maize and cotton

Abstract – The subject of this work was to evaluate the effect of biological nitrogen fixation (BNF) of soybean, and the nitrogen fertilizer use efficiency (NFUE) by maize and cotton, on the N balance of an Oxisol (Typic Haplorthox) under no-tillage, in Dourados, MS. The study was carried out for two consecutive years, focusing the summer crops. The BNF contribution to soybean was evaluated by the ¹⁵N natural abundance technique. The NFUE was evaluated by the substitution of conventional N fertilizers used for maize and cotton crops by ¹⁵N enriched ones. In the first year, both crops were fertilized with 115 kg N ha⁻¹ split in three doses; only plant aerial parts were evaluated. In the second year, only the maize crop was evaluated and received 70 kg ha⁻¹ N, as a dressing fertilization at 29 DAE. In that year, the aerial part of maize plants and the soil of a 0–20 cm layer were evaluated. For two consecutive harvests, the BNF contribution to soybean was over 80%, bringing about high yields and a positive N balance to the soil. In the first year, NFUE for aerial parts of maize and cotton were 48 and 61%, respectively. In the second year, NFUE for maize was 46%, and the soil layer of 0–20 cm also retained 24% of de N fertilizer applied. For the yield levels of maize and cotton, the fertilizer management results in negative N balances to the soil.

Index-terms: ¹⁵N, N use efficiency, no-tillage.

Introdução

A prática de plantio direto ganhou espaço significativo no Sul do País pelo grande potencial em reduzir a erosão, que trazia problemas como o assoreamento de mananciais e a perda da camada fértil do solo.

Nas demais áreas do país, principalmente nos Cerrados, este sistema de plantio ganhou grande adesão em meados dos anos 90, por significar, entre outros benefícios, uma redução de custos pela diminuição das operações mecânicas do solo (Derpsch & Benites, 2003).

Resultados de diferentes regiões indicam que o plantio direto também pode favorecer a fixação biológica de nitrogênio (FBN) em leguminosas (Alves et al., 2003), processo importante na agricultura brasileira, que tem a soja como cultura principal na safra de verão. No entanto, o alto índice de colheita de N da cultura da soja, normalmente, equivale à proporção do N na planta derivado da FBN, o que se traduz em um balanço de N para o solo próximo da neutralidade (Zotarelli, 2000), embora ainda existam dúvidas quanto à real contribuição das raízes para o resultado final do balanço de nitrogênio. As metodologias tradicional e isotópica, com ^{15}N (Russel & Fillery, 1996), usadas para quantificar o N acumulado nas raízes das leguminosas, produzem resultados muito discrepantes, e há motivos para se acreditar que a primeira subestima o acúmulo de N (Peoples & Herridge, 2000) e a última superestima (Araújo, 2004). O balanço de N, realizado somente com a parte aérea da cultura, apesar da menor exatidão, permite caracterizar mais facilmente culturas e manejos com grande importância para o enriquecimento do sistema com nitrogênio (Peoples et al., 1995; Kessel & Hartley, 2000).

O uso de fertilizantes em culturas de grãos e fibras também é importante na manutenção das reservas de N do solo. Alta produtividade com doses baixas de N, normalmente significa que a quantidade de N exportada com a colheita é maior do que a adicionada, o que contribui para empobrecer o solo. Alves et al. (2000) encontraram balanços positivos de N, em um estudo com rotação de culturas, quando uma leguminosa de inverno estava presente, ou quando a produtividade de milho foi baixa o suficiente para que a fertilização superasse a exportação de N nos grãos. Nesse estudo, no entanto, considerou-se uma recuperação de 100% do N do fertilizante no sistema solo-planta, o que certamente não é uma situação comum. Existem evidências de que alguns processos que levam à perda de N ocorrem de forma mais intensa em áreas sob plantio direto, especialmente pela volatilização de amônia (Lara-Cabezas et al., 1997).

Um sistema agrícola, ambientalmente sustentável, requer que as reservas de nutrientes e matéria orgânica do solo sejam preservadas ao longo dos anos (Greenland, 1975). Uma vez que os conteúdos de C e de N do solo estão diretamente relacionados, variando numa relação entre 12:1 e 18:1, quando se considera a matéria orgânica estável do solo, rotações de culturas em que as perdas de N, com a exportação de N nos órgãos colhidos, sejam maiores do que as entradas de N, promoverão a perda de

C do solo, ou matéria orgânica, e são consideradas insustentáveis ao longo do tempo (Urquiaga et al., 2005).

Na região dos Cerrados, a soja é a leguminosa de maior importância em termos de área plantada, e apresenta total dependência da FBN. Outras culturas, comumente plantadas em rotação com a soja, são milho e algodão, tal como ocorre na região de Dourados, MS (Produção..., 2003). Na chamada safrinha, plantam-se mais frequentemente gramíneas, e as doses de fertilizante nitrogenado são reduzidas em comparação às da safra. Dessa forma, a manutenção dos estoques de N do solo, nessa região, depende de um sistema simbiótico altamente eficiente para a cultura da soja e do eficiente uso de fertilizantes nitrogenados pelas culturas, especialmente milho e algodão.

O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito da FBN da cultura da soja e a eficiência do uso de fertilizantes nitrogenados (EUFN) pelas culturas de milho e algodão, no balanço de N de um Latossolo Vermelho distroférrico, sob plantio direto.

Material e Métodos

O estudo foi conduzido na área experimental da Embrapa Agropecuária Oeste, situada no Município de Dourados, MS. Nesta região, as chuvas concentram-se nos meses de outubro a abril. O inverno é mais seco, porém não impede a exploração agrícola sem o auxílio da irrigação. O solo da região é classificado como Latossolo Vermelho distroférrico (Embrapa, 1999), com textura argilosa (67% argila). Os resultados da análise química do solo, nas profundidades de 0–10 e 10–20 cm, antes da implantação do experimento, estão descritos na Tabela 1.

No inverno de 2000, delimitaram-se as parcelas experimentais com dimensões de 12 m de largura por 24 m de comprimento. Foram estudadas três rotações de culturas, com três repetições, num delineamento em

Tabela 1. Resultado da análise química do Latossolo Vermelho distrófico utilizado no estudo, nas profundidades de 0–10 e 10–20 cm.

Profundidade (cm)	pH (água)	Al	Ca	Mg	K	P ⁽¹⁾ (mg kg ⁻¹)	MO ⁽²⁾ (g kg ⁻¹)
0–10	6,0	0,0	4,7	2,2	0,24	21,3	27,3
10–20	5,5	0,2	4,4	1,7	0,10	12,8	24,0

⁽¹⁾Extrator Mehlich-1. ⁽²⁾Matéria orgânica do solo: digestão úmida (Walkley-Black).

blocos ao acaso. Duas das rotações foram iniciadas com a cultura de aveia e a terceira com nabo forrageiro, todas sob plantio direto, depois da dessecação da vegetação espontânea ali existente. No verão de 2000/2001, foram plantadas as sementes de milho (híbrido Agromen 3180) depois do nabo forrageiro, e as de soja (cultivar BR 16) e algodão (cultivar CD 403), depois da aveia. A cultura da soja recebeu fertilização com P e K, e suas sementes passaram por inoculação de *Bradyrhizobium* spp. As culturas de milho e de algodão foram fertilizadas com N, P e K. O fertilizante nitrogenado foi aplicado na dose de 115 kg ha⁻¹ de N, parcelada em 25 kg ha⁻¹ de N no plantio, na forma de uréia colocada no sulco, e mais duas doses de 45 kg ha⁻¹ de N, na forma de sulfato de amônio, em cobertura, aplicadas numa faixa ao lado da linha de semeadura, aos 26 e 48 dias depois da emergência (DAE). No inverno do ano 2001, semeou-se aveia nas parcelas ocupadas por milho e algodão durante o verão, e nabo forrageiro naquelas plantadas com soja. No segundo ano de avaliação do experimento (safra de verão), o milho foi semeado nas parcelas cuja seqüência anterior foi aveia-soja-nabo forrageiro; a soja, naquelas cuja seqüência anterior foi nabo forrageiro-milho-aveia. A cultura do algodão foi plantada na terceira rotação, porém não foi avaliada nesse segundo ano. A cultura da soja foi fertilizada e passou por inoculação como na safra anterior. As culturas de milho e algodão receberam uma dose menor de N. Foram aplicados 70 kg ha⁻¹ de N em cobertura, na faixa ao lado da linha de semeadura, na forma de sulfato de amônio, aos 29 DAE.

As avaliações, descritas a seguir, foram feitas com as culturas de soja e de milho no primeiro e segundo anos (safra de 2000/2001 e de 2001/2002), e com a cultura de algodão apenas no primeiro ano.

A produção de grãos foi obtida pela colheita da faixa central de cada parcela, correspondente à área útil de aproximadamente 120 m². A massa de matéria seca acumulada pela parte aérea das plantas foi estimada pela amostragem de uma área de 3 m² dentro de cada parcela, fora da área para produção de grãos, tendo sido a soja amostrada no estádio R6, o algodoeiro no 12º estádio de desenvolvimento, e o milho, depois do pleno enchimento dos grãos. Depois da determinação da matéria seca (estufa a 65°C), amostras dos materiais colhidos foram moídas e analisadas quanto ao conteúdo de N total (Alves et al., 1994).

A contribuição da FBN foi quantificada, para a cultura da soja, pela técnica de diluição isotópica de ¹⁵N, baseada

na abundância natural desse isótopo (Shearer & Kohl, 1986). Além das amostras da parte aérea das plantas de soja, obtidas no estádio R6, espécies espontâneas, não-leguminosas, foram também coletadas das mesmas parcelas para serem utilizadas como referência da abundância natural de ¹⁵N do N disponível no solo. O material colhido foi secado a 65°C, moído e analisado para abundância natural de ¹⁵N (Okito et al., 2004). A porcentagem de N derivada da FBN na planta (%FBN) foi calculada pela fórmula $\%FBN = [(\delta^{15}N_c - \delta^{15}N_s) / (\delta^{15}N_c - B)]100$, em que $\delta^{15}N_c$ e $\delta^{15}N_s$ correspondem aos valores de abundância natural de ¹⁵N das plantas-controle e da soja, respectivamente; e B é uma constante relacionada ao processo de discriminação isotópica de ¹⁵N pelo processo da FBN, aqui considerada como sendo -1,3 deltas (Bergersen et al., 1988). A quantidade total de N na planta derivada da FBN foi calculada pela multiplicação da %FBN pelo total de N acumulado pela planta.

A avaliação da EUFN foi feita em microparcels estabelecidas dentro das parcelas de milho e algodão. Cada microparcela correspondeu a duas linhas de plantas de 2 m, colhendo-se 1,5 m centrais de cada, nos mesmos estádios descritos para a avaliação da matéria seca das plantas. Na safra de 2000/2001, as plantas de milho e algodão das microparcels receberam os fertilizantes nitrogenados, conforme descrito anteriormente, porém usando-se fertilizantes enriquecidos com 5% de átomos de ¹⁵N. Cada microparcela recebeu todas as doses dos fertilizantes nitrogenados, porém, dependendo da microparcela, apenas uma das doses foi enriquecida com ¹⁵N. Assim, no primeiro ano, cada parcela teve três microparcels, pois foram avaliadas a dose de plantio e duas aplicações em cobertura. Isso permitiu avaliar a eficiência do uso do N, em cada época de aplicação, e a eficiência integrada para o período de crescimento das culturas (Alves et al., 2005). Na safra de 2001/2002, a EUFN foi avaliada somente para a cultura do milho. Os 70 kg ha⁻¹ de N, aplicados em cobertura, foram marcados com 5% de átomos de ¹⁵N em excesso. Assim, somente foi demarcada uma microparcela em cada parcela, tomando-se o cuidado de não usar áreas ocupadas com microparcels do ano anterior. Somente no segundo ano, de cada microparcela marcada com ¹⁵N, foi retirado um monólito de solo de 0,30 m de comprimento e 1 m de largura (linha de milho localizada no centro), na profundidade de 0,20 m, para se avaliar a fração do fertilizante nitrogenado que permaneceu no solo.

As plantas de milho e algodão, colhidas das microparcelas (milho e algodão no primeiro ano e milho no segundo), foram divididas em caule/colmo + folhas e frutos. O material foi secado em estufa a 65°C e finamente moído. As amostras de solo, obtidas apenas no segundo ano, nas microparcelas com milho, foram pesadas e subamostradas para determinação do peso total, depois da secagem em estufa a 105°C. Essas mesmas amostras secas foram finamente moídas e analisadas para o conteúdo de N total (Alves et al., 1994). Tanto as amostras moídas de solo quanto às de plantas foram analisadas para o enriquecimento de ¹⁵N (Okito et al., 2004).

A eficiência do uso de fertilizantes nitrogenados (%) foi calculada pela fórmula $EUFN = (QNPSf/QF)100$, em que QNPSf é a quantidade de N derivado do fertilizante presente na planta, ou no solo, e QF é a quantidade de N aplicada como fertilizante. A QNPSf foi calculada multiplicando-se a quantidade de N total da planta, ou do solo, pela porcentagem de N da planta, ou do solo, derivada do fertilizante (%NPSf). A %NPSf foi calculada pela fórmula $\%NPSf = (\%^{15}N_{ps}/\%^{15}N_f)100$, em que %¹⁵N_{ps} é a porcentagem de átomos de ¹⁵N em excesso na planta, ou solo; e %¹⁵N_f é a porcentagem de átomos de ¹⁵N do fertilizante em excesso.

No cálculo do balanço de N para a soja (ΔN), considerou-se o total de N acumulado pela cultura (QNC), a porcentagem do N acumulado na planta derivado da FBN (%FBN) e o total de N existente nos grãos colhidos (QNG): $\Delta N = [(QNC \times \%FBN)/100] - QNG$.

Para milho e algodão, considerou-se o total de N adicionado pelo fertilizante (QF) e o total de N exportado nos grãos e capulhos (QNG), respectivamente. Os dados de EUFN total (EUFNt) foram utilizados para avaliar o total de N do fertilizante que permaneceu no sistema:

$$\Delta N = [(QF \times EUFNt)/100] - QNG$$

$$EUFNt = [(QNPf + QNSf)/QF]100,$$

em que QNPf é a quantidade de N do fertilizante recuperada na planta e QNSf é a quantidade recuperada no solo até a profundidade amostrada.

Os resultados médios de produção e FBN foram acompanhados do erro-padrão da média. Depois da análise de variância, determinou-se a diferença mínima significativa (teste LSD de Student), para verificar diferenças na EUFN, obtidas para as fertilizações aos 26 e 48 DAE, no primeiro ano de estudo para a cultura do milho e do algodão, separadamente.

Para avaliar se as médias estimadas do balanço de N, para cada cultura, eram diferentes de zero, calculou-se o intervalo de confiança a 95% para cada uma, utilizando-se

o erro-padrão da média e o valor da distribuição t de Student.

Resultados e Discussão

A produtividade das culturas de soja, milho e algodão, em ambas as safras, esteve próxima dos números normalmente esperados para a região (Tabela 2). A soja foi a cultura que mais acumulou N nos grãos e, conseqüentemente, foi a responsável pela maior exportação do nutriente do sistema (Tabela 2). O total de N acumulado nos grãos de soja e milho, no primeiro ano, correspondeu, respectivamente, a 86 e 68% do total de N acumulado na parte aérea. Os capulhos corresponderam a 87% do N na parte aérea das plantas de algodão. No segundo ano, os grãos corresponderam a 83 e 70% do N acumulado na parte aérea das plantas de soja e milho, respectivamente.

Os índices de colheita de N encontrados para as culturas são, certamente, superestimados por não ter sido considerado o total desse nutriente presente nas raízes. No caso da soja, o N presente nas raízes poderia significar de 3 a 30% do N acumulado pela planta, dependendo da idade da cultura e do método de quantificação utilizado (Peoples & Herridge, 2000; Zotarelli, 2000; Araújo, 2004).

A contribuição da FBN para as plantas de soja variou de 83 a 88% (Tabela 3). A elevada eficiência da FBN, obtida nos dois anos do experimento, indica que a utilização do plantio direto, entre outros benefícios, parece estimular o processo simbiótico, provavelmente pela menor disponibilidade de N no solo, em razão da maior imobilização da população microbiana do solo (Kessel & Hartley, 2000). Os percentuais de FBN encontrados

Tabela 2. Produtividade (grãos e fibras), acumulação de N na parte aérea e N exportado nos grãos das plantas de soja, milho e algodão e índice de colheita de N para a parte aérea da planta (ICN), nas safras 2000/2001 e 2001/2002⁽¹⁾.

Cultura	Produtividade	N acumulado		ICN (%)
		pela planta	N exportado nos grãos/fibra	
------(kg ha ⁻¹)-----				
2000/2001				
Soja	3.553	234,2 (17,4)	200,9 (14,3)	85,8
Milho	6.041	115,6 (10,1)	78,1 (8,2)	68,0
Algodão	2.471	131,6 (6,7)	114,6 (7,4)	87,0
2001/2002				
Soja	2.935	200,8 (9,3)	165,9 (7,1)	82,6
Milho	5.137	103,2 (8,1)	72,6 (6,2)	70,3

⁽¹⁾Os números entre parênteses representam o desvio-padrão da média.

estão dentro do que se estimou em 21 propriedades, em um levantamento feito por Macedo (2003), para a cultura da soja no noroeste do Estado do Paraná. Segundo esse autor, nos primeiros anos do cultivo da soja, sob plantio direto, são esperadas altas contribuições da FBN, respeitando-se os procedimentos e recomendações para inoculação na cultura e condicionamento da fertilidade do solo.

Em função do bom desenvolvimento da cultura da soja, as quantidades de N derivadas da FBN foram elevadas, com variação entre 176 e 193 kg ha⁻¹ de nitrogênio (Tabela 3). Porém, os valores devem ter sido ainda maiores, uma vez que o N acumulado nas raízes não foi quantificado.

No primeiro ano de avaliação da fertilização nitrogenada das culturas de milho e algodão, foram encontrados, respectivamente, resultados de EUFN de 18 e 23% para os 25 kg ha⁻¹ de N aplicados ao plantio (Figura 1). Valores mais elevados de EUFN, de 62% para milho e 71% para algodão, foram encontrados para a dose de 45 kg ha⁻¹ de N, na aplicação realizada aos 26 dias depois da emergência (DAE). A maior EUFN ocorreu aos 26 DAE (45 kg ha⁻¹ de N), mesmo sendo a dose de N quase o dobro da aplicada no plantio. As EUFN obtidas para milho e algodão, na dose aplicada 48 DAE, foram, respectivamente, 50 e 72%, e não foram estatisticamente diferentes das obtidas aos 26 DAE, na comparação dentro de cada cultura. A baixa EUFN observada na dose de plantio pode estar relacionada à perda de N por volatilização de amônia, uma vez que a fonte aplicada foi uréia. Embora o adubo tenha sido incorporado, as perdas de N por este processo podem ser significativas (Lara-Cabezas et al., 1997). Outra possibilidade para a baixa EUFN da dose de plantio seria a imobilização do N na matéria orgânica do solo que ocorre nos primeiros anos de adoção do sistema plantio direto, principalmente quando a fertilização é feita depois da aveia (Boddey et al., 1997).

Tabela 3. Porcentagem e quantidade de N derivado da fixação biológica de nitrogênio (FBN) na cultura da soja, nas safras 2000/2001 e 2001/2002⁽¹⁾.

Safra	FBN (%) ⁽²⁾	FBN (kg ha ⁻¹)
2000/2001	82,5 (2,7)	193,2 (9,4)
2001/2002	87,6 (6,4)	175,9 (8,8)

⁽¹⁾Os números entre parênteses representam o desvio-padrão da média.

⁽²⁾Foi utilizado um valor B de -1,3 delta para a estimativa da FBN (Bergersen et al., 1988).

Considerando-se os 115 kg ha⁻¹ de N, aplicados de forma parcelada, encontrou-se uma EUFN de 48% para a cultura do milho, e de 61% para a do algodão (Figura 1). Os valores encontrados para a cultura do milho corresponderam à faixa média para a cultura, enquanto que a observada para algodão pode ser considerada elevada, de acordo com Balasubramanian et al. (2004). No entanto, esses autores reconhecem que grande número de fatores pode interferir na EUFN, especialmente a disponibilidade de água e o momento da aplicação do fertilizante.

As estimativas de EUFN para a dose total aplicada não significam, necessariamente, que as perdas de N do fertilizante chegaram a 50%, em média. Parte do fertilizante não utilizado pode se manter no solo e estar disponível para culturas subsequentes (Urquiaga & Zapata, 2000). Pelos resultados obtidos no segundo ano, no estudo feito com a cultura do milho, a parte aérea, incluindo os grãos, continha 46% dos 70 kg ha⁻¹ de N adicionados em cobertura (Figura 2), uma eficiência muito próxima da encontrada no ano anterior. No entanto, a análise do solo da camada de 0–20 cm permitiu estimar que 24% do N adicionado em cobertura ainda se encontrava no solo, depois da colheita do milho (Figura 2). Dessa forma, contabilizando-se todo o N recuperado do fertilizante, foi possível estimar que aproximadamente 70% do N adicionado em cobertura encontrava-se no

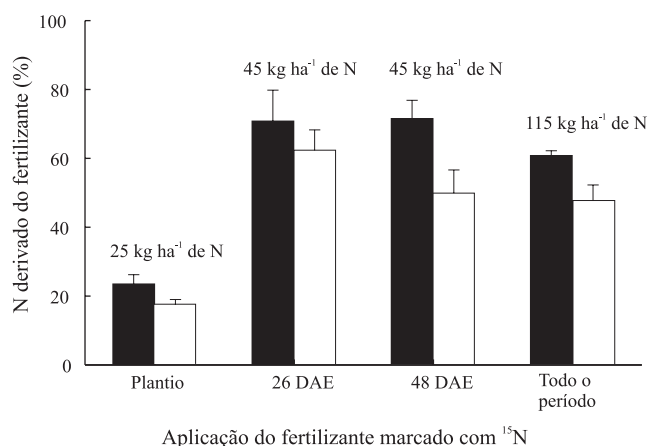


Figura 1. Porcentagem de recuperação do N do fertilizante adicionado em diferentes épocas e integrado em todo o período, nas culturas do algodão (■) e do milho (□), na safra 2000/2001. Barras em cada coluna significam o erro-padrão da média. Não houve diferença estatística entre os dados de EUFN obtidos aos 26 e 48 DAE, na análise dentro de cada cultura (DMS milho = 12,8; DMS algodão = 10,6).

sistema solo-planta. Por esta estimativa, pode-se deduzir que cerca de 21 kg ha^{-1} de N foram perdidos do sistema, ou por volatilização ou por lixiviação para camadas mais profundas. Embora 85% da matéria seca das raízes de milho se encontrem na profundidade de 0–20 cm, as raízes que se distribuem abaixo deste limite são predominantemente raízes finas ($\phi < 0,12 \text{ cm}$), com comprimento radicular semelhante ao das camadas superficiais (Venzke Filho et al., 2004). Essa característica faz levantar a hipótese de que parte do fertilizante não recuperado tenha ficado imobilizado nas raízes das camadas mais profundas, não recuperadas na amostragem realizada até 20 cm de profundidade. De acordo com Peoples et al. (2004), em média, 19 a 38% do fertilizante nitrogenado, aplicado a culturas de grãos, permanece no solo depois da colheita. Assim, em razão dos resultados obtidos e da literatura disponível, pode-se assumir que nas condições deste trabalho, pelo menos 25% do fertilizante nitrogenado permaneceu no solo depois da colheita.

A alta contribuição da FBN para as plantas de soja compensou a quantidade de N exportada nos grãos, na ocasião da colheita (Tabela 4). Perdas originadas do N derivado da FBN podem ser consideradas praticamente nulas até a colheita da cultura, porém tendem a aumentar, dependendo da qualidade do resíduo de colheita (Jensen & Hauggaard-Nielsen, 2003).

No primeiro ano, a grande quantidade de N alocada nos grãos e exportada com a colheita resultou em um

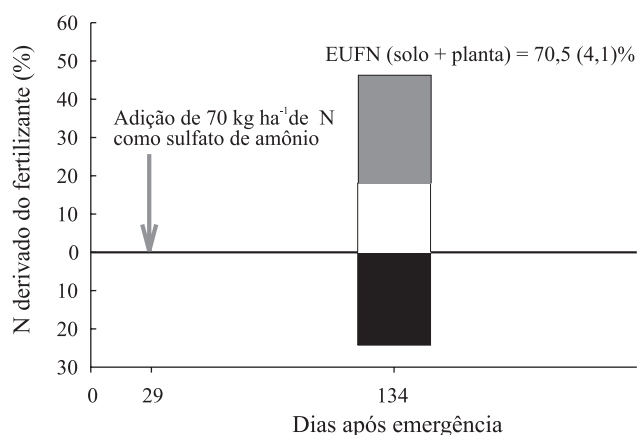


Figura 2. Porcentagem de recuperação do N do fertilizante adicionado em cobertura na cultura do milho, na safra 2001/2002, obtida nos grãos (■), na palha (□) e no solo até a profundidade de 20 cm (■). O valor entre parênteses, é o erro padrão da média.

balanço de N negativo para a cultura da soja, em torno de -8 kg ha^{-1} . No segundo ano, o balanço de N para a cultura foi positivo e representou uma entrada de N para o sistema de 10 kg ha^{-1} , que foi relacionado à menor produtividade da cultura e à alta contribuição da FBN. O erro experimental encontrado no balanço de N para a cultura da soja, no primeiro ano, mostra que o resultado negativo não foi estatisticamente diferente de zero. Além disso, valores mais positivos seriam observados com a inclusão do N acumulado no sistema radicular, embora, por motivos metodológicos, ainda seja incerta a magnitude do incremento. Araújo (2004) mediu a quantidade de N presente nas raízes de plantas de soja, durante o crescimento da planta, utilizando o método tradicional de tamisação de um volume conhecido de solo, onde se encontra o sistema radicular da cultura. A máxima quantidade de N presente nos tecidos radiculares foi observada aos 84 DAE, o que correspondeu a 5% do total acumulado pela cultura. Considerando-se o método baseado no uso do isótopo ^{15}N – que inclui o N mineralizado de raízes mortas, de exsudatos, e de raízes não recuperadas pelo método tradicional (Russel & Fillery, 1996) –, o N das raízes da soja corresponderia, em média, a 30% do N acumulado na planta (Peoples & Herridge, 2000).

Pode-se afirmar, pelos estudos acima, que as plantas de soja teriam acumulado uma quantidade total de N pelo menos 5% superior à observada, o que implicaria em um balanço de nitrogênio de $+2 \text{ kg ha}^{-1}$ de N no primeiro ano, e de $+19 \text{ kg ha}^{-1}$ de N no segundo. Assim, nas condições deste trabalho, a FBN na soja seria sufi-

Tabela 4. Quantificação do balanço de N (kg ha^{-1}) para o sistema, calculado pela diferença entre a entrada de N (fertilizante e FBN) e a saída (produtos colhidos e perdas de N).

Safra	Entrada (A)		Saída (B)		Balanço ⁽²⁾ (A - B)
	Fertilizante	FBN	Colheita	Perdas ⁽¹⁾	
Soja					
2000/2001	0	193,2	200,9	0,0	$-7,7 \pm 13,7$
2001/2002	0	175,9	165,9	0,0	$10,0 \pm 8,4$
Milho					
2000/2001	115	0,0	78,1	31,1	$5,8 \pm 8,3$
2001/2002	70	0,0	72,6	21,0	$-23,6 \pm 9,2$
Algodão					
2000/2001	115	0,0	114,6	16,1	$-15,7 \pm 11,2$

⁽¹⁾Considerou-se que 25% do fertilizante nitrogenado permaneceu no solo, e que são desprezíveis as perdas de N derivado da FBN até a colheita da soja. ⁽²⁾Média \pm intervalo de confiança de 95% de acordo com a distribuição t de Student; valores positivos indicam ganho de N para o sistema, e negativos, perda.

ciente para garantir alta produtividade e manter o balanço de N do solo positivo, ou pelo menos próximo à neutralidade. Além da correção da fertilidade do solo e do uso de inoculantes apropriados, o uso do plantio direto deve ter sido um dos fatores de maior importância no balanço de N, obtido para a cultura da soja (Alves et al., 2000, 2003).

A quantidade de fertilizante aplicada na cultura do milho, associada ao parcelamento da dose, foi importante para o resultado do balanço de N, obtido no primeiro ano de estudo (Tabela 4). A maior dose de N aplicada, de certa forma, colaborou para a maior produtividade da cultura, além de ter compensado o N exportado nos grãos e o N perdido no sistema. No segundo ano, a menor quantidade de fertilizante, aplicada em uma única vez em cobertura, resultou em um balanço de N muito negativo para o solo. Para a cultura do algodão, maiores doses de N seriam necessárias para compensar a exportação de N do sistema, apesar da alta eficiência de uso do fertilizante pela cultura.

O aumento das doses de fertilizantes nitrogenados representa maior risco ambiental (Peoples et al., 2004), e por isso, antes de se aumentar doses, deve-se pensar no manejo do sistema para otimizar as doses atuais. A consideração da soja como componente da rotação de culturas pode resultar em balanços mais positivos para o sistema, se o sistema fixador de N₂ funcionar com alta eficiência. O uso de adubos verdes de inverno seria boa alternativa, para garantir o balanço positivo de N para o sistema e para reduzir a necessidade de fertilizantes nitrogenados para a cultura sucessora (Zotarelli et al., 2000).

Conclusões

1. A fixação biológica de N na cultura da soja, com inoculação de rizóbio e sob plantio direto, proporciona alta produtividade de grãos e balanço positivo de N para o sistema.

2. Para os níveis de produtividade das culturas de milho e algodão sob plantio direto, o manejo adotado para o fertilizante nitrogenado pode resultar em balanço negativo de N para o solo.

Agradecimentos

À Embrapa, ao IAEA/FAO, à Capes e ao CNPq, pelo suporte financeiro; aos operários e técnicos da

Embrapa Agropecuária Oeste e à Embrapa Agrobiologia, pelo auxílio na condução do experimento, coleta e análise de amostras.

Referências

- ALVES, B.J.R.; BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S. The success of BNF in soybean in Brazil. **Plant and Soil**, v.252, p.1-9, 2003a.
- ALVES, B.J.R.; SANTOS, J.C.F. dos; BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S. Métodos de determinação do nitrogênio em solo e planta. In: HUNGRIA, M.E.; ARAÚJO, R.S. (Ed.). **Manual de métodos empregados em estudos de microbiologia agrícola**. Brasília: Embrapa-SPI, 1994. p.449-470.
- ALVES, B.J.R.; ZOTARELLI, L.; BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S. Transformações do nitrogênio em rotações de culturas sob sistema plantio direto. In: WORKSHOP SOBRE NITROGÊNIO NA SUSTENTABILIDADE DE SISTEMAS INTENSIVOS DE PRODUÇÃO AGROPECUÁRIA, 1., 2000, Dourados. **Anais**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste; Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2000. p.9-31. (Embrapa Agropecuária Oeste. Documentos, 26; Embrapa Agrobiologia. Documentos, 128).
- ALVES, B.J.R.; ZOTARELLI, L.; SISTI, C.P.J.; BODDEY, R.M.; URQUIAGA, S. In: AQUINO, A.M. de; ASSIS, R.L. de (Ed.). **Conhecimentos e técnicas avançadas para o estudo dos processos da biota no sistema solo-planta**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2005. p.275-295.
- ARAÚJO, E.S. **Estimativa da quantidade de N acumulada pelo sistema radicular da soja e sua importância para o balanço de N do solo**. 2004. 101p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.
- BALASUBRAMANIAN, V.; ALVES, B.J.R.; AULAKH, M.; BEKUNDA, M.; CAI, Z.; DRINKWATER, L.; MUGENDI, D.; KESSEL, C. van; OENEMA, O. Crop, environmental and management factors affecting fertilizer nitrogen use efficiency. In: MOSIER, A.; SYERS, J.K.; FRENEY, J.R. (Ed.). **Agriculture and the nitrogen cycle: assessing the impacts of fertilizer use on food production and the environment**. Washington DC: Island Press, 2004. p.19-33. (SCOPE report, 65).
- BERGERSEN, F.J.; PEOPLES, M.B.; TURNER, G.L. Isotopic discriminations during the accumulation of nitrogen by soybeans. **Australian Journal of Plant Physiology**, v.15, p.407-420, 1988.
- BODDEY, R.M.; SÁ, J.C. de M.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S. The contribution of biological nitrogen fixation for sustainable agricultural systems in the tropics. **Soil Biology and Biochemistry**, v.29, p.787-799, 1997.
- DERPSCH, R.; BENITES, J.R. Situation of conservation agriculture in the world. In: WORLD CONGRESS ON CONSERVATION AGRICULTURE, 2., 2003, Foz do Iguaçu. **Anais**. Ponta Grossa: FEBRAPDP, 2003. p.67-70.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 1999. 412p.

- GREENLAND, D.J. Bringing the green revolution to the shifting cultivator. **Science**, v.190, p.841-844, 1975.
- JENSEN, E.S.; HAUGGAARD-NIELSEN, H. How can increased use of biological N₂ fixation in agriculture benefit the environment? **Plant and Soil**, v.252, p.177-186, 2003.
- KESSEL, C. van; HARTLEY, C. Agricultural management of grain legumes: has it led to an increase in nitrogen fixation? **Field Crops Research**, v.65, p.165-181, 2000.
- LARA-CABEZAS, W.A.R.; KORNDORFER, G.H.; MOTTA, S.A. Volatilização de nitrogênio da amônia na cultura de milho: efeito da irrigação e substituição parcial da uréia por sulfato de amônio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21, p.481-487, 1997.
- MACEDO, R.A.T. **Influência de fatores de manejo sobre a fixação biológica de nitrogênio na cultura da soja em áreas experimentais e de produção no Noroeste do Paraná**. 2003. 89p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.
- OKITO, A.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R.M. Isotopic fractionation during N₂ fixation by four tropical legumes. **Soil Biology and Biochemistry**, v.36, p.1179-1190, 2004.
- PEOPLES, M.B.; BOYER, E.W.; GOULDING, K.W.T.; HEFFER, P.; OCHWOH, V.A.; VANLAUWE, B.; WOOD, S.; YAGI, K.; VAN CLEEMPUT, O. Pathways of nitrogen loss and their impacts on human health and the environment. In: MOSIER, A.; SYERS, J.K.; FRENEY, J.R. (Ed.). **Agriculture and the nitrogen cycle: assessing the impacts of fertilizer use on food production and the environment**. Washington DC: Island Press, 2004. p.53-69. (SCOPE report, 65).
- PEOPLES, M.B.; HERRIDGE, D.F. Quantification of biological nitrogen fixation in agricultural systems. In: PEDROSA, F.O.; HUNGRIA, M.; YATES, M.G.; NEWTON, W.E. (Ed.). **Nitrogen fixation: from molecules to crop productivity**. Dordrecht: Kluwer Academic Pub., 2000. p.519-524.
- PEOPLES, M.B.; HERRIDGE, D.F.; LADHA, J.K. Biological nitrogen fixation: an efficient source of nitrogen for sustainable agricultural production? **Plant and soil**, v.174, p.3-28, 1995.
- PRODUÇÃO AGRÍCOLA MUNICIPAL: culturas temporárias e permanentes 2003. Rio de Janeiro: IBGE, v.30, 2003. 93p.
- RUSSELL, C.A.; FILLERY, I.R.P. In situ ¹⁵N labelling of lupin below-ground biomass. **Australian Journal of Agricultural Research**, v.47, p.1035-1046, 1996.
- SHEARER, G.; KOHL, D.H. N₂-fixation in field settings: estimations based on natural ¹⁵N abundance. **Australian Journal of Plant Physiology**, v.13, p.699-756, 1986.
- URQUIAGA, S.; SISTI, C.P.J.; ZOTARELLI, L.; ALVES, B.J.R. Manejo de sistemas agrícolas para seqüestro de carbono no solo. In: AQUINO, A.M. de; ASSIS, R.L. de (Ed.). **Conhecimentos e técnicas avançadas para o estudo dos processos da biota no sistema solo-planta**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2005. p.257-273.
- URQUIAGA, S.; ZAPATA, F. **Manejo eficiente de la fertilización nitrogenada de cultivos anuales en América Latina y el Caribe**. Porto Alegre: Gênese, 2000. 123p.
- VENZKE FILHO, S. de P.; FEIGL, B.J.; PICCOLO, M. de C.; FANTE JUNIOR, L.; SIQUEIRA NETO, M.; CERRI, C.C. Root systems and soil microbial biomass under no-tillage system. **Scientia Agricola**, v.61, p.529-537, 2004.
- ZOTARELLI, L. **Balanco de nitrogênio na rotação de culturas em sistemas de plantio direto e convencional na região de Londrina-PR**. 2000. 128p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica.

Recebido em 30 de dezembro de 2004 e aprovado em 16 de agosto de 2005