

**IMOBILIZAÇÃO DO NITROGÊNIO DO SULFATO DE
AMÔNIO E DA URÉIA APLICADOS EM PRÉ-SEMEADURA
E COBERTURA NA CULTURA DO MILHO EM SISTEMA
PLANTIO DIRETO**

MURILO RODRIGUES DE ARRUDA

Orientador

Prof. Dr. Waldo A. R. Lara Cabezas

UBERLÂNDIA

2002

MURILO RODRIGUES DE ARRUDA

**IMOBILIZAÇÃO DO NITROGÊNIO DO SULFATO DE
AMÔNIO E DA URÉIA APLICADOS EM PRÉ-SEMEADURA
E COBERTURA NA CULTURA DO MILHO EM SISTEMA
PLANTIO DIRETO**

Dissertação apresentada A Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Mestrado, área de concentração em Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de "Mestre"

Orientador

Prof. Dr. Waldo A.R. Lara Cabezas

UBERLÂNDIA
MINAS GERAIS – BRASIL
2002


 Unidade: *Amazônia Ocidental*
 Valor aquisição: *R\$ 9,70*
 Data aquisição: *19.01.2004*
 N.º N. Fiscal/Fatura: *—*
 Fornecedor: *—*
 N.º OCS: *—*
 Origem: *Doges*
 N.º Registro: *2004.00001*

FICHA CATALOGRÁFICA

- A779i Arruda, Murilo Rodrigues de, 1973-
 Imobilização do nitrogênio do sulfato de amônio e da uréia aplicados em pré-semeadura e cobertura na cultura do milho em sistema plantio direto / Murilo Rodrigues de Arruda. - Uberlândia, 2002.
 97f. : il.
 Orientador: Waldo A. R. Lara Cabezas.
 Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Agronomia.
 Inclui bibliografia.
 1. Milho - Cultivo - Teses. 2. Plantio direto - Teses. 3. Nitrogênio na agricultura - Teses. 4. Fertilizantes nitrogenados - Teses. I. Cabezas, Waldo A. R. Lara. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. III. Título.

CDU: 633.15 (043.3)

MURILO RODRIGUES DE ARRUDA

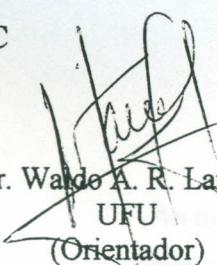
**IMOBILIZAÇÃO DO NITROGÊNIO DO SULFATO DE
AMÔNIO E DA URÉIA APLICADOS EM PRÉ-SEMEADURA E
COBERTURA NA CULTURA DO MILHO EM SISTEMA
PLANTIO DIRETO**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Mestrado, área de concentração em Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de Mestre.

Aprovada em 02 de junho de 2002

Prof. Dr. Paulo César O. Trivelin – CENA/USP

Prof. Dr. Heitor Cantarella - IAC


Prof. Dr. Waldo A. R. Lara Cabezas
UFU
(Orientador)

UBERLÂNDIA
MINAS GERAIS - BRASIL

Aos meus pais, Vicente e Yêda, pela
dedicação, carinho e apoio
OFEREÇO

Ao meus irmãos, Eduardo e Stella, e ao
meu Orientador, Waldo Lara, DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família pelo apoio irrestrito à realização deste trabalho, em especial minha mãe, Maria Yêda Corrêa Arruda e ao meu pai Vicente de Paulo Rodrigues de Arruda.

Agradeço à fazenda Floresta do Lobo, nas pessoas de Antônio Mauro Lucinda e Dr. Fernando Ferraz pela imensurável ajuda na pesquisa agrônômica.

Agradeço ao eternos amigos Wellington Davi Ramos, Carlos de Castro Bichuete, Juliano Vilela e Luís Rondinelli pelo apoio nesta empreitada.

Agradeço à SN – Centro de Pesquisa e Promoção do Sulfato de Amônio, nas pessoas do Sr. Antônio de Pádua Cruz e Eduardo Spolidório por terem financiado este projeto.

Agradeço ao convênio Embrapa – Petrobrás pelo apoio financeiro.

Agradeço ao Dr. Paulo César Trivelin pelo inestimável apoio e sugestões na condução deste trabalho.

Agradeço ao funcionários da Universidade Federal de Uberlândia, Gilda Pereira de Rezende Fernandes, Manuel Ribeiro Pires, Marinho Monteiro dos Santos, Eduardo de Oliveira Chagas, Jane Maria Dias Ferreira, Adílio de Sá Junior, Maria Auxiliadora e Marli Nunes de Castro Kato.

Agradeço ao meu orientador, Waldo Alejandro Rubén Lara Cabezas, pelo apoio, compreensão e por ter me dado um futuro profissional.

RESUMO

ARRUDA, Murilo Rodrigues. **Imobilização do Nitrogênio do Sulfato de Amônio e da Uréia Aplicados em Pré-semeadura e Cobertura na Cultura do Milho em Sistema Plantio Direto**. UFU, 2002. 97p. (Dissertação - Mestrado em Agronomia)

Com o objetivo de se quantificar o N-fertilizante imobilizado no sulco de adubação, a recuperação do N-fertilizante pelo milho e as possíveis perdas de nitrogênio, a partir do uso de duas fontes de N, aplicadas em pré-semeadura e em cobertura, em sistema plantio direto (SPD), na cultura do milho, instalou-se um experimento no Município de Uberlândia, MG. Os tratamentos constituíram na aplicação de $80\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N, tendo como fontes, o sulfato de amônio e a uréia, aplicados em pré-semeadura e em cobertura, para se fazer as medições do nitrogênio do fertilizante em épocas previamente determinadas, de acordo com o período decorrido após a aplicação dos fertilizantes e dos estádios de desenvolvimento fenológico do milho. No estágio de florescimento do milho, o N-fertilizante imobilizado no solo foi de 4,8; 2,4; 7,9 e $7,8\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ e a recuperação pelo milho foi de 57,1; 51,5; 28,3 e 41,5% para a aplicação de sulfato de amônio em pré-semeadura e cobertura e de uréia em pré-semeadura e cobertura, respectivamente. O rendimento de grãos do milho foi de 7.940, 7.730, 7.050 e $6.930\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ para a aplicação de sulfato de amônio em pré-semeadura e cobertura e de uréia em pré-semeadura e cobertura, respectivamente, sendo que, independente da época de aplicação, o uso de sulfato de amônio determinou as maiores produtividades ao milho, quando comparado com a aplicação de uréia, seja em pré-semeadura ou em cobertura.

Orientador: Waldo A.R. Lara Cabezas, Universidade Federal de Uberlândia

ABSTRACT

Arruda, Murilo Rodrigues. **Immobilization of Nitrogen of Ammonium Sulphate and Urea Applied Before and After Sowing of Maize in No-tillage System.** UFU, 2002. 97p. (Dissertation - Master in Agronomy)

The objective of this study was quantify the immobilization of N - fertilizer in the ridge of fertilization, the recovery of N - fertilizer by maize and losses of nitrogen. It was used two sources of N, ammonium sulphate and urea, tagged with ^{15}N , applied before or after the sowing, in no-tillage system. The experiment was installed in the city of Uberlândia, Brazil. The treatments consisted in the application of $80\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ of N, which were applied before or after sowing the maize. Then, the measurement of N fate was done in combination with many development stadiums of the plants.

In the stadium of flowering, the immobilized N-fertilizer in the ridge of fertilization was 4.8 and $2.4\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ for the ammonium sulphate before and after sowing respectively; 7.9 e $7.8\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ for urea application before and after sowing, respectively. In this stadium the recoveries of the N - fertilizer were of 57.1 and 51.5% for the ammonium sulphate before and after sowing respectively, and 28.2 and 41.5% for the urea before and after sowing, respectively. Independent of the time of application, the ammonium sulphate determined the biggest yield, when compared with urea application, either before or after the maize sowing.

Orientador: Waldo A. R. Lara Cabezas, Universidade Federal de Uberlândia

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	01
2. REVISÃO DE LITERATURA	03
2.1 Consumo de Fertilizantes Nitrogenados no Mundo e no Brasil	03
2.2 Importância do Nitrogênio para a Cultura do Milho	05
2.3 Imobilização do N-fertilizante no Solo	07
2.4 Lixiviação de Nitrogênio	18
2.5 Perdas Gasosas de Nitrogênio no Solo	21
2.6 Importância do Enxofre na Eficiência da Adubação Nitrogenada..	23
2.7 Uso de Culturas de cobertura do Solo	25
2.8 Uso de Traçadores na Pesquisa do Nitrogênio no Solo e na Planta ..	28
3. MATERIAL E MÉTODOS	36
3.1 Localização do Experimento	36
3.2 Características do Solo.....	36
3.3 Histórico da Área	37
3.4 Cultura de Cobertura Utilizada para a Formação de Palhada	38
3.5 Características do Híbrido de Milho Utilizado	39
3.6 Adubação de Semeadura e Manejos na Cultura do Milho	39
3.7 Tratamentos Experimentais	40
3.8 Épocas, Formas de Amostragem e Análises de Laboratório	42
3.8.1 Amostragem e Análise do Nitrogênio do Solo	43
3.8.2 Amostragem e Análise do Nitrogênio na Planta de Milho	44
3.9 Cálculos dos Parâmetros Avaliados para o milho e o solo	45
3.9.1 Nitrogênio-Fertilizante no Solo	45
3.9.2 Nitrogênio na Planta Proveniente do Fertilizante (Nppf)	48
3.9.3 Produtividade do Milho	50

3.10	Avaliação Nutricional	50
3.11	Análise Estatística	51
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
4.1	Cultura Antecessora ao Milho	52
4.2	Cultura do Milho	55
4.2.1	Pluviosidade	55
4.2.2	Comportamento do Nitrogênio-Fertilizante no Sulco de Adubação .	56
4.2.3	Absorção de Nitrogênio e Recuperação do N-Fertilizante pelo Milh ...	66
4.3	Destino do N-Fertilizante no Estádio de Florescimento do Milho	72
4.4	Produtividade do Milho	75
4.5	CONCLUSÕES	79
4.6	LITERATURA CITADA	80

INTRODUÇÃO

Na safra 2001/2002, o Brasil deverá ultrapassar os 100 milhões de toneladas de grãos produzidos, principalmente de milho e soja. Isso é um fato a destacar por se tratar de um país em desenvolvimento, onde praticamente os estímulos à produção são poucos e para poucos, quando comparado com os países ricos. O Brasil conseguiu essa façanha graças à insistência dos produtores rurais e ao uso de tecnologia, da pesquisa e da extensão gerado em numerosas instituições comprometidas com a competitividade da agricultura brasileira.

O sistema plantio direto (SPD) tem-se tornado um foco constante da pesquisa, por ser um modelo de manejo que demanda tecnologia e conhecimento para que suas vantagens, em termos de sustentabilidade, apareçam e se sobreponham aos efeitos deletérios do plantio convencional (PC). Dentro do SPD, um aspecto que vem se destacando cada vez mais, dada a sua importância econômica e ambiental, é o manejo da adubação nitrogenada.

Não existe, ainda hoje, uma recomendação segura e inquestionável a respeito do manejo da adubação nitrogenada na agricultura, principalmente para a cultura do milho, em virtude de sua demanda e resposta ao nitrogênio. Em SPD, para melhorar a eficiência da adubação nitrogenada e diminuir custos, tem-se usado práticas alternativas no manejo do N-fertilizante, em que persistem dúvidas sobre quais são as melhores épocas para a aplicação desse nutriente: se antes, durante ou após a semeadura, e quais as variáveis que deveriam ser levadas em consideração para uma tomada de decisão.

Dentro deste contexto, a quantificação dos processos de imobilização, ou seja, a absorção pela biomassa microbiana do nitrogênio mineral do solo (seja do fertilizante ou nativo do próprio solo), de lixiviação (percolação em profundidade do nitrogênio através do solo) e de perdas gasosas de nitrogênio é

importante e deve ser considerada, quando da recomendação das épocas e doses da fertilização nitrogenada para o milho.

Nesse sentido, foi desenvolvido um experimento em SPD, com o objetivo de avaliar a imobilização, no solo, do nitrogênio de duas fontes – sulfato de amônio e uréia – aplicado em pré-semeadura e em cobertura, sua recuperação pela cultura do milho e as possíveis perdas por lixiviação e/ou via gasosa.

REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Consumo de Fertilizantes Nitrogenados no Mundo e no Brasil

O nitrogênio é, depois do oxigênio, hidrogênio e carbono, o nutriente mais exigido pelas plantas por ser um componente essencial em todas as proteínas, enzimas, ácidos nucleicos, clorofilas e alguns hormônios de crescimento (Wild, 1988).

Segundo a Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação – FAO (2002), no ano de 1999, o consumo aparente de fertilizantes nitrogenados (com relação a fontes como os superfosfatos e o cloreto de potássio), em massa, foi 2,5 vezes maior em relação aos fertilizantes fosfatados (33 milhões de toneladas) e cerca de quatro vezes o consumo de fontes potássicas (22 milhões de toneladas). Das 85,5 milhões de toneladas de adubos nitrogenados consumidos em 1999 (FAO, 2002), 60% (51 milhões de toneladas) foram utilizados para a produção de cereais, dos quais apenas 17 milhões de toneladas foram efetivamente recuperados pelas culturas e o restante, 34 milhões de toneladas, foi perdido para o ambiente, o que representou um prejuízo de aproximadamente 18 bilhões de dólares (Raun & Johnson, 1999). De acordo com esses autores, em média 33% do N-fertilizante é recuperado pelas culturas, sendo que nos países em desenvolvimento esse número cai para 29%, e nos países desenvolvidos atinge 42% de recuperação, por causa das diferenças de tecnologias empregadas.

Destaca-se, neste contexto, a aplicação de fertilizantes nitrogenados na cultura do milho, que no ano de 1996 foi o segundo grão mais produzido no mundo, com 586 milhões de toneladas (FAO, 2002), em que se consumiram aproximadamente 11 milhões de toneladas de N (IFA, 2002), mostrando a importância da adubação nitrogenada nessa cultura.

No Brasil, no ano de 2000, o consumo aparente de fertilizantes nitrogenados foi de sete milhões de toneladas, das quais 4.700.000 foram

importadas (MAPA, 2002), contribuindo para gerar déficits comerciais ao país. No total, apenas 2.340.000 toneladas foram efetivamente recuperadas pelas culturas, se considerado o índice médio de recuperação de nitrogênio pelas plantas cultivadas, proposto por Raun & Johnson (1999). Na safra 96/97, os agricultores brasileiros compraram 370 mil toneladas de N e produziram 35,7 milhões de toneladas de milho. Se considerar que todo esse nitrogênio foi efetivamente aplicado na cultura, tem-se que para cada 96kg de grãos de milho produzidos, utilizou-se 1kg de nitrogênio-fertilizante. No País, o sulfato de amônio e a uréia responderam por 60% do consumo de fertilizantes nitrogenados no ano 2000 (MAPA, 2000). Isso se deve às características físicas, químicas e econômicas dessas fontes, que as tornam interessantes aos produtores rurais, dentro das características da agricultura brasileira.

A uréia é o fertilizante nitrogenado sólido mais concentrado do mercado (45% de N) e um dos de menor custo em muitos países (Wild, 1988). Trata-se de uma fonte amídica [$\text{CO}(\text{NH}_2)_2$] que pode apresentar elevadas perdas por volatilização de amônia se manejada inadequadamente (Lara Cabezas et al., 1997 a, b).

O sulfato de amônio é uma fonte amoniacal com 21% de N, e tem como vantagens o elevado teor de enxofre (24%) e a facilidade de manejo, uma vez que apresenta perdas muito pequenas por volatilização (Lara Cabezas, 2001), podendo ser aplicada a lanço, o que diminui custos.

De acordo com Melo Filho & Richetti (2002), a adubação N, P, K mais micronutrientes é responsável por cerca de 28% (R\$ 250,00 ou US\$ 100,00 por hectare) dos custos de produção do milho em plantio direto, sendo o nitrogênio responsável por boa parte desses gastos. Isso ocorre em razão de ser o milho uma das culturas que mais respondem à adubação nitrogenada, e uma das mais exigentes em nitrogênio.

Assim, devido ao elevado custo e alto requerimento de nitrogênio pelas culturas que não o fixam biologicamente, aliado a uma baixa eficiência observada no uso de fertilizantes nitrogenados, tem-se notado uma crescente demanda por informações sobre quais são as melhores épocas e doses de nitrogênio a serem aplicadas, dentro de um determinado manejo, levando-se em consideração as características do solo, clima e rotação de culturas, de maneira que se minimizem as perdas e se aumente a eficiência da adubação nitrogenada na cultura do milho.

2.2 Importância do Nitrogênio para a Cultura do Milho

Por ser o milho uma cultura exigente e que responde à adubação nitrogenada, a disponibilidade de N no solo está diretamente relacionada com a quantidade de N absorvido e a produtividade do milho. Rembon & MacKenzie (1997) quantificaram que, em SPD, na rotação milho/soja, os grãos de milho absorveram $20,1\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N sem a aplicação de nitrogênio-fertilizante. Quando se aplicaram $180\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N, os grãos de milho absorveram $109\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de nitrogênio do solo e do fertilizante. Os autores verificaram, ainda, que a absorção de nitrogênio pelos grãos pode variar de acordo com a dose de N aplicada, a rotação de culturas (milho/milho ou soja/milho), o tipo de solo e o ano da safra, ou seja, apenas a adição de N-fertilizante não é garantia de sua absorção pelo milho. Overman et al. (1994) observaram que, para a produção de 20 e $14\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}$ de matéria seca (grãos e palhada), o milho absorveu cerca de 200 e $130\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N, respectivamente, em três diferentes tipos de solo. Os autores concluíram que existe alta correlação ($R > 0,99$) entre a produção de matéria seca e a absorção de N por toda a planta e pelos grãos de milho.

Andrade et al. (1975) observaram, analisando cinco diferentes híbridos, que, em média, o teor de N na planta de milho, desconsiderando-se o sistema

radicular, foi de 1,3%, o equivalente a $205\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N acumulado pela cultura para uma produção média de $10.000\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de restos culturais, mais $6.180\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de grãos. Zhou et al. (1997) obtiveram resultados semelhantes, nos quais o milho absorveu $235\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N para produzir 16.000kg de matéria seca (palhada e grãos) por hectare.

Em milho irrigado, Coelho et al. (1992) avaliaram que o milho absorveu 54 e $134\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ para as doses 0 e $240\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N, respectivamente, sendo que a dose recomendada para se atingir 90% da produção máxima de grãos ($6.570\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) foi de $80\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N.

Uma adequada absorção de N pelo milho, dentro de determinado manejo, irá depender do momento em que o nitrogênio mineral estará disponível para a planta em quantidades suficientes para se obter elevadas produtividades. Fancelli & Dourado Neto (2001) afirmaram que o potencial produtivo do milho é definido precocemente, quando a planta se encontra com 4 a 6 folhas, período no qual não deve estar submetida a nenhum tipo de estresse, inclusive indisponibilidade de N, particularmente na forma amoniacal, para o desenvolvimento e funcionamento normal do sistema radicular. Andrade et al. (1975) verificaram que o milho começou a absorver nitrogênio do solo com mais intensidade 30 dias após a germinação, ou seja, quando possuía cerca de oito folhas, e interrompe esse acúmulo por volta de 6 a 8 dias antes de atingir a maturação fisiológica, que, segundo os autores, acontece quando a produção de matéria seca pelo milho atinge seu máximo. Portanto, é nesse período que o nitrogênio deve estar prontamente disponível para o milho, e uma das maneiras de se conseguir isso é a partir do manejo da adubação nitrogenada.

2.3 Imobilização do N-fertilizante no Solo

A baixa eficiência na absorção do N-fertilizante pelas culturas ocorre em função da dinâmica do nitrogênio no solo, por sua estreita ligação com a matéria orgânica e as mais variadas transformações a que está submetido, transformações estas intermediadas por microrganismos, em especial bactérias, fungos e actinomicetos. Dentro desse complexo comportamento, segundo McKenney et al. (1995), a eficiência da adubação nitrogenada dependerá da época de aplicação e dose utilizada, do desenvolvimento das culturas, da presença de palhada, do manejo do solo e da precipitação.

Apesar de cerca de 80% da atmosfera terrestre ser composta de nitrogênio gasoso (N_2), a maior parte das plantas não podem utilizá-lo diretamente, dependendo basicamente do nitrogênio contido no solo para suprir suas necessidades. De acordo com Tisdale et al. (1984), 95% do N presente no solo está em formas orgânicas, como aminoácidos livres, proteínas, celulose e principalmente ácidos húmicos e fúlvicos, e o restante se encontra em formas inorgânicas (NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- e outras).

Em termos agronômicos, o amônio (NH_4^+) e o nitrato (NO_3^-) são os compostos nitrogenados mais importantes na nutrição de plantas, originando-se da decomposição de materiais orgânicos (Raij, 1991). São essas as formas de nitrogênio absorvidas pelas culturas para serem posteriormente assimiladas como componentes de sua estrutura e que têm sua disponibilidade no solo influenciada por processos como a imobilização, a lixiviação e as perdas gasosas.

Os processos de mineralização/imobilização estão entre as transformações do nitrogênio no solo que irão determinar a sua disponibilidade às plantas. Jansson & Persson (1982) afirmaram que o processo de transformação do N a partir de componentes orgânicos para formas inorgânicas,

NH_4^+ ou NH_3 , é chamado de mineralização, e o processo inverso, ou seja, a transformação de compostos nitrogenados inorgânicos (NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- e NH_3) em componentes orgânicos, é conhecido como imobilização. Segundo os autores, a mineralização possui papel fundamental no ciclo do nitrogênio, sendo responsável pela transformação do nitrogênio orgânico contido em restos de plantas em formas inorgânicas simples, que serão utilizadas novamente por outros vegetais em seu metabolismo; e imobilização é um fator indispensável para que a mineralização ocorra, pois se não existe N orgânico, o processo de mineralização cessa.

Portanto, a imobilização e a mineralização de nitrogênio são dois processos inseparáveis na natureza, que ocorrem ao mesmo tempo, com intensidades diferentes ou não, entre um e outro, dependendo do clima, manejo do solo, rotação de culturas, etc.

É essa dinâmica e transformações que podem levar a perdas de nitrogênio no sistema solo-planta e limitar a capacidade das culturas em absorver o N do solo, seja ele nativo ou proveniente de fertilizantes. Por isso, se existiam dificuldades para melhorar a eficiência da adubação nitrogenada em plantio convencional (PC), com a introdução do SPD no Brasil e sua rápida expansão, as dúvidas sobre a melhor maneira de se fazer essa adubação, de modo tal que a imobilização e a mineralização se tornem aliadas na disponibilização de N às culturas, se acirraram.

As mudanças impostas pelo SPD no solo é que determinam estas dificuldades em se recomendar um manejo adequado para a adubação nitrogenada. Nesse sistema de manejo, observa-se uma tendência para aumento dos teores de carbono orgânico (Gonçalves & Cereta, 1999) e de nitrogênio mineral e orgânico (Gonçalves et al., 2000) no solo. A decomposição dos restos culturais torna-se mais lenta, em razão de sua não incorporação ao solo (Gassen & Gassen, 1996), e existe um maior favorecimento da atividade microbiana em

decorrência do aumento do teor de carbono e da quantidade de água armazenada no solo (Cattelan et al., 1997). Todas essas variáveis acabam conseqüentemente influenciando o comportamento do nitrogênio em solos submetidos ao SPD.

Por essa razão, começaram a surgir novas recomendações e sugestões no manejo da adubação nitrogenada, como mudanças nas épocas de aplicação do N, baseadas em conhecimentos teóricos, e até mesmo empíricos, da influência que a relação imobilização/mineralização teria na disponibilidade de nitrogênio às culturas (Ceretta & Fries, 1998), sem que medidas diretas e em campo fossem realizadas sobre o comportamento do nitrogênio no solo, em SPD.

Segundo Lara Cabezas (2001), esse empirismo é o responsável pelas discussões sem fim sobre como se deve manejar a adubação nitrogenada em SPD, com o uso, por parte da pesquisa, de metodologias inadequadas, abrindo-se mão de ferramentas como o ^{15}N , para se quantificar e traçar o destino do N-fertilizante nos processos de transformação do nitrogênio no sistema solo-planta-atmosfera.

Sá (1996) afirmou que o manejo da adubação nitrogenada no milho deve levar em consideração o tempo de implantação do SPD e a velocidade da reação mineralização/imobilização em cada região, e não apenas basear-se na cultura antecessora, como é comum ocorrer. Isso mostra que muitas vezes um manejo indicado para a Região Sul do Brasil não pode ser extrapolado para o cerrado, antes de ser testado na própria região.

No Brasil, muitos produtores têm optado por antecipar a adubação nitrogenada de cobertura para antes da semeadura do milho, de preferência após o corte ou colheita da cultura de inverno. Sá (1996) concluiu que, para a Região Sul, a melhor opção é antecipar a adubação de cobertura no milho para o período de corte ou colheita da cultura utilizada como cobertura, com o argumento de que, ao antecipar a adubação nitrogenada, haveria inicialmente a imobilização do N-fertilizante em decorrência da presença de grande quantidade de palhada

recém-adicionada no solo, especialmente de gramíneas. Conforme a palhada fosse sendo consumida, e a quantidade de carbono disponível diminuísse, a biomassa microbiana teria seu desenvolvimento limitado, e começaria a ocorrer a liberação de N para o meio, ou seja, mineralização líquida de nitrogênio no momento em que o milho iniciasse a absorção desse nutriente.

Sá (1996) mostrou que a aplicação de $90\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de nitrogênio no corte da aveia preta ou em cobertura no milho, mais $30\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N na semeadura do milho, resultaram na mesma produtividade, cerca de $8.900\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de grãos, em Carambeí, região Centro Sul do Paraná. No entanto, Basso & Ceretta (2000) verificaram que, quando ocorreu excesso de chuvas entre a aplicação antecipada do nitrogênio e a semeadura do milho, houve diminuição da quantidade de N mineral no solo e do nitrogênio absorvido pela planta, comprometendo a produtividade, se comparado com a aplicação tradicional do N em cobertura. Os autores concluíram que a utilização de N em pré-semeadura no milho é uma atitude de risco, sendo mais segura a sua aplicação em cobertura. Pauletti & Costa (2000) avaliaram que a aplicação de N em cobertura, ou logo após o corte da aveia preta, não influenciou o rendimento de grãos do milho, em três diferentes localidades do Paraná.

Aparentemente, a antecipação da adubação nitrogenada, baseada apenas nos processos de imobilização/mineralização do N, poderá levar a perdas desse nutriente no sistema solo-planta-atmosfera, ao não considerar outros processos, interações e transformações que o nitrogênio pode sofrer. Ceretta & Fries (1998) afirmaram que a aplicação da adubação nitrogenada em cobertura continua sendo o manejo preferencial, e que as épocas de aplicação devem levar em consideração o estágio fenológico do milho, e não os dias após a emergência ou semeadura.

Desvantagens em se antecipar a adubação nitrogenada também foram mostradas por Bortolini et al. (2001), que, testando diferentes épocas de

aplicação de N no milho, concluíram que a antecipação da adubação nitrogenada para o período de dessecação da aveia levou à menor produção de grãos, principalmente nas maiores doses de N, quando comparada com a aplicação convencional, em cobertura.

Esses resultados contraditórios acontecem pela complexidade dos processos e das variáveis envolvidas com a imobilização/mineralização do N, e no restante do ciclo do nitrogênio. O tipo de solo, o manejo e as condições climáticas podem influenciar a quantidade de nitrogênio imobilizado, além de todos os outros processos nos quais esse nutriente está envolvido. Portanto, diferentes regiões devem pesquisar o melhor manejo do N para suas condições específicas. Muchow (1998) afirmou que é necessário estabelecer a necessidade mínima de nitrogênio exigida pelo milho para determinada produtividade, e que as estratégias de manejo devem levar em consideração a influência dos fatores abióticos na produção de grãos, para diminuir as perdas e aumentar a eficiência da adubação nitrogenada. Isso pode ser percebido no trabalho de Tran & Giroux (1998), em que o nitrogênio imobilizado oscilou de 16% a 39% do N-fertilizante aplicado, e essas variações ocorreram em virtude dos diferentes solos e condições climáticas.

Para a região do cerrado brasileiro, a imobilização do nitrogênio seria um processo importante, em razão de se utilizar basicamente gramíneas como plantas de cobertura, uma vez que elas resistem à seca e não são influenciadas pelo fotoperíodo quando semeadas na entressafra ou inverno, o que não acontece com as leguminosas. No entanto, devido ao clima desfavorável nessa época, tem-se observado menor produção de palhada pelas plantas de cobertura cultivadas, inclusive pelas gramíneas (Landers, 1995), em relação ao Sul do Brasil, (Pavinato et al., 1994; Gonçalves & Ceretta, 1999), fator este que poderia, sozinho, impor alterações ao manejo da adubação nitrogenada no cerrado.

Lara Cabezas et al. (2000) observaram que dos 100kg.ha⁻¹ de N-uréia aplicados em cobertura (estádio de seis a oito folhas) no milho, semeado sobre restos culturais de milho, 60% foram recuperados pelas plantas e 10% ficaram imobilizados no solo, em SPD. Coelho et al. (1991) encontraram valores semelhantes para PC, em relação à eficiência da adubação nitrogenada, onde dos 60kg.ha⁻¹ de N-uréia aplicados em cobertura (milho com 7 a 8 folhas), 56% foram recuperados, no entanto verificaram maior imobilização, com 23% do N-fertilizante permanecendo no solo em formas orgânicas.

Varco et al. (1993) mostraram que a imobilização do nitrogênio na cultura do milho, proveniente da adubação verde com ervilhaca peluda (*Vicia villosa* Roth.) marcada com ¹⁵N, foi de 15% e 49% em SPD e PC, respectivamente, aos 30 dias após sua aplicação; 120 dias após a aplicação o N imobilizado era de 23% e 33% em SPD e PC, respectivamente. Quando se substituiu o N da ervilhaca por nitrato de amônio, a imobilização do N foi de 8% e 15%, para o SPD e PC, respectivamente, 30 dias após a aplicação das fontes, e 9% e 11%, 120 dias após a aplicação. Os autores concluíram que, pela associação de carbono e nitrogênio nos resíduos da ervilhaca, o N nela contido foi mais imobilizado, principalmente em PC, por causa da decomposição mais rápida de seus resíduos, quando comparado com o SPD. A imobilização do N-fertilizante foi menor em relação ao N da ervilhaca, em consequência da não aplicação de carbono nesse tratamento, o que acabou por determinar maior disponibilidade deste N às plantas.

Baker & Timmons (1994) aplicaram urânio, nas doses de 200 e 125kg.ha⁻¹ de N, de forma parcelada ou dose total, incorporado ou na superfície, na cultura do milho em SPD, e observaram que, independente da dose e forma de aplicação, aproximadamente 25% do N-urânio permaneceu imobilizado no solo durante o ciclo do milho.

Timmons & Cruse (1991) quantificaram que, dos 12 aos 48 meses, nos primeiros 15cm de profundidade, a imobilização do N no solo permaneceu constante, com o teor de ^{15}N no pool de N orgânico do solo variando de 1,39% a 1,37% e de 0,82% a 0,77% em SPD e PC, respectivamente, após a aplicação de $224\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N-uran no 1º mês de experimento. Nos quatro anos de experimento foram feitas quatro safras de milho durante a primavera. Percebe-se, pelos dados dos autores, que, em média, a quantidade de N-uran imobilizado no SPD foi duas vezes maior, quando comparada com a imobilização do N-uran em PC. Porter et al. (1996) avaliaram, em uma região semi-árida, a imobilização do nitrogênio na rotação trigo de inverno/sorgo/pousio/trigo de inverno, em SPD. Entre 24% e 28% do N-fertilizante aplicado foi encontrado em formas orgânicas e 90% do nitrogênio aplicado foi quantificado, seja no solo ou na planta. Os autores concluíram que no SPD, em locais com baixa pluviometria e cultivo intenso, o N-fertilizante é conservado em formas orgânicas pela assimilação das plantas, incorporação pela biomassa microbiana do solo e pela lenta decomposição de resíduos vegetais na superfície do solo.

Karlen et al. (1996) analisaram a imobilização do N-fertilizante a partir da aplicação de $8,4\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de ^{15}N em diversas culturas no SPD e PC. A quantidade de N-fertilizante imobilizado para as culturas de milho, trigo e algodão foi em média de 20%, 21% e 17% do total aplicado, não havendo, estatisticamente, diferenças na imobilização do nitrogênio entre SPD e PC, e mesmo para as diferentes culturas, o teor de nitrogênio imobilizado foi semelhante.

A utilização de fontes nitrogenadas em formas nítricas, amoniacais ou amídicas pode resultar em diferentes quantidades de N-fertilizante imobilizado e recuperado pela planta. Reddy & Reddy (1993) observaram que, a partir da aplicação de $100\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de nitrato de amônio no milho, em cobertura, no sistema convencional de plantio, 19,5 e $10,3\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ do N-NH_4^+ e N-NO_3^- ficaram

imobilizados no solo, respectivamente, após a colheita do milho; no entanto, a recuperação de ambos pela planta foi próxima: 24% e 29% para o N-NH_4^+ e N-NO_3^- , respectivamente, e a menor imobilização do nitrato ocorreu, segundo os autores, em virtude de sua maior tendência à lixiviação, ficando, assim, abaixo da camada do solo onde a atividade da biomassa microbiana é maior.

Puri & Ashman (1999) avaliaram a imobilização do NH_4^+ e do NO_3^- durante 12 meses e notaram que, em média, a taxa de imobilização do amônio no solo foi duas vezes maior que a do nitrato em razão da preferência da biomassa microbiana pelo amônio. No entanto, os autores afirmaram que, provavelmente, essas taxas de imobilização irão variar de acordo com o tipo de solo e a comunidade microbiana.

Francis et al. (1993) aplicaram amônio e nitrato marcados na semeadura do milho, não especificando se em SPD ou PC, e observaram que, no estágio de três folhas, cerca de 20 dias após a germinação, 2,9% e 17,8% do N-NO_3^- e N-NH_4^+ estavam imobilizados, respectivamente, nos primeiros 30cm de profundidade do solo, e 15,4% e 62,3% do N-NO_3^- e N-NH_4^+ se encontravam em formas minerais nessa mesma profundidade. Os autores ressaltaram que no ano do experimento foi necessária a aplicação de 80mm de água via irrigação logo após a semeadura do milho, levando, provavelmente, a perdas da maior parte do N-fertilizante aplicado, tanto para o nitrato quanto para o amônio, refletindo-se na recuperação do nitrogênio do fertilizante pela planta: no estágio de 8 folhas, 10,1% e 20,6% do N-NO_3^- e N-NH_4^+ , respectivamente, foram absorvidos pelo milho.

Trehan (1996) avaliou a imobilização do N por processos biológicos e químicos, ou seja, retido nos colóides do solo, e observou que 20 dias após a adição de sulfato de amônio marcado, dependendo do tipo de solo, entre 1,5% e 8,2% do N aplicado ficou retido nas argilas e entre 6% e 13% foi imobilizado no solo. O experimento foi conduzido em laboratório, sob condições controladas,

mas mostra que, além da imobilização do N em compostos orgânicos, o solo pode também reter nitrogênio quimicamente por meio de reações com os colóides do solo, o que pode levar a erros na interpretação do destino do N-fertilizante aplicado.

O solo possui, aparentemente, um teto máximo para a quantidade de nitrogênio imobilizado em médio e longo prazos, mesmo que em curto prazo ocorra um pico de imobilização do N, pela adição de restos culturais. Bjarnason (1988) observou, em estudo de laboratório, que 4 a 5 semanas após a adição do nitrogênio, o N-fertilizante imobilizado estabilizou-se em 10% do total aplicado e assim permaneceu durante o restante dos 300 dias de incubação. Recous & Machet (1999) chegaram a valores semelhantes em relação ao N-fertilizante imobilizado no solo em condições de campo. Esses autores, testando diferentes épocas de aplicação de nitrogênio no trigo, desde antes da semeadura até o florescimento, verificaram que aos 7 e 14 dias após a aplicação de cada pulso de N marcado, independentemente da época, o N imobilizado permaneceu entre 13% e 16% do total aplicado. No entanto, quanto mais próxima foi do florescimento a aplicação de N, maior a sua recuperação pelo trigo, sugerindo que aplicações antecipadas podem levar a maiores perdas de N.

Barret & Burke (2000) perceberam que a imobilização do N aumentou com a elevação de carbono orgânico no solo e na presença de plantas devido à maior quantidade de carbono lábil e à maior taxa de atividade microbiana, quando comparado com o solo nu, e concluíram que existe forte correlação entre a imobilização de nitrogênio e a mineralização de carbono.

O tipo de palhada e adubação nitrogenada utilizada também influenciam a imobilização do nitrogênio no solo, como demonstrado por Green & Blackmer (1995), que, avaliaram diferentes tipos de solos, e notaram que em todos ocorreu um período de imobilização líquida, ou seja, consumo do N mineral do solo, seguido por um período de mineralização líquida, o que significa a liberação de

nitrogênio para o meio. Os autores observaram também que a quantidade de N imobilizado nos tratamentos com resíduos de soja foi aproximadamente igual à imobilização de N nos tratamentos que utilizaram restos de milho com adição de nitrogênio.

Outro fenômeno importante foi observado por Qian et al. (1997): no estágio de maturação do milho, 15% da biomassa microbiana era derivada do carbono liberado pelo sistema radicular da planta, o que levou a um aumento das transformações do N no solo, mais especificamente os processos de mineralização/imobilização e as perdas gasosas de N por denitrificação. Além disso, os autores afirmaram que, na presença do milho, 67% mais de N mineral foi imobilizado, mesmo com a competição das plantas por esse nitrogênio, quando comparado com o tratamento em que não houve semeadura de nenhuma planta. Esses dados mostram a complexidade do estudo e manejo do nitrogênio, por sua estreita ligação com fatores bióticos e abióticos no sistema solo-planta-atmosfera, e indicam a quantidade de variáveis que muitas vezes devem ser analisadas para se tentar recomendar o manejo mais adequado dessa adubação.

Além de ser um depósito de nitrogênio, o solo funciona como fornecedor desse nutriente ao milho, por meio das transformações que o N nele sofre, mediante a ação de microrganismos sobre os substratos orgânicos, sendo mais importante até mesmo do que a própria adubação nitrogenada em fornecê-lo às plantas. Lara Cabezas et al. (2000) determinaram que, dos $159\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N total do milho, $59\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (37%) foram provenientes do N-uréia aplicado e o restante era N nativo do solo. Reddy & Reddy (1993) observaram que o milho absorveu de 3 a 6 vezes mais nitrogênio nativo do solo do que N proveniente do fertilizante, indicando a ocorrência de processos de mineralização/imobilização intensos.

Para que o solo possa estocar nitrogênio e liberá-lo às plantas é necessário que haja o processo de imobilização. Assim, a transformação do

nitrogênio em compostos orgânicos pode ser vista também como um fenômeno benéfico à fertilidade do solo e à produtividade das culturas, se é justamente esse processo o responsável por acumular N e fornecê-lo em grandes quantidades às plantas.

Wild (1988), analisando os dados referentes ao acúmulo de carbono durante 100 anos, em um solo mantido sem nenhum tipo de cultivo ou adição artificial de nutrientes, após anos de uso do PC, e com a recuperação natural de sua vegetação, notou que a quantidade de carbono nos primeiros 0,23m do solo passou de $25.000\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ para cerca de $70.000\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ nesse período. No entanto, a relação C/N manteve-se praticamente igual a 10, o mesmo acontecendo com a relação C/S, que permaneceu por volta de 65. Já a relação C/P dobrou, passando de 35 para 60. Isso mostra que o N que entrou nesse sistema por via biológica ou atmosférica acumulou-se, ou seja, foi imobilizado, estando esta estocagem diretamente relacionada com o acúmulo de carbono no solo. Assim, solos pobres em matéria orgânica terão menos capacidade de imobilizar nitrogênio, fazendo com este esteja mais sujeito aos processos de lixiviação e denitrificação, diminuindo sua recuperação pelas plantas.

Jokela & Randall (1997) verificaram que até 14,8% e 3,4% do N-fertilizante aplicado foi recuperado pelo milho no segundo e terceiro ano após sua aplicação, respectivamente, em razão do nitrogênio fertilizante imobilizado e liberado nos cultivos posteriores à sua aplicação. Karlen et al. (1996) observaram que a recuperação do N-fertilizante pelas culturas de milho, trigo e algodão variou de 20% a 34% do total aplicado, enquanto 20% permaneceram imobilizados no solo e o restante, cerca de 50%, saiu do sistema. De acordo com os dados obtidos por esses autores, percebe-se que quanto menor o teor de carbono dos solos, menor a quantidade de N-fertilizante imobilizado, e que se não foi recuperado pelas culturas, foi perdido para o meio.

Porter et al. (1996), por sua vez, verificaram que, após quatro anos de experimento, 90% do N-fertilizante aplicado foi encontrado nas plantas cultivadas nesse período ou no solo e 10% foram perdidos para o meio. É interessante notar que o experimento foi instalado em uma região semi-árida e conduzido em SPD para aumentar a disponibilidade de água para as culturas, e que baixas precipitações diminuem eventuais perdas por lixiviação, além da denitrificação, pois provavelmente não existe água suficiente no solo para que ocorra falta de oxigênio, assim como o manejo de solo adotado tende a aumentar os teores de carbono no solo. Dessa forma, obtiveram-se as condições ideais para a conservação do nitrogênio proveniente do fertilizante no solo, disponível para as culturas por um longo prazo, seja pela imobilização de nitrogênio ou pela diminuição dos processos de perdas.

Timmons & Cruse (1991) mediram a quantidade do N-fertilizante marcado residual no solo, dos 12 até os 54 meses após a sua aplicação, e mostraram que, em SPD, um sistema que conserva e aumenta os teores de matéria orgânica do solo, a quantidade de nitrogênio residual proveniente do fertilizante foi duas a dez vezes maior, dependendo da profundidade e época de amostragem, quando comparado ao N aplicado em plantio convencional, um manejo que queima e diminui a quantidade de matéria orgânica do solo.

2.4 Lixiviação de Nitrogênio

A lixiviação de nitrogênio consiste na movimentação desse nutriente com a água para regiões em que o sistema radicular das culturas não pode alcançar ou para o lençol freático, causando a sua contaminação. Essas perdas ocorrem principalmente com o íon nitrato (NO_3^-) por sua mobilidade com o fluxo de água no solo (Legg & Meisinger, 1982). O nitrato, por possuir carga negativa, não é adsorvido pelos colóides, e sim repellido, quando os solos são

eletronegativos, como ocorre na maior parte do cerrado brasileiro, o que pode favorecer a lixiviação. De acordo com Brady (1989), a quantidade de nitrogênio lixiviado é menor em regiões com baixa pluviosidade e sem uso de irrigação, enquanto essas perdas são favorecidas em solos arenosos, e em locais com alta pluviosidade e que utilizam grandes quantidades de adubação nitrogenada.

A quantidade de nitrogênio lixiviado poderá variar com o tipo de cobertura vegetal, a quantidade de chuvas, a dose de N utilizada (Stevenson & Neilsen, 1990), entre outros fatores, razões pelas quais as quantidades de N perdidas pelo fluxo de água no solo podem ser significativas ou não, dentro de um determinado manejo.

Owens et al. (1995) utilizaram lisímetros com 2,4m de profundidade e verificaram que entre 28% e 42% do N aplicado no milho ($224\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N na forma de nitrato de amônio) foi recuperado na água de drenagem da cultura durante três anos de amostragens.

Baker & Timmons (1994), também utilizando lisímetros com 1,37m de profundidade e ^{15}N , observaram que a lixiviação de nitrogênio aplicado na forma de uran com diferentes doses de N (125 ou $200\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) foi sempre inferior a 3,4% do total, seja aplicado na superfície ou incorporado, em três anos de avaliação. Os autores mostraram que cerca de 23% do N-fertilizante aplicado em qualquer um dos tratamentos permaneceu imobilizado no solo, e entre 36% e 44% foi exportado nos grãos, não tendo sido medida a recuperação no restante da planta. Se for considerado que a quantidade de N-fertilizante recuperado pela parte aérea e raízes do milho é semelhante à recuperada pelos grãos (Lara Cabezas et al., 2000), a recuperação de N pelo milho variou entre 72% e 88%. A soma desses valores de recuperação do N mais o que permaneceu imobilizado no solo deixaram muito pouco N-fertilizante para ser lixiviado, justificando-se os valores tão baixos de percolação de N.

Stevenson & Neilsen (1990) avaliaram, durante nove anos, a lixiviação de nitrogênio em lisímetros na cultura da maçã, e observaram que naqueles em que o solo se encontrava descoberto, a lixiviação de N variou de 88% a 115% do nitrogênio aplicado (com elevado grau de erro, visto que em alguns casos a quantidade de N lixiviado foi maior que a aplicada), e nos tratamentos com gramíneas como plantas de cobertura, de 40% a 45% do N-fertilizante aplicado foi lixiviado. Essa menor lixiviação ocorreu em razão, provavelmente, da recuperação do nitrogênio pelas gramíneas e o estímulo, via sistema radicular, que essas plantas forneceram para a imobilização do N. Os autores estudaram também a influência das doses de N e da quantidade de chuvas na lixiviação de nitrogênio, mas os dados foram tão díspares que não permitiram chegar a uma conclusão sobre a influência desses parâmetros na lixiviação de nitrogênio nesse experimento.

A metodologia empregada também é um fator que pode levar a resultados contraditórios e difíceis de serem explicados, como uma consequência das dificuldades impostas em se avaliar em profundidade, no solo intacto, a quantidade de N lixiviado em um grande volume de terra.

Na cultura do feijoeiro, Meirelles et al. (1980) verificaram que, dos $100\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N aplicados na forma de sulfato de amônio, apenas $0,9\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ do N-fertilizante foi lixiviado até 1,2m de profundidade ao final do ciclo da cultura, apesar de a planta ter recuperado apenas 30% do N-fertilizante. Essa baixa lixiviação pode ser creditada à metodologia empregada: analisou-se a quantidade de N marcado na solução do solo pontualmente a 1,2m de profundidade, coletada com uma cápsula de apenas 1,28cm de raio, o que poderia levar a grandes margens de erros em virtude de a percolação e distribuição da água ser muito variável no solo. Reichardt et al. (1979) utilizaram metodologia semelhante e avaliaram, em um solo com 68% de areia, que dos $80\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ do nitrogênio do sulfato de amônio aplicados no milho $0,4\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ foram lixiviados

até 1,2m de profundidade, e as plantas recuperaram 81,9% do N-fertilizante. Os autores utilizaram o marcador com apenas 1,201% de abundância de ^{15}N , o que o levou a diluir-se muito rápido no solo, permitindo amostragens apenas até os 14 dias após a sua aplicação, antes que a quantidade em excesso de ^{15}N do adubo se igualasse à abundância natural de ^{15}N no solo (0,366%), impedindo qualquer quantificação posterior. Assim, este período de 14 dias poderia não ter sido suficiente para que o N-fertilizante atingisse as cápsulas de coleta da solução do solo em profundidade.

Na cultura da batata, Errebhi et al. (1998) verificaram que, em anos de chuva intensa, foram recuperados na água coletada a 1,4m de profundidade entre 100 e 270kg.ha⁻¹ de N-nitrato (do solo e do fertilizante) durante o ciclo da batata, e quando a chuva foi menos intensa, a quantidade de nitrato lixiviado variou entre 71 e 96kg.ha⁻¹, com a aplicação parcelada, em ambos os anos, de 270kg.ha⁻¹ de N na forma de nitrato de amônio.

2.5 Perdas Gasosas de Nitrogênio no Solo

Segundo Lapedes (1978), a denitrificação consiste na redução do nitrato ou do nitrito nos gases nitrogênio elementar, óxido nitroso e óxido nítrico, a partir de reações intermediadas por bactérias presentes no solo. Ao ocorrer essa redução, tais gases se perdem para a atmosfera, ficando o N indisponível para as culturas. Esse fenômeno acontece em solos com excesso de água, onde o nitrogênio está indisponível, levando alguns microrganismos a obterem oxigênio a partir da redução do nitrato e nitrito (Tisdale et al., 1984).

A denitrificação é o principal processo biológico pelo qual o nitrogênio orgânico e o mineral do solo retornam para a atmosfera. Porém, é um dos processos do ciclo do nitrogênio menos entendidos (Firestone, 1982).

Existem ainda outras formas de perdas gasosas de nitrogênio no solo, como a volatilização de amônia, e reações envolvendo o nitrito, o nitrato e a hidroxilamina. Estas três últimas reações são pouco conhecidas e aparentemente acontecem em situações específicas (Nelson, 1982), enquanto a volatilização do gás amônia (NH_3) é um fenômeno mais estudado e compreendido, e pode se tornar um importante processo de perda de nitrogênio quando se utiliza como fonte de N a uréia. Manejadas corretamente, no entanto, as perdas de N da uréia via volatilização podem ser substancialmente diminuídas (Lara Cabezas et al., 1997 a,b).

Muitos trabalhos que têm por objetivo o estudo da denitrificação desconsideram a volatilização de amônia, enquanto outros autores utilizam o termo “perdas gasosas”, que engloba a denitrificação, volatilização e outras perdas de nitrogênio via gases, caso estas ocorram.

As perdas gasosas de N-fertilizante podem variar bastante de acordo com o clima, o solo, a cultura, o manejo da adubação nitrogenada e outros. Kowalenko (1978) mostrou que a denitrificação é mais intensa sob altas temperaturas, mesmo em solos com baixa umidade, quando comparada com as perdas que ocorrem em solos submetidos a baixas temperaturas e umidade elevada. De acordo com o autor, baixas temperaturas limitam a denitrificação, mesmo quando o solo possui excesso de água, enquanto nos solos submetidos a temperaturas mais elevadas e com pouca água, a denitrificação acontece de forma lenta, porém contínua, nos microambientes anaeróbios desses solos formados pelos microagregados, e de forma rápida e com elevadas taxas de perdas de N gasoso, imediatamente após chuvas intensas.

Estudando dois solos da Amazônia em casa de vegetação, com o uso do “rye-grass” da Itália (*Lolium multiflorum* L.) como planta de teste, Alfaia (1997b) verificou que as perdas gasosas foram semelhantes em ambos, quando se aplicou uréia: 16,7% e 14,8% para o Latossolo Amarelo (LA) e Podzólico

Vermelho-Amarelo (PV), respectivamente, com a aplicação do equivalente a $60\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N. Quando se aplicou a mesma dose de N como sulfato de amônio, as perdas foram maiores: 38,2% e 43,5% para o LA e o PV, respectivamente. A autora atribui as perdas gasosas menores ao uso da uréia como fonte de N, por causa de sua lenta hidrólise, o que favoreceu sua recuperação pela planta e imobilização no solo.

Na cultura de milho irrigado, utilizando nitrogênio marcado, Normand et al. (1997) observaram, em três diferentes anos, que a recuperação do N-fertilizante variou entre 64,6% e 66%, enquanto as perdas gasosas foram estimadas entre 3% e 16% do nitrogênio aplicado. Kowalenko & Cameron (1978) observaram que, dependendo do ano, as perdas por desnitrificação durante o ciclo da cultura da cevada podiam variar de 31% e 46% com a aplicação de $150\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N, na forma de sulfato de amônio.

Para a cultura do trigo, Ladd & Amato (1986) testaram a uréia, o amônio, o nitrato e a adubação verde (*Medicago littoralis*) como fontes de nitrogênio, em diferentes doses, e observaram que de 78% a 84% do N aplicado, dependendo do tratamento, foi recuperado pela cultura ou estava no solo um ano após sua aplicação, e que entre 16% e 22% do nitrogênio proveniente do fertilizante não foi encontrado, tendo sido provavelmente perdido por via gasosa.

2.6 Importância do Enxofre na Eficiência da Adubação Nitrogenada

Assim como o nitrogênio, o enxofre está fortemente ligado à matéria orgânica do solo e submetido aos processos de imobilização/mineralização pelos microrganismos do solo (Stevenson & Cole, 1999). Entretanto, a maior parte dessas transformações por que passa o S permanecem pouco pesquisadas e explicadas (Wu et al., 1995).

De acordo com Marschner (1997), o enxofre é constituinte dos aminoácidos cistina e metionina e conseqüentemente de proteínas e enzimas, além da ferredoxina (molécula transportadora de elétrons que tem papel fundamental na assimilação de nitrogênio pelas plantas). Se existe, portanto, deficiência de enxofre no solo e, por conseguinte, na planta, a assimilação e a formação de compostos nitrogenados serão comprometidas.

O nitrato move-se facilmente pelo xilema e pode ser estocado nos vacúolos das raízes, parte aérea e outros órgãos de armazenagem, enquanto o amônio, por ser tóxico, mesmo em baixas concentrações, precisa ser rapidamente transformado em amônia no próprio sistema radicular, logo após ser absorvido, e assimilado em aminoácidos e amidas (Marschner, 1997), para poder ser transportado e não causar injúrias às plantas.

Portanto, se ocorrer deficiência de enxofre na planta, mesmo que haja nitrogênio disponível no solo e que a planta o absorva, ele poderá não ser assimilado, podendo ou ser acumulado nos tecidos vegetais, no caso do nitrato, ou, no caso do amônio, causar toxidez à cultura.

Chapman (1997) observou que a deficiência de enxofre no solo pode diminuir a biomassa microbiana, principalmente após a adição de resíduos vegetais. Estes resíduos podem levar à imobilização o pouco de enxofre mineral disponível no solo. Assim, mesmo com a adição de nitrogênio, a falta de S pode impedir o crescimento microbiano e, portanto, diminuir a taxa de decomposição da palhada e mesmo da matéria orgânica do solo, que por sua vez liberará menos N e outros nutrientes às culturas. Por isso, níveis adequados de enxofre são fundamentais para que haja melhor aproveitamento da adubação nitrogenada.

2.7 Uso de Culturas de Cobertura do Solo

O SPD permite que se faça um cultivo a mais no ano durante o período conhecido no cerrado brasileiro como inverno, que corresponde ao intervalo de março/abril a setembro/outubro e caracteriza-se pelas temperaturas amenas, geadas ocasionais e pluviosidade muito baixa. Este cultivo de inverno é importante, além de economicamente viável em algumas situações, para a produção de palhada de cobertura do solo e para a introdução de novas culturas na rotação que não sejam milho e soja, o que contribui para a quebra do ciclo de pragas, doenças e plantas daninhas e disponibiliza e recicla maiores quantidades de nutrientes (Spehar & Lara Cabezas, 2000).

No entanto, durante o inverno, no cerrado, existem restrições ao cultivo de grande parte das culturas comerciais, em especial leguminosas, em razão do déficit hídrico observado. Segundo Assad (1995), em 10 anos de observações, no período de abril a setembro, a pluviosidade acumulada foi de 240mm com distribuição irregular de chuvas; enquanto no verão (outubro a março), a pluviosidade atingiu 1.400mm. Para a Região Sul do país, as condições do inverno permitem a utilização de um grande número de plantas, das mais variadas famílias, com uma elevada produção de matéria seca, como mostrado por Pavinato et al. (1994).

Para o cerrado, Landers (1995) indicou o uso apenas de sorgo, trigo, feijão guandu, aveia preta e gramíneas forrageiras, para semeaduras feitas entre 1º e 15 de março; caso a semeadura das culturas de inverno atrasassem, sendo feitas até 15 de abril, as opções se restringiriam ao milheto, sorgo e aveia preta em uma situação de maior risco e menor produção de palhada e/ou grãos.

Existe, assim, a necessidade de se desenvolver e introduzir novas plantas para semeadura no inverno em SPD no cerrado, o que levou Spehar & Lara Cabezas (2000) a testarem 18 espécies de plantas no inverno, na região do

Triângulo Mineiro: 141 dias após a semeadura, nove obtiveram produção de matéria seca inferior a $2.500\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, destacando-se a quinoa, nabo forrageiro, níger e *Crotalaria ochroleuca*, como não-gramíneas com potencial de uso no cerrado. O sorgo Irati produziu no mesmo período $3.100\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de matéria seca, enquanto o sorgo preto produziu entre 5.000 e $6.900\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de matéria seca, dependendo da cultivar. Ou seja, são culturas com elevado potencial de produção de palhada de cobertura no solo, porém com disponibilidade de sementes ainda restrita.

Outra cultura que tem se destacado é a aveia preta (*Avena strigosa* Schieb) por ser uma planta bem adaptada ao clima do inverno na região do cerrado. Spehar & Lara Cabezas (2000) registraram a produção de $1.700\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de matéria seca no inverno na região do Triângulo Mineiro. Rosseto & Nakagawa (2001) observaram, no Estado de São Paulo, que a aveia atingiu em média $1,5\text{m}$ de altura, considerado pelos autores um crescimento normal, obtido apenas em razão das chuvas ocorridas nos primeiros 20 dias após a semeadura da cultura, dado o déficit hídrico ocorrido no restante do seu ciclo, mostrando sua capacidade de se desenvolver em condições de falta de água. Barradas et al. (2001) analisaram 13 espécies de plantas de cobertura e destacaram quatro, entre as quais a aveia preta, pela produção de matéria seca e acúmulo de nitrogênio, na região serrana fluminense.

De acordo com Floss (2000a), a inclusão da aveia no SPD proporciona a redução da incidência de algumas pragas e doenças, controla uma série de plantas daninhas por alelopatia, além de poder ser utilizada como forragem e planta de cobertura. Fernandes & Heckler (2000) mostraram que a menor produtividade apresentada pela soja aconteceu após seu cultivo em sucessão ao milho safrinha, em consequência da infestação por *Meloidogyne javanica*, o que não ocorreu nas sucessões trigo/soja, nabo forrageiro/soja e aveia preta/soja, indicando-as como culturas que podem ser utilizadas no controle dessa doença.

Bortoluzzi & Eltz (2001) concluíram que a presença de palhada de aveia preta diminuiu em cerca de três vezes a quantidade de plantas daninhas (em peso), quando comparado com o tratamento sem restos culturais de aveia preta.

Wisniewski & Holtz (1997) observaram, no Paraná, que a palhada de aveia preta, após o seu corte (quando os grãos da aveia estavam no estágio leitoso), apresentou uma relação C/N de 27 na semeadura da soja, 19 dias depois de seu corte. Quando a soja atingiu o estágio de enchimento de grãos, 187 dias após o corte da aveia, a relação C/N da palhada de aveia preta era de 20, com perda de 71% de sua matéria seca, liberando $72\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N nesse período. Pavinato et al. (1994) quantificaram a presença de $11\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N por tonelada de palhada de aveia preta na Região Sul do Brasil, a mesma quantidade encontrada por Heinrichs & Fancelli (1999).

Pavinato et al. (1994) concluíram que a produtividade do milho está relacionada com a absorção de N pelas espécies de inverno. Por isso, quando a aveia preta foi a cultura antecessora, o milho apresentou o menor rendimento de grãos, $2.925\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, inferior inclusive ao pousio, $3.225\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, devido à elevada relação C/N da palhada de aveia preta, que restringiu a disponibilidade de N para o milho, pela imobilização do nitrogênio. Bayer et al. (1998) obtiveram resultados semelhantes, em SPD, em que para uma produção de $4.200\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de matéria seca de aveia preta, com relação C/N 36, o milho semeado sobre esta palhada, sem adição de N, produziu $1.460\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, e quando se aplicou $120\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N em cobertura, o rendimento de grãos no milho foi de $4.230\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. Em relação à soja, Santos (1991) não observou quaisquer restrições no seu cultivo após aveia preta, embora, em alguns sistemas de rotação, a inclusão da aveia antes da soja fez diminuir a estatura das plantas.

Além disso, a aveia preta pode ser utilizada para pastejo no inverno, como mostrado por Salton (2000), em que a cultura manteve 3 cabeças de gado por hectare por 60 dias, com um ganho médio de $81\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de carne. É também

uma alternativa para utilização no pastejo rotacionado, evitando a compactação dos solos com o uso de pastejos temporários (Floss, 2000b).

Todos esses fatores mostram o potencial de uso da aveia preta e de outras plantas no período de entressafra na região do cerrado, de maneira que aumenta o rendimento do produto e melhora os atributos físicos, químicos e biológicos do solo.

2.8 Uso de Traçadores na Pesquisa do Nitrogênio no Solo e na Planta

No solo e na planta, para efeito de pesquisa, o nitrogênio é separado em compartimentos ou “pools”, que são um grupo de moléculas ou componentes com funções e/ou comportamentos semelhantes. De acordo com Barraclough (1991), “pool” é uma fração do nitrogênio distinguível por meio de uma determinação química específica e têm-se como exemplos o “pool” de nitrogênio orgânico, o “pool” de N amoniacal, o “pool” de nitrogênio mineral e outros.

Uma das maneiras de se entender as transformações do N no solo e na planta é quantificando o balanço líquido dessas transformações entre dois “pools” indiretamente. Por exemplo: a determinação do N mineral no solo mostra em dado momento a quantidade aparente de N disponível para a planta (NH_4^+ e NO_3^-), como resultado líquido da quantidade de N imobilizado subtraída do N mineralizado. A grande deficiência destas metodologias, que usam medidas indiretas no estudo do nitrogênio, é não traçar e acompanhar o destino do nitrogênio quando este passa de um “pool” para outro. Voltando-se ao exemplo anterior: caso tanto a imobilização quanto a mineralização do N no solo possuam elevada velocidade de transformação, a quantidade líquida de N mineral encontrada no solo será pequena; no entanto, como a mineralização é

intensa, assim como a imobilização, potencialmente a quantidade de N mineral disponível às culturas pode ser muito maior que o N mineral quantificado.

Para acompanhar o destino do nitrogênio entre os vários “pools” de N, utilizam-se marcadores ou traçadores, que são compostos que seguem ou traçam o destino de determinado componente em um sistema complexo (Barraclough, 1995). Especificamente no caso do nitrogênio, usa-se principalmente ^{15}N , um isótopo estável que ocorre na natureza, na concentração de 0,366%, em média (Rennie et al., 1976).

De acordo com Stevenson & Cole (1999), o ^{15}N pode ser utilizado na determinação do balanço entre os diferentes “pools” de N, na medição da quantidade de N-fertilizante e N-nativo do solo absorvido pelas plantas, no destino do nitrogênio residual no solo, nas perdas de N por lixiviação e denitrificação, na fixação biológica de N, na fixação do N pelas argilas e no uso relativo de amônio e nitrato por microrganismos e plantas superiores. Os autores mostraram, porém, que algumas pressuposições devem ser consideradas no uso de ^{15}N : a composição isotópica natural dos solos é constante; os organismos vivos não discriminam entre a absorção de ^{15}N ou ^{14}N e as reações químicas e físicas para ambos são idênticas e constantes com o passar do tempo.

Boddey et al. (1993) afirmaram que a determinação da quantidade de N-fertilizante absorvido pelas plantas com o uso de ^{15}N é uma das técnicas mais utilizadas, tendo como vantagens a sensibilidade e a precisão quando comparada com outras metodologias, mas para usá-la deve-se ter compreensão das suposições e princípios na instalação e interpretação desses experimentos. Os autores esclareceram que as técnicas tradicionais para se quantificar a absorção do N-fertilizante pelas plantas se baseiam na comparação da quantidade de nitrogênio acumulada na cultura sem adubação, com a quantidade acumulada no tratamento em que se aplicou N, e a diferença é considerada como sendo a quantidade de N-fertilizante absorvido pela planta. Com o uso de ^{15}N , no

entanto, consegue-se distinguir o nitrogênio proveniente do fertilizante daquele oriundo como N nativo do solo, assim a determinação da presença de N marcado na planta ou no solo permite medir, de forma direta, as quantidades de N-fertilizante recuperado pela cultura, imobilizado pela biomassa, denitrificado, etc.

Para a quantificação do nitrogênio do fertilizante, seja aquele presente no solo, na planta ou em qualquer outro “pool” de interesse da pesquisa, utiliza-se, em geral, a seguinte fórmula:

$$(\%) N_{ppf} = ((A - B) / (C - B)) \times 100 \quad (1)$$

Em que: N_{ppf} é a porcentagem de N do fertilizante presente na planta, no solo, no “pool” de nitrogênio mineral, ou outro qualquer de interesse, em relação ao teor total de N desses “pools”; A é a abundância de átomos de ^{15}N presente na amostra de solo analisada; B é a abundância natural de ^{15}N do solo (0,366%) e C é a abundância natural de ^{15}N da fonte nitrogenada utilizada.

O uso de ^{15}N e da fórmula 1 permite determinar e quantificar o destino do nitrogênio do fertilizante entre diferentes “pools”, em experimentos de campo ou de laboratório, com uma gama de variações, de acordo com o interesse da pesquisa. Ladd & Amato (1986), utilizando uma leguminosa (*Medicago littoralis*), uréia, sulfato de amônio e nitrato de potássio, determinaram o destino do nitrogênio dessas fontes em campo, em solo cultivado com trigo. As quantidades das fontes e da leguminosa a serem adicionadas ao solo foram determinadas a partir de seu teor de nitrogênio. As fontes com nitrogênio marcado foram aplicadas em microparcelas, no campo, que consistiam em cilindros de aço com 0,3m de diâmetro e 0,9m de profundidade. Aplicou-se nestes cilindros a dose de fertilizante marcado de cada fonte, equivalente à $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, imediatamente antes da semeadura do trigo. Foram deixadas 16 plantas

de trigo em cada cilindro e mediu-se a quantidade de nitrogênio do fertilizante presente nas formas mineral e orgânica (imobilizado) em diferentes camadas de solo do cilindro, além do N-fertilizante recuperado pela planta, em diferentes intervalos de tempo.

Crozier et al. (1998) quantificaram, na cultura do milho, a recuperação do N do fertilizante pela planta e o nitrogênio do fertilizante no “pool” inorgânico e no “pool” orgânico, a partir da aplicação de *Trifolium incarnatum* (trevo vermelho) e nitrato de amônio (em que ou o nitrato ou o amônio estavam marcados, para determinar o destino de um ou de outro no sistema). As fontes foram aplicadas em microparcelas, no campo, constituídas por caixas de aço, com 2m de comprimento, por 1m de largura e 0,2m de altura, inseridas 0,15m no solo. As caixas de aço foram posicionadas seguindo-se a linha de semeadura do milho, em que foram semeadas 12 sementes por metro (uma linha em cada caixa). As fontes foram aplicadas logo após a semeadura do milho, sendo coletadas amostras de planta e de solo ao longo do ciclo dessa cultura. Como nesse experimento aplicou-se amônio ou nitrato marcados, separadamente, nas microparcelas, os autores conseguiram determinar o comportamento e o destino, no solo e na planta, de cada uma destas fontes minerais.

Francis et al. (1993) quantificaram a recuperação pela planta e o grau de imobilização do nitrato e do amônio pela biomassa microbiana, com a aplicação de nitrato de amônio dissolvido em água, junto com a adubação líquida utilizada no milho. O nitrogênio marcado foi aplicado no campo, no meio das entrelinhas, em microparcelas abertas, com 3,6m de comprimento e quatro linhas de milho (0,76m entre linhas). As amostras de planta e solo foram coletadas quando o milho possuía 3 e 8 folhas. A imobilização do nitrato e do amônio do fertilizante pela biomassa microbiana do solo foi medida pelo método de fumigação-incubação e enriquecimento com ^{15}N .

Green & Blackmer (1995) avaliaram a imobilização e a mineralização do nitrogênio influenciado por diferentes manejos e tipos de palhada. Os autores coletaram amostras de solo na camada superficial (0-30cm de profundidade) em cinco diferentes locais, onde foi cultivado milho após milho ou milho após soja, e aplicaram-se, no milho, diferentes doses de nitrogênio não marcado. As amostras de solo foram peneiradas, adicionando-se nitrato de potássio marcado e diferentes resíduos de plantas, e incubadas em laboratório, por até 42 semanas, a 24°C, em recipientes plásticos. Os autores quantificaram, então, ao longo desse período, o nitrogênio imobilizado e mineralizado por esses solos, submetido previamente a diferentes manejos.

Lara Cabezas et al. (2000) descreveram os passos para se fazer um balanço do destino do nitrogênio do fertilizante, ou seja, quanto do N aplicado está em formas orgânicas (imobilizado) e minerais no solo, quanto foi recuperado pela planta e quanto foi lixiviado. A diferença entre a quantidade do N-fertilizante aplicado e o determinado nesses “pools” pode ser considerada perdida, geralmente por via gasosa. Essa é uma das maneiras para entender o comportamento do N-fertilizante no solo e qual o seu destino dentro de um determinado manejo, solo e clima.

Kitur et al. (1984), Bigeriego et al. (1979) e Olson (1980), em experimentos com metodologias semelhantes, também obtiveram um balanço da adubação nitrogenada, demonstrando como quantificar o nitrogênio fertilizante recuperado pela cultura e o que permanece no solo.

Varvel & Peterson (1990) e Jokela & Randall (1997) afirmaram que experimentos que utilizam ^{15}N devem ser desenvolvidos de maneira tal, que consigam traçar o destino do N por todos os caminhos possíveis (imobilização, denitrificação, volatilização e lixiviação), simultaneamente, obtendo-se assim uma "radiografia" completa das transformações do N, pois a medida de apenas um parâmetro pode induzir a erros na quantificação e interpretação dos dados.

Libardi (1984) quantificou o balanço da adubação nitrogenada nas culturas do feijão e do milho com o uso de ^{15}N , utilizando extratores de solução do solo para medir a lixiviação do N-fertilizante em diferentes profundidades, até os 2,25m, sem que houvesse a necessidade de extrair e analisar grandes quantidades de solo. Esses extratores de solução do solo funcionaram apenas no primeiro ano do experimento, não sendo explicado, no trabalho, o motivo pelo qual os equipamentos não funcionaram adequadamente nos anos posteriores. Além disso, o autor fez uso, também, de extratores de ar para medir perdas gasosas do nitrogênio do fertilizante marcado até os 0,2m de profundidade.

Normand et al. (1997) utilizaram a amostragem de solo e plantas, tratados com ^{15}N , mais o que os autores chamaram de “método tensio-neutrônico acoplado a copos de sucção”, que avalia a lixiviação do nitrogênio do fertilizante marcado em profundidade pela solução do solo, sem o perturbar. Os autores mostraram que os métodos são equivalentes, e usados juntos, podem se complementar.

Para medir as perdas gasosas de N-fertilizante, dois métodos bastante utilizados são os por diferença e medições diretas. No método por diferença, com o uso de nitrogênio marcado (^{15}N), quantifica-se o N-fertilizante orgânico e mineral no solo e o recuperado pela planta. A diferença entre o total de N-fertilizante aplicado e o encontrado nestes três “pools” indicam, indiretamente, o N-fertilizante perdido, provavelmente por via gasosa. Coelho et al. (1991) e Lara Cabezas et al. (2000) descreveram detalhadamente a maneira de se efetuar esse balanço. O método tem a restrição de não indicar se as perdas gasosas foram por desnitrificação, volatilização ou outra perda gasosa qualquer, que for do interesse do estudo, além de acumular os erros inerentes às quantificações dos parâmetros necessários para se fazer esse balanço do nitrogênio no solo.

Rolston et al. (1976) propuseram a medição do nitrogênio denitrificado pelo fluxo dos gases óxido nitroso e nitrogênio elementar com a realização de uma medição direta em campo e em laboratório, pelos gases liberados na superfície do solo após a aplicação de nitrogênio marcado, e coletados em equipamento específico para este fim. Os autores compararam, então, os dados obtidos pelo método direto com a medição dos gases liberados com o método da diferença, e verificaram que, em laboratório, as metodologias eram equivalentes, mas em campo, o método direto foi menos preciso. Isso ocorreu em razão da variabilidade espacial na difusão dos gases no solo em detrimento da pequena área abrangida pelos coletores de gases e a possível concentração desses gases na subsuperfície do solo, sem que haja a sua liberação para a atmosfera durante o período de condução do experimento.

O nitrogênio marcado também pode ser utilizado para medir taxas como a de mineralização e nitrificação do nitrogênio do solo. Barraclough (1995) fez algumas ressalvas em experimentos desse tipo: ao se adicionar o marcador a um “pool” de nitrogênio, não necessariamente o ^{15}N seguirá uma única rota, mesmo porque elas podem ser muitas, entre os diferentes “pools” de N, por isso para se evitar complicações na interpretação destas pesquisas com ^{15}N , é fundamental a instalação de experimentos que permitam avaliar as transformações do nitrogênio entre dois “pools” de N de cada vez. O autor cita como exemplo o estudo do processo de mineralização, no qual apenas o pool de N amoniacal é marcado, assim a taxa na qual a abundância de ^{15}N diminui no “pool” de N amoniacal com o tempo é função direta da quantidade de N mineral nativo que entra neste pool e em sua saída por outros processos.

Além disso, a marcação com ^{15}N permite uma série de quantificações ao tornar possível diferenciar o nitrogênio nativo do solo daquele adicionado artificialmente. Frey et al. (2000) avaliaram, com a aplicação de ^{15}N , a capacidade dos fungos e suas hifas em translocar nitrogênio de camadas mais

profundas do solo para decompor a palhada que se encontra na superfície. Samater et al. (1998), com o uso de $K^{15}NO_2$ e $K^{15}NO_3$, observaram a influência do nitrito no solo sobre a produção de biomassa, imobilização e recuperação de N na cultura do milho. Wolf & Russow (2000) estudaram os diferentes caminhos para a formação dos óxidos nítrico e nitroso e de nitrogênio elementar no solo, utilizando amônio, nitrato e nitrito marcados. Todos esses trabalhos mostram o potencial de uso que o ^{15}N pode ter na pesquisa, para se tentar entender melhor as transformações do nitrogênio no ambiente.

MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização do Experimento

O experimento foi instalado na Fazenda Floresta do Lobo, pertencente à empresa Pinusplan Reflorestamento Ltda., localizada na Rodovia BR - 050, km 93, no Município de Uberlândia, MG. A área experimental encontra-se situada geograficamente na latitude 18°55' sul e longitude 48°17' oeste, numa altitude de 873 metros em relação ao nível do mar, com clima tipo Cwa (Köeppen), inverno seco e verão chuvoso, com temperatura média do mês mais frio e do mais quente de 18° C e 22° C, respectivamente. A precipitação média anual é de 1.600mm.

A semeadura e o manejo das culturas do experimento foram feitos utilizando-se os equipamentos e insumos da propriedade, de maneira tal que os resultados fossem os mais próximos possíveis da realidade do agricultor.

3.2 Características do solo

O estudo foi conduzido em um Latossolo Vermelho-Escuro (LE), textura muito argilosa, originalmente distrófico. Sua caracterização química, a partir de amostras de solo coletadas entre o corte da aveia preta e a implantação da cultura do milho, mais especificamente no mês de setembro de 1999, é mostrada na Tabela 1.

Trata-se, em termos físicos, de um solo argiloso, com 20% e 60% de areia e argila, respectivamente, profundo e bem drenado, utilizado para produção de grãos por cerca de 25 anos, em plantio convencional, antes da introdução do SPD.

3.4 Cultura de Cobertura Utilizada para a Formação de Palhada

Para a formação de palhada, no inverno de 1999, optou-se pela aveia preta (*Avena strigosa*, Schreb). Esta cultura possui grande potencial para ser utilizada no cerrado, com uma série de vantagens, como resistência à seca, ser indiferente ao fotoperíodo, cobrir satisfatoriamente o solo, impedindo o crescimento de plantas daninhas, e poder ser uma fonte de pastagem para o período de inverno, o que faz com que seu uso esteja sendo ampliado ano a ano. As sementes utilizadas possuíam 94,5% de pureza, 88% de germinação e 83% de valor cultural.

A semeadura foi realizada no dia 14/4/99. O espaçamento recomendado é igual ao do trigo, ou seja, de 0,15 a 0,20m entre linhas, mas por indisponibilidade de equipamento para este fim, optou-se por espaçamento um de 0,5m entre linhas, o menor espaçamento permitido pelas plantadeiras da propriedade. Utilizaram-se de 45 a 50 sementes por metro linear, ou de 16 a 18kg.ha⁻¹ de sementes. Não foi utilizado nenhum tipo de adubação, aplicação de defensivos químicos ou qualquer outro manejo durante o ciclo da aveia. A cultura foi acamada com o rolo faca após sua maturação, em 10/9/1999, sem a colheita de grãos.

A partir do dia da semeadura da aveia preta, a cada 20 dias, até a sua rolagem, mediram-se a produção de massa seca e os teores de carbono e nitrogênio. Colheu-se a parte aérea das plantas contidas em 1m² (duas linhas de aveia preta), com quatro repetições, escolhidas aleatoriamente na área onde seria semeado o milho, em cada período de coleta. As amostras foram secas em estufa a 60° C até peso constante, com os resultados extrapolados para kg.ha⁻¹ de matéria seca produzida. Depois desse procedimento, as amostras foram finamente moídas, digeridas, destiladas pelo método Kjeldahl e tituladas nos laboratórios do Instituto de Ciências Agrárias (ICIAG) da Universidade Federal

de Uberlândia, para a determinação da quantidade de nitrogênio total. O teor de carbono foi determinado por combustão a seco nos laboratórios do Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo – CENA/USP, Piracicaba, SP.

3.5 Características do Híbrido de Milho Utilizado

Utilizou-se no experimento o híbrido simples Tork, fornecido pela Syngenta, com ciclo precoce, em que o florescimento acontece, em média, 70 dias após a semeadura. É uma planta que pode alcançar até 2,30m altura. Em ensaios no Brasil, apresentou produtividade de até 8.500kg.ha⁻¹ de grãos. Possui alta tolerância a doenças foliares e do colmo, sendo indicado para produtores tecnificados. O espaçamento recomendado é de 0,7 a 0,9m entre linhas, com uma população de 55.000 plantas.ha⁻¹ (Syngenta, 2002).

3.6 Adubação de Semeadura e Manejo na Cultura do Milho

O milho foi semeado no dia 15/11/99, após a dessecação da área total com glifosate. O espaçamento nas entrelinhas foi de 0,8m e, em média, 0,2m entre plantas, totalizando 62.500 plantas por hectare. A adubação potássica foi realizada 21 dias antes da semeadura do milho, com a aplicação de 137kg.ha⁻¹ de KCl (80kg.ha⁻¹ de K₂O) em linha, na superfície, com entrelinhas de 0,4m, de acordo com a recomendação feita para o restante da área comercial.

Na semeadura do milho utilizaram-se 340kg.ha⁻¹ do formulado 12-16-12, ou seja, 40, 54 e 40kg.ha⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O, respectivamente, colocado ao lado e abaixo da semente. O fertilizante foi obtido a partir da mistura de 153kg de sulfato de amônio, 102kg de MAP, 68kg de cloreto de potássio, 7kg de

Borogram (10% de B) e 10kg de sulfato de manganês (9% de Mn), para cada 340kg do formulado.

Durante o ciclo do milho, não foi necessário o controle de pragas ou doenças, apenas fez-se o controle químico de plantas daninhas cerca de 25 dias após sua semeadura.

3.7 Tratamentos Experimentais

O experimento consistiu de quatro tratamentos: sulfato de amônio (S.A.) e uréia, aplicados em pré-semeadura e em cobertura na dose de 80kg.ha⁻¹ de N, correspondente a 180 e 400 kg.ha⁻¹ de uréia e S.A., respectivamente. A aplicação da adubação nitrogenada em pré-semeadura ocorreu 41 dias antes da semeadura do milho com ambas as fontes incorporadas cerca de 7cm de profundidade e com espaçamento entre linhas de 0,8m.

Para os tratamentos com N em cobertura, a aplicação das fontes ocorreu quando o milho atingiu o estágio de 5 - 6 folhas, nas entrelinhas, 31 dias após a semeadura, incorporadas a 7cm de profundidade.

Cada tratamento foi constituído de três repetições, com parcelas de 20m de comprimento e 12m de largura. Dentro de cada parcela, instalaram-se cinco microparcels para a aplicação de ¹⁵N, no tratamento com o uso do nitrogênio em pré-semeadura, e três microparcels no caso do nitrogênio aplicado em cobertura, ou seja, uma microparcela para cada época de amostragem pré-determinada. Como existiam 3 repetições para cada uma destas épocas, totalizaram-se 15 microparcels no tratamento com N em pré-semeadura e 9 microparcels no tratamento com a aplicação de nitrogênio em cobertura.

Nas microparcels, foi aplicado exclusivamente uréia ou sulfato de amônio marcado com ¹⁵N para se quantificar as transformações do nitrogênio no sistema solo-planta. Tanto para a aplicação de nitrogênio em pré-semeadura

como em cobertura, nas microparcelas, utilizaram-se sulfato de amônio e uréia com $5,029 \pm 0,009$ e $5,037 \pm 0,003\%$ de átomos em abundância de ^{15}N respectivamente, produzidos no CENA/USP, em Piracicaba.

As microparcelas possuíam 1m de comprimento, em que se descartou 0,25m de cada lado como bordadura, tendo-se efetivamente 0,5m de microparcela para a coleta da amostra de solo e/ou plantas com ^{15}N .

Para a instalação das microparcelas utilizou-se o maquinário de plantio direto da propriedade para a abertura do sulco de adubação. A aplicação do ^{15}N procedeu-se da seguinte forma: em uma das linhas de aplicação do fertilizante convencional, escolhida aleatoriamente, fechou-se com um saco de plástico a saída de adubo da plantadeira, com a máquina parada em algum ponto da parcela, mantendo, dentro do solo, a haste que abre o sulco para a deposição do fertilizante. A adubadeira então se movimentou em linha reta por 2m, sendo novamente parada e o saco de plástico retirado, para continuar a colocação do adubo não marcado no restante da linha. Este procedimento foi repetido para cada uma das 24 microparcelas instaladas em todos os tratamentos.

Após a abertura do sulco de 2m de comprimento, o solo foi retirado manualmente. Mediu-se 0,5m em cada lado do sulco como bordadura e colocaram-se 7,1g e 16,0g de uréia e sulfato de amônio não marcados, na dose equivalente a $80\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N, transformada para um metro. Esta aplicação foi feita manualmente para proteger o local onde efetivamente foi depositado o adubo marcado, pois no processo de parada e movimentação da plantadeira poderia cair excesso de fertilizante não marcado nas extremidades da microparcela, e assim prejudicar os resultados do experimento.

No 1m central restante aplicou-se a uréia ou o sulfato de amônio marcado, na dose de 14,2g e 32g por metro linear, respectivamente. Depois da adição das fontes, tanto as marcadas como as não marcadas, o sulco foi fechado

novamente com o solo dele retirado, e a microparcela na qual se aplicou o N marcado foi delimitada por estacas.

3.8 Épocas, Formas de Amostragem e Análises de Laboratório

As épocas de amostragens levaram em consideração o tempo após a aplicação dos fertilizantes e o estágio fenológico do milho, de maneira que se obtivesse, ao longo do período de maior importância econômica (recuperação pela cultura) e ambiental (perdas de N para o meio), um quadro da imobilização e eficiência da adubação nitrogenada.

Segundo Andrade et al. (1975), o início do acúmulo de quantidades substanciais de nitrogênio no milho acontece cerca de 20 dias depois da germinação, atingindo o máximo de 10 a 20 dias após o florescimento, aproximadamente. Decidiu-se, então, avaliar o comportamento do N nesse intervalo e também antes da sementeira do milho, para verificar a importância da imobilização do N-fertilizante nesse intervalo de tempo.

Assim, nos tratamentos com a aplicação de N em pré-semeadura, tanto para a uréia quanto para o S.A., as amostragens das microparcels foram feitas aos 19; 40; 64 (estádio de 5 - 6 folhas); 105, (11 - 12 folhas) e 119 (florescimento) dias após a aplicação das fontes (d.a.a.).

Nesses tratamentos estava inicialmente prevista mais uma amostragem no estágio de maturação fisiológica do milho, sendo descartadas as microparcels correspondentes, devido à presença, possivelmente, de "manchas de calagem" no local de sua instalação, fazendo com que as plantas de milho ficassem pequenas e algumas até deformadas, o que tornou inviável esta última amostragem.

No tratamento com a aplicação de N em cobertura, as amostragens foram feitas aos 32 (11 - 12 folhas), 47 (florescimento) e 99 (maturação

fisiológica) dias após a aplicação do nitrogênio, tanto para o sulfato de amônio, quanto para a uréia. Nesses tratamentos não foram feitas amostragens no estádio de 5 - 6 folhas, porque foi nesse período que se aplicou o N. Em cada época foi amostrada uma microparcela em cada uma das três parcelas de cada tratamento, totalizando três repetições por época de amostragem.

3.8.1 Amostragem e Análise do Nitrogênio do Solo

Em cada microparcela (fertilizante marcado) coletou-se o volume de solo contido no sulco de adubação (0,5m de comprimento, 0,1m de largura e 0,1m de profundidade), totalizando $0,005\text{m}^3$, o equivalente, em média, a 6kg de solo por microparcela, para uma densidade de solo média de $1,2\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$. Estes 6kg de solo medidos em cada microparcela foram extrapolados para $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ considerando apenas a linha de aplicação do fertilizante, o que totalizou $150.000\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de solo (100m de comprimento x 0,1m de largura x 0,1m de profundidade, multiplicado por 125, que é o número de linhas de aplicação de nitrogênio em um hectare).

O solo coletado em cada microparcela teve seus macroagregados destruídos, para melhorar a homogeneização da amostra após a sua "agitação" manual. Retirou-se então uma subamostra com aproximadamente 0,5kg de terra, que foi colocada em sacos de plástico, lacrada, identificada e congelada com umidade natural em freezer a cerca de -15°C , como proposto por Mattos Júnior et al. (1995).

As quantificações do N-mineral total foram feitas nos laboratórios do Instituto de Ciências Agrárias (ICIAG), de acordo com o procedimento proposto por Keeney & Nelson (1982), com algumas adaptações: o solo retirado de cada microparcela foi descongelado e homogeneizado, retirando-se uma subamostra de 50g com umidade natural. Esta subamostra foi misturada com 150ml de

solução de KCl 2M, agitada por uma hora e filtrada. Os extratos foram aferidos com água destilada até 250ml. Alíquotas de 50ml dos extratos foram utilizadas para determinação de N-mineral total por destilação Kjeldahl. Posteriormente os extratos destilados foram acidulados com ácido sulfúrico 0,1N (1mL) e colocados a secar em estufa com ar forçado (50°C) e os sais resultantes encaminhados ao CENA/USP, para se quantificar a abundância de átomos de ^{15}N deste “pool”, por espectrometria de massas (modelo ATLAS MAR CH4), segundo o método descrito por Trivelin (1973). Nesse mesmo laboratório foi quantificado o N-total do solo e a correspondente concentração isotópica de ^{15}N , utilizando o espectrômetro de massa ANCA-SL. Todos os dados obtidos foram posteriormente corrigidos para solo seco a 105°C.

3.8.2 Amostragem e Análise do Nitrogênio na Planta de Milho

Em cada microparcela, no 0,5m de comprimento útil, usado para amostragem de solo, foram coletadas as plantas de milho que se encontravam à direita e à esquerda da linha de aplicação do nitrogênio marcado. As plantas retiradas de cada microparcela foram colocadas em sacos de plástico e levadas para o laboratório, onde foram imediatamente pesadas, picadas e misturadas. Retirou-se uma subamostra, que também foi pesada, levada para a estufa a 60°C pelo tempo necessário até que seu peso fosse constante, para determinação de matéria seca, sendo posteriormente moída e enviada ao CENA/USP, para análise do N total e da abundância de átomos de ^{15}N .

As raízes foram coletadas num volume de 0,5m de comprimento por 0,2m de largura e 0,2m de profundidade, com a retirada manual, na medida do possível, de todas as raízes contidas nesse volume de solo, pois, por se tratar de um solo muito argiloso, não permitiu o peneiramento.

Depois de coletadas, as raízes foram ensacadas e identificadas, de modo que correspondessem à parte aérea das plantas colhidas na microparcela. No laboratório, foram lavadas em água corrente, para se retirar o solo restante, e depois levadas para a estufa a 60°C até peso constante. Após, foram pesadas, moídas e enviadas ao CENA/USP para análise de N total e abundância de ¹⁵N.

3.9 Cálculos dos Parâmetros Avaliados para o Milho e o Solo

3.9.1 Nitrogênio-Fertilizante no Solo

A quantificação do N-fertilizante imobilizado (N do fertilizante em formas orgânicas) no solo ocorreu de forma indireta, pois os "pools" de nitrogênio mineral e orgânico provenientes do fertilizante estão juntos, sendo difícil analisá-los individualmente no espectrômetro de massa. Assim, em uma amostra de solo enviada ao laboratório, para a medição de átomos em abundância de ¹⁵N, o equipamento determinou todo o N marcado do fertilizante presente no solo, ou seja, o N marcado do "pool" mineral mais o N marcado "pool" orgânico, como se fossem apenas um.

Por essa razão, a determinação da quantidade de nitrogênio do fertilizante imobilizado exigiu uma seqüência de passos, mostrados nas fórmulas 2 a 9.

$$Nis_{pf} = Nos_{pf} = Nt_{spf} - Nm_{spf} \quad (2)$$

Onde: Nis_{pf} é o nitrogênio imobilizado no solo proveniente do fertilizante, que equivale ao N-orgânico no solo proveniente do fertilizante (Nos_{pf}); Nt_{spf} é o nitrogênio total do solo proveniente do fertilizante e Nm_{spf} é o nitrogênio mineral do solo proveniente do fertilizante.

Para diferenciar o N fertilizante do N nativo do solo utilizaram-se fontes com nitrogênio marcado. Dessa forma, a leitura da quantidade de átomos em excesso de ^{15}N forneceu a quantidade de nitrogênio fertilizante, em porcentagem, presente em cada “pool” de N no solo, sendo necessária sua transformação para $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, padronizando todas as quantificações deste experimento para esta unidade.

Para o cálculo do nitrogênio total no solo, proveniente do fertilizante (N_{tspf}) em $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, seguiram-se os passos descritos nas fórmulas 3 a 5, mostradas a seguir.

O espectrômetro de massa fornece a porcentagem de átomos de ^{15}N no solo, que para ser transformado em porcentagem de nitrogênio total do solo proveniente do fertilizante, utilizou-se a fórmula 3:

$$(\%) N_{\text{tspf}} = ((A - B) / (C - B)) \times 100 \quad (3)$$

Onde: N_{tspf} é a porcentagem do N total do solo que provém do N fertilizante; A é a abundância de átomos de ^{15}N presente na amostra de solo analisada; B é a abundância natural de ^{15}N do solo (0,366%) e C é a abundância natural de ^{15}N da fonte nitrogenada utilizada (5,029% e 5,037% átomos em abundância de ^{15}N para o sulfato de amônio e uréia respectivamente).

O N total do solo é determinado no espectrômetro de massas, também em porcentagem, sendo necessário transformar estes dados para $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de acordo com a fórmula 4:

$$N_{\text{total}} = D \times E / 100 \quad (4)$$

Onde: N total é o nitrogênio total do solo em $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$; D é a extrapolação para a quantidade de solo avaliada ($D = 150.000 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, para este experimento); E é a

porcentagem de nitrogênio marcado e não marcado no solo da amostra lida no espectrômetro de massas.

Portanto, para se conhecer o nitrogênio total do solo proveniente do fertilizante, N_{tspf} , que se encontra em formas tanto orgânicas quanto minerais, em $kg \cdot ha^{-1}$, foi utilizada a seguinte fórmula:

$$N_{tspf} = (N_{total} \times N_{tspf}(\%)) / 100 \quad (5)$$

Quantificado o N_{tspf} , a próxima etapa consistiu em se conhecer o nitrogênio mineral do solo proveniente do fertilizante (N_{mspf}), em $kg \cdot ha^{-1}$, o que foi feito a partir das fórmulas 6 a 8, mostradas a seguir:

$$(\%)N_{mspf} = ((A - B) / (C - B)) \times 100 \quad (6)$$

Onde: N_{mspf} é o nitrogênio mineral do solo proveniente do fertilizante; A é a abundância de átomos de ^{15}N presentes no sal resultante após a destilação Kjeldahl, titulação e secagem do solo, como explicado anteriormente; B é a abundância natural de ^{15}N , (0,366%); C é a abundância de ^{15}N da fonte nitrogenada utilizada.

A fórmula 6 fornece a porcentagem de N-fertilizante mineral no "pool" de N mineral total do solo. Dessa forma, é necessário conhecer também a quantidade de N mineral total desse solo (E), obtido pela destilação Kjeldahl, e calculado pela seguinte expressão (7):

$$E = ((V1 - V2) \times N \times 14) \times 5 \quad (7)$$

Onde: N mineral total é dado em mg de nitrogênio; V1 é o volume de ácido sulfúrico gasto pela amostra; V2 é o volume de ácido sulfúrico gasto pelo branco

e 14 é o peso atômico do nitrogênio; N é a normalidade do ácido sulfúrico; F_C é o fator de correção da normalidade do ácido sulfúrico e o número cinco (5) é o fator de multiplicação para a quantidade de nitrogênio em mg de uma alíquota de 50ml, transformada para 250ml que por sua vez corresponde ao N mineral de 50g de solo. É necessário, então, calcular a quantidade de N mineral total do solo em $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, de acordo com a fórmula 8:

$$N_{\text{ mineral total}} = (D * E)/F \quad (8)$$

Onde: D é a quantidade de solo estimada ($150.000\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ para este experimento); E é o resultado da fórmula 7 e F é a quantidade de solo analisada na fórmula 7, para este experimento, $0,05\text{kg}$.

O próximo passo foi conhecer a quantidade de nitrogênio mineral do solo proveniente do fertilizante (N_{mspf}), em $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, o que foi feito através da seguinte fórmula,

$$N_{\text{mspf}} = (N_{\text{ mineral total}} \times N_{\text{mspf}}(\%)) / 100 \quad (9)$$

3.9.2 Nitrogênio na Planta Proveniente do Fertilizante (N_{ppf})

Foram quantificados, na cultura do milho, o nitrogênio total absorvido, o nitrogênio na planta proveniente do fertilizante (N_{ppf}), expresso em percentagem e $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, e o nitrogênio recuperado na planta proveniente do fertilizante (eficiência), expresso em % do N-aplicado. Em todas estas variáveis, levou-se em consideração a parte aérea e o sistema radicular, em cada estágio de desenvolvimento fenológico do milho, de acordo com os quais se fez a amostragem, como exposto anteriormente.

Para a quantificação do nitrogênio total no milho mediu-se a massa seca, em cada estágio fenológico, das plantas colhidas nas microparcelas, extrapolando-se os dados para $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$. As amostras da parte aérea e raízes foram moídas e enviadas individualmente para o CENA/USP, onde foi feita a leitura das porcentagens de nitrogênio total e da abundância de ^{15}N em relação à matéria seca no espectrômetro de massa. Após, o cálculo da quantidade de nitrogênio total na planta, em $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, foi feito de acordo com a fórmula 10:

$$N_{total} = (MS \times TN)/100 \quad (10)$$

Onde: MS é a matéria seca do milho, da parte aérea ou das raízes, em cada estágio de desenvolvimento da planta; TN é o teor de nitrogênio da raiz ou parte aérea. Os cálculos da quantidade de N total na parte aérea e nas raízes foram feitos separadamente, e depois somados.

Mediu-se também a quantidade de nitrogênio na planta que se originou do fertilizante (Nppf), a partir da fórmula 11, em porcentagem:

$$(\%)N_{ppf} = [((A - B)/(C - B)) \times 100] \times 2 \quad (11)$$

Onde: Nppf é o nitrogênio na planta proveniente do fertilizante; A é a abundância de átomos de ^{15}N na parte aérea ou raízes do milho; B é a abundância natural de ^{15}N , C é a abundância de ^{15}N da fonte nitrogenada utilizada e 2 é um fator de multiplicação devido a aplicação do marcador em uma linha, mas com a colheita de duas linhas de milho.

Conhecendo-se então a quantidade de nitrogênio total do milho ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) e a porcentagem deste N que se originou das fontes nitrogenadas marcadas, calculou-se a quantidade de N fertilizante, em $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, absorvido pelo milho, de acordo com a fórmula 12:

$$N_{ppf} = (N_{total} \times N_{ppf}) / 100 \quad (12)$$

O próximo passo foi a quantificação do N fertilizante recuperado pelo milho (N_{frp}), em porcentagem, utilizando-se a fórmula 13:

$$N_{frp} = (N_{ppf} \times 100) / N_{apl} \quad (13)$$

Onde: N_{ppf} é a quantidade, em $\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$, de nitrogênio do fertilizante presente na planta e N_{apl} é a quantidade de nitrogênio aplicado ($\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$).

3.9.3 Produtividade do Milho

Para o cálculo de produtividade, colheu-se, manualmente, em cada parcela, uma área com 10m de comprimento e 3,2m de largura (4 linha de milho), totalizando 32m^2 . O milho foi debulhado, pesado, e a umidade corrigida para 13 g kg^{-1} , por meio da fórmula 14:

$$M = A(100 - B) / (100 - C) \quad (14)$$

Onde: M é o peso dos grãos na umidade desejada; A é a massa da amostra de grãos com umidade natural; B é a umidade dos grãos da amostra, em porcentagem; e C é a umidade na qual se deseja obter o peso (13% neste experimento).

3.10 Avaliação Nutricional

Foram quantificados os teores de macro e micronutrientes foliares na folha + 4, como recomendado pela Comissão...(1999), coletando-se as folhas de

20 plantas em cada parcela, cerca de 50 dias após a semeadura do milho. Em seguida, as folhas foram levadas para o laboratório, sendo separado o terço médio da folha, sem a nervura principal. O material foi seco em estufa a 60°C com ar forçado, até peso constante, e posteriormente moído em moinho tipo Willey e enviado para análise em laboratório.

3.11 Análises Estatísticas

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, em esquema de parcelas subdivididas no tempo, com três repetições. As parcelas foram constituídas pelas fontes de nitrogênio, enquanto as subparcelas foram constituídas pelas épocas de amostragem, feitas nas microparcelas, onde foi aplicado ^{15}N .

Para todas as características analisadas testou-se a normalidade dos erros pelo teste de Silliefors e a homogeneidade das variâncias pelo teste de Bartlett. Para as características que apresentaram falta de normalidade e/ou variância heterogênea procederam às transformações dos dados.

Após análise da variância aplicou-se um teste de comparação de médias (Tukey) a 5% de probabilidade, para se comparar as fontes em uma mesma época de aplicação de nitrogênio e diferentes épocas dentro de uma mesma fonte, utilizando-se os programas Sanest e Estat.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Cultura Antecessora ao Milho

Como cultura de inverno, no período de 15/4/99 a 10/9/99, antecedendo a cultura do milho no verão, cultivou-se a aveia preta (*Avena strigosa* Schreb), com a finalidade inicial de produzir cobertura do solo. No entanto, como é próprio do cerrado brasileiro, a baixa pluviosidade ocorrida no período de desenvolvimento da aveia preta (Figura 1a) afetou o seu desenvolvimento, como pode ser visto na Figura 1b. A época de corte da aveia preta coincidiu com o período de maturação fisiológica dos grãos, em que a produção de matéria seca foi de aproximadamente $1.000\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, mostrando as restrições provocadas pela distribuição irregular de chuvas ao longo do ano, mesmo para uma cultura resistente à seca.

Na Região Sul do país, onde há chuvas praticamente durante todo o ano, inclusive no inverno, são relatadas produções de $4.000\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ (Gonçalves & Ceretta, 1999) a até mais de $8.000\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de matéria seca (Schuch et al., 2000) de aveia preta, mostrando o potencial real dessa cultura em produzir cobertura de solo na entressafra.

Ainda pela Figura 1b, nota-se que a quantidade máxima de matéria seca produzida pela aveia preta ocorreu por volta dos 100 dias após a semeadura, período no qual estava ocorrendo o início da maturação fisiológica da cultura, havendo uma tendência a diminuição da quantidade de fitomassa após este estágio de desenvolvimento. Schuch et al. (2000) observaram resultados semelhantes para a Região Sul do país, onde a produção máxima de matéria seca para a aveia preta ocorreu na antese, diminuindo após esse estágio. De acordo

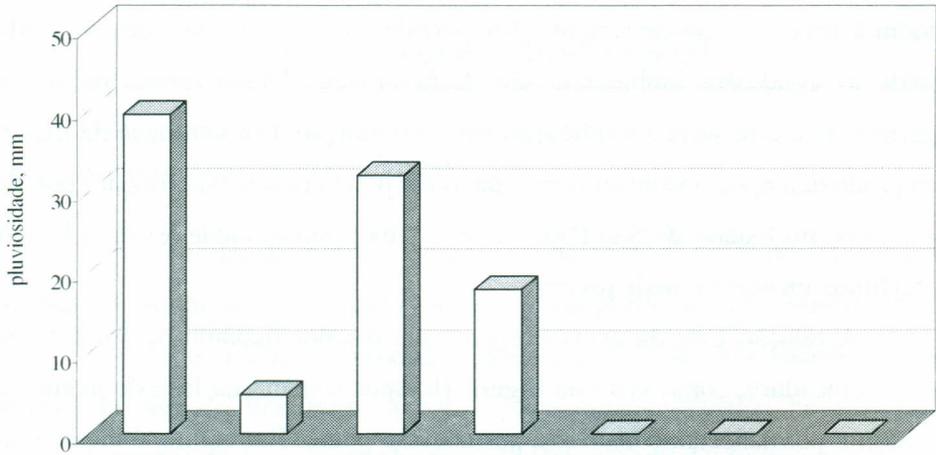
com Rosseto & Nakagawa (2001), citando White (1995¹), perfilhos menores tendem a senescer, em detrimento dos perfilhos maiores e mais desenvolvidos quando as condições ambientais são desfavoráveis. Dessa forma, os autores sugeriram que esta seria a explicação para diminuição da quantidade de matéria seca produzida após o florescimento da aveia preta em um experimento por eles conduzidos no Estado de São Paulo, com a baixa pluviosidade levando à morte os perfilhos menores e mais jovens.

A relação C/N da aveia preta atingiu o valor máximo de 55, 120 dias após a semeadura, como visto na Figura 1b, após o início da fase de maturação da cultura, permanecendo estável a partir desse ponto. Entretanto, é interessante notar que, aos 100 dias após a semeadura (d.a.s.), ou seja, no início da maturação, a relação C/N era de 39. Bortolini et al. (2001) encontraram valor semelhante no momento em que 50% das plantas estavam em floração plena, no Estado do Rio Grande do Sul, mostrando que, nesse estágio, a relação C/N dessa cultura tende a pouca variação, independente do local de seu cultivo e das condições do clima.

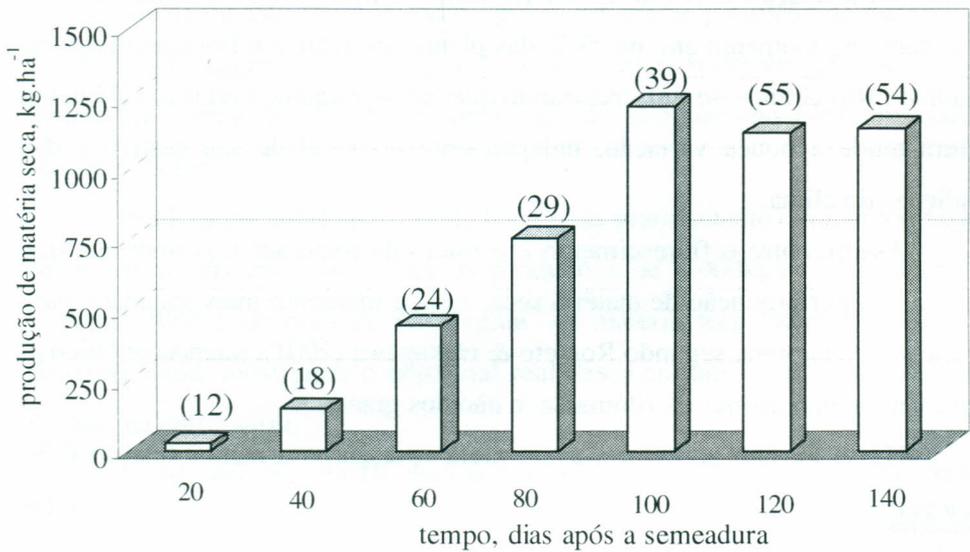
Assim, entre o florescimento e o início da maturação, período em que ocorreu a maior produção de matéria seca, seria o momento mais adequado para o corte da aveia preta, segundo Rosseto & Nakagawa (2001), quando se objetiva o aproveitamento apenas da fitomassa, e não dos grãos.

Nesse mesmo período, a aveia preta apresentou a menor relação C/N, 39, a partir do momento que se atingiu a produção máxima de matéria seca. De acordo com Bortolini et al. (2001), a elevada quantidade de palhada de aveia preta, aliada a uma larga relação C/N, poderia levar à imobilização do nitrogênio do solo e restringir a sua disponibilidade para a cultura de milho sucessora.

¹ WHITE, E.M. Structure and development of oats. In: WELCH, R.W. (Ed.) **The oat crop: production and utilization**. London: Chapman & Hall, 1995. p.88-119.



(a)



(b)

FIGURA 1. Pluviosidade (a), e (b) acúmulo de matéria seca e relação C/N (valores entre parênteses) durante o ciclo da aveia preta (*Avena strigosa*), em dias após a semeadura.

Por isso, se o intuito do cultivo de aveia preta for o de produzir palhada, o corte das plantas deve ser feito entre o florescimento e o início da maturação.

Ao se fazer o corte da aveia preta, em virtude das poucas chuvas ocorridas no período do cultivo, o que diminuiu sua velocidade de decomposição, havia ainda cerca de $4.000\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de palhada de soja, provenientes da safra anterior. Segundo a Embrapa (1997), a soja acumula 32kg de nitrogênio em cada tonelada de restos culturais (massa seca), que extrapolados para as 4 toneladas citadas anteriormente forneceriam cerca de $130\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de nitrogênio, potencialmente disponível para a cultura do milho da próxima safra. Para a aveia preta, em pouco mais de $1.000\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de matéria seca produzida, havia cerca de $13\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de nitrogênio acumulado. Em razão da grande quantidade de restos culturais de soja e da baixa quantidade de matéria seca de aveia produzida, é de se supor que apenas o N contido na palhada de soja seria suficiente para acelerar a decomposição dos restos culturais da aveia preta, minimizando uma eventual imobilização do N-fertilizante aplicado, durante o ciclo do milho.

4.2 Cultura do Milho

4.2.1 Pluviosidade

Na Figura 2, é mostrada a pluviosidade mensal acumulada, quantificada desde a aplicação do nitrogênio em pré-semeadura, até a colheita do milho. No período de 40 dias, compreendido entre a aplicação do nitrogênio em pré-semeadura e a semeadura do milho, a pluviosidade acumulada foi de 220mm , com chuvas irregulares, mas de grande intensidade, o que pode ter influenciado a eficiência das fontes nitrogenadas utilizadas antes do ciclo do milho, como será discutido posteriormente.

Durante o ciclo da cultura do milho, acumularam-se 1.582mm de chuva, não tendo sido a cultura submetida a déficits hídricos, pois na safra 1999/2000 a pluviosidade foi relativamente bem distribuída no período.

4.2.2 Comportamento do Nitrogênio-Fertilizante no Sulco de Adubação

A Tabela 3 mostra o comportamento do nitrogênio no sulco de adubação, nas entrelinhas das plantas de milho, aplicado em pré-semeadura, na forma de sulfato de amônio e uréia. Nota-se, em um primeiro momento, que o N do sulfato de amônio (N-S.A.) apresentou a maior imobilização 19 dias após a sua aplicação no solo ($13,4 \text{ kg.ha}^{-1}$), estabilizando-se após esse período, quando, apesar de diminuir, não mais diferiu estatisticamente entre as épocas avaliadas, até o período de florescimento (119 dias após a aplicação). Em relação à uréia, o período em que ocorreu a menor imobilização do N, quando aplicada em pré-semeadura, foi justamente aos 19 dias após a sua aplicação ($4,7 \text{ kg.ha}^{-1}$), sendo que 40 dias após, o N-uréia (N-U) imobilizado atingiu seu máximo ($13,8 \text{ kg.ha}^{-1}$), apesar de não diferir estatisticamente entre as épocas posteriores até o período de florescimento.

Essas diferenças no comportamento das fontes logo após serem adicionadas ao solo podem ser explicadas pela dinâmica da uréia. No solo, esse fertilizante é hidrolizado pela urease liberando posteriormente amônia (NH_3). De acordo com Zantua & Bremner (1976), a urease é protegida, no solo, da degradação microbiana e de outros processos, o que faz com que cada solo possua um nível estável de sua atividade, e mesmo a adição de materiais orgânicos não alteram o nível e a atuação dessa enzima, o que contribui para sua efetividade na atuação sobre a uréia.

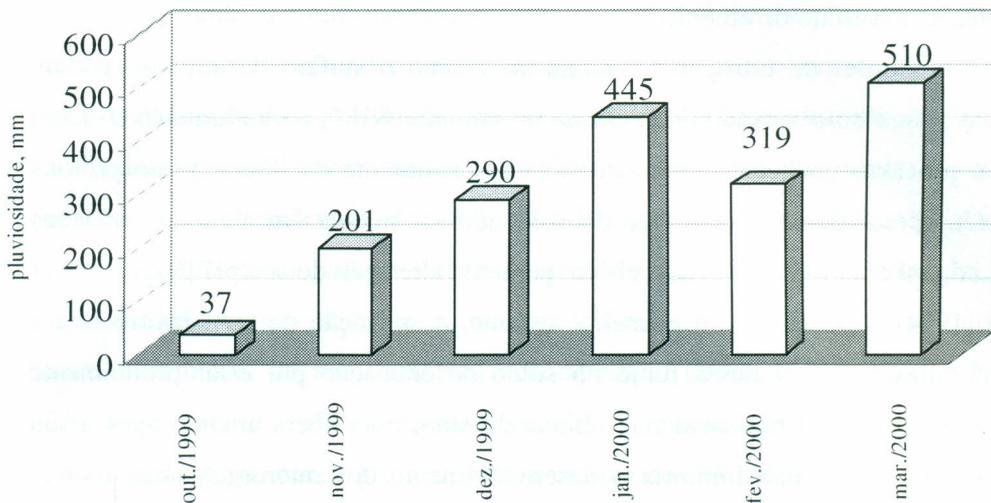


FIGURA. 2. Pluviosidade mensal acumulada durante o período de avaliação do comportamento do nitrogênio no solo (4/10/1999 a 23/3/2000), e do ciclo da cultura do milho (15/11/1999 a 23/3/2000).

A amônia, por sua vez, é uma molécula que pode alterar fortemente o pH do solo, que dependendo de sua concentração pode ultrapassar 9,5. A presença de amônia pode também levar a aumentos na concentração de nitrito (que é tóxico para as plantas), além de elevar a pressão osmótica no local. Estas características, aliadas ao fato de que a própria amônia pode ser tóxica aos animais, plantas superiores e microrganismos quando utilizada incorretamente, fazem com que haja uma diminuição da atividade da biomassa microbiana no local de aplicação da uréia, já que é um ambiente que suprime o seu desenvolvimento e reprodução (Rodrigues & Kiehl, 1992; Tisdale et al., 1984; Raij, 1991).

Assim, em um primeiro momento, a baixa atividade da biomassa microbiana levaria a um menor consumo de nitrogênio mineral do solo,

resultando em uma menor imobilização do N-uréia logo após a sua aplicação, como visto nos primeiros 19 dias após a sua aplicação em pré-semeadura, em relação ao sulfato de amônio.

Fontes de nitrogênio amoniacais, como o sulfato de amônio, podem acidificar o solo quando da oxidação do amônio (NH_4^+) para nitrato (NO_3^-), em um processo conhecido como nitrificação, resultante da liberação de prótons (H^+), apesar desta acidificação do solo não ser notada em algumas situações (Ledgard et al., 1998), ou percebe-se pequena alteração do seu pH (Verhagen, et al. 1994). Assim, em um primeiro instante, a aplicação de S.A. favoreceria a imobilização do N dessa fonte no sulco de adubação por estar prontamente disponível para a biomassa microbiana do solo, pois libera amônio após a sua solubilização, e não limitaria o desenvolvimento dos microrganismos ao não modificar substancialmente o pH e as características do solo circundante. Segundo Puri & Ashman (1999), o amônio é preferencialmente mais utilizado pela biomassa microbiana do solo em relação ao nitrato, em condições de campo, onde os autores observaram que a imobilização de amônio foi duas vezes maior, quando comparada com a imobilização do nitrato, apesar de essa relação, de acordo com os autores, poder ser modificada conforme o tipo de solo e da comunidade microbiana.

Green & Blackmer (1995) observaram, para o milho, que a imobilização líquida do N-fertilizante, quando a cultura anterior era soja, durou menos tempo, quando comparada com o tratamento que utilizou milho como cultura antecedente. No entanto, o início da mineralização líquida, ou seja, liberação de nitrogênio para o solo, foi semelhante nas duas rotações, quando o tratamento milho depois de milho recebeu pelo menos $112\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N, compensando a elevada relação C/N, e no tratamento com soja antes do milho não foi aplicado nitrogênio. Assim, o manejo dos fertilizantes, a rotação de culturas e o tempo

podem alterar a velocidade de decomposição dos restos culturais e da matéria orgânica do solo e a taxa de imobilização do N.

Quando o milho atingiu o estágio de 5 - 6 folhas (Tabela 3), o N-fertilizante imobilizado no sulco de adubação, tanto para o sulfato de amônio quanto para a uréia foram semelhantes (menos de $10\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ dos $80\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N aplicados), possivelmente em razão do fim das alterações provocadas no solo pela uréia e a estabilização dos processos de imobilização-mineralização. Além disso, esse nitrogênio poderia estar fazendo parte da matéria orgânica do solo, ou seja, ácidos húmicos e fúlvicos, ou de moléculas orgânicas, como gorduras, ceras e celulose, de lenta e difícil decomposição (Brady, 1989; Wild, 1988; Chichester et al., 1975), mesmo porque a quantidade de N-fertilizante imobilizado permaneceu praticamente a mesma dos 64 até os 119 dias após a aplicação das fontes.

Na Tabela 4, encontram-se os dados referentes à aplicação de sulfato de amônio e uréia em cobertura. Quando o milho apresentava de 11 a 12 folhas, ou seja, 32 dias após a aplicação do N, cerca de $2,3\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ e $9,8\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ do N-S.A. e do N-U estavam imobilizados no solo, respectivamente, valores que tenderam a diminuir, mesmo que lentamente, até o período de maturação fisiológica do milho. Estatisticamente não houve diferenças significativas entre as fontes, apesar de o nitrogênio da uréia ter sido, aparentemente, mais imobilizado quando comparado com o N do sulfato de amônio.

Se comparada com o uso dessas fontes em cobertura, em relação à aplicação em pré-semeadura, a imobilização do nitrogênio, tanto do S.A. quanto da uréia, foi maior, apesar de, independente da época de aplicação, a imobilização do N-fertilizante no sulco de adubação ser inferior a 10% do total de nitrogênio aplicado, a partir do estágio de 11-12 folhas, indicando que, para as condições do experimento, a retenção do nitrogênio proveniente do fertilizante no solo em formas orgânicas não foi expressiva.

TABELA 3. Nitrogênio total do solo (N total), nitrogênio do solo proveniente do fertilizante (Ntspf), nitrogênio mineral total do solo, nitrogênio mineral do solo proveniente do fertilizante (Nmspf) e nitrogênio fertilizante imobilizado (Nispf), no sulco de semeadura a partir da aplicação de 80 kg.ha⁻¹ de nitrogênio na forma de sulfato de amônio (S.A.) e uréia em pré-semeadura¹.

d.a.a ² . (estádio)	N total		Ntspf		N mineral total		Nmspf		Nispf	
	S.A.	Uréia	S.A.	Uréia	S.A.	Uréia	S.A.	Uréia	S.A.	Uréia
	kg.ha ⁻¹									
19	289 aA	257 aB	65,0 aA	51,1 aB	56,9 a	53,4 a	51,6 a	46,4 a	13,4 aA	4,7 bB
40	217 bB	247 abA	16,1 bB	30,1 bA	12,3 b	21,5 b	8,2 b	16,3 b	7,9 bB	13,8 aA
64 (5 - 6 folhas)	219 bA	216 bcA	12,9 bA	12,1 cA	9,5 c	6,6 c	5,3 c	2,3 c	7,3 bA	9,8 abA
105 (11 - 12 folhas)	196 bA	191 cA	5,9 cA	7,6 cA	1,5 d	0,9 d	0,2 d	0,1 d	5,8 bA	7,5 abA
119 (florescimento)	198 bA	193 cA	4,7 cA	7,3 cA	2,2 d	1,4 d	0,1 d	0,1 d	4,8 bA	8,0 abA
Transformação	-		\sqrt{x}		\sqrt{x}		$\ln x + 10$		-	
DMS ³	25,3		0,7*		n.s		n.s.		3,9	
DMS ⁴	39,1		0,9*		1,0*		7,5*		4,9	
C.V. ³ (%)	2,2		8,6*		11,3*		4,2*		16,6	
C.V. ⁴ (%)	7,0		9,3*		16,2*		5,6*		26,9	

Análises realizadas nos laboratórios do ICIAG e CENA/USP

- (1) Letras minúsculas iguais na mesma coluna e letras maiúsculas iguais em uma mesma linha, dentro de cada variável analisada, indicam que não houve diferenças significativas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.
 - (2) d.a.a. : dias após a aplicação de nitrogênio.
 - (3) Entre fontes dentro de uma mesma época.
 - (4) Entre épocas dentro de uma mesma fonte.
- * Referem-se aos dados transformados

Pode-se afirmar que o processo de imobilização atuou mais como um pequeno estoque de N em longo prazo, do que como um fator de restrição à disponibilidade desse nutriente para a planta.

Ladd & Amato (1986) verificaram que, em uma segunda safra de trigo, dos 50kg.ha⁻¹ de nitrogênio aplicados com diferentes fontes (uréia, nitrato de potássio e sulfato de amônio), logo antes da semeadura da primeira safra, cerca de 28% e 4% do N do fertilizante estavam no solo em formas orgânicas e minerais, respectivamente, com uma recuperação de aproximadamente 11% do N aplicado, independente da fonte. No total, o nitrogênio dos fertilizantes recuperados pelo primeiro cultivo do trigo mais o N-fertilizante presente no solo na semeadura da segunda safra de trigo totalizavam cerca de 80% do N aplicado.

No sistema plantio direto, Lara Cabezas et al. (2000) observaram que aproximadamente 10kg.ha⁻¹, dos 100kg.ha⁻¹ de N-uréia aplicados em cobertura, superficialmente ou incorporado, foram encontrados imobilizados até os 45cm de profundidade, onde quase a totalidade do N-fertilizante (por volta de 90%) estava imobilizada nos primeiros 15cm de profundidade, camada de solo onde se concentra a atividade microbiana. Para o plantio convencional, Coelho et al. (1991) encontraram 14kg.ha⁻¹, dos 60kg.ha⁻¹ de N na forma de uréia aplicados em cobertura, imobilizados até os 90cm de profundidade, tanto para a sua aplicação em superfície quanto incorporada.

Aparentemente, a quantidade de nitrogênio do fertilizante imobilizado atinge um ponto no qual se estabiliza, independente da época de aplicação do nutriente, como foi observado por Recous & Machet (1999), que utilizaram a uréia em oito épocas diferentes, entre o preparo do solo e o florescimento do trigo, e notaram que depois de sete dias após cada aplicação, o N-fertilizante imobilizado variou entre 13% e 16%, em qualquer um dos períodos avaliados. Quando a avaliação foi feita 14 dias após a aplicação, o N imobilizado continuou praticamente o mesmo, mostrando que existe um teto para a imobilização do N

fertilizante, e que quando atingido, se estabiliza, pelo menos durante determinado período.

No decorrer do tempo, a quantidade de N imobilizado das duas fontes diminuiu lentamente, permanecendo praticamente estável, levando a crer que já a partir de 32 dias após a adubação em cobertura, esse nitrogênio provavelmente já fazia parte da matéria orgânica do solo ou de compostos da biomassa de decomposição mais lenta, como aconteceu com o nitrogênio aplicado em pré-semeadura.

Em relação ao nitrogênio mineral no solo proveniente do fertilizante (Nmspf), quando as fontes foram aplicadas em pré-semeadura (Tabela 3), houve rápida liberação de N em formas minerais, chegando a 51 e 46kg.ha⁻¹ para o sulfato de amônio e a uréia, respectivamente, no sulco de adubação, dos 80kg.ha⁻¹ de N utilizados, mesmo com a baixa pluviosidade registrada no início do experimento. Levando-se em consideração que nessa época não havia presença de plantas na área, e apenas uma parte do N-fertilizante estava imobilizado, existe a possibilidade desse nutriente sofrer lixiviação e denitrificação. Com a intensificação das chuvas a partir de novembro (Figura 2), o N-fertilizante poderia deslocar-se para camadas profundas do solo, onde o sistema radicular do milho não atinge, ao menos no início do desenvolvimento da planta.

Quando o milho atingiu o estágio de 11 - 12 folhas, a disponibilidade de N-fertilizante mineral para as duas fontes estava próxima a zero, tanto para o nitrogênio aplicado em pré-semeadura quanto em cobertura, com a diferença de que, quando o N foi aplicado em cobertura, havia a presença de plantas, que eventualmente poderiam absorver esse nitrogênio, incorporando-o ao milho, limitando, assim, maiores perdas.

TABELA 4. Nitrogênio total do solo (N total), nitrogênio do solo proveniente do fertilizante (Ntspf), nitrogênio mineral total do solo, nitrogênio mineral do solo proveniente do fertilizante (Nmspf) e nitrogênio fertilizante imobilizado (Nispf), no sulco de adubação, a partir da aplicação de 80 kg.ha⁻¹ de N, na forma de sulfato de amônio (S.A.) e uréia em cobertura¹.

d.a.a ² . (estádio)	N total		Ntspf		N mineral total		Nmspf		Nispf	
	S.A.	Uréia	S.A.	Uréia	S.A.	Uréia	S.A.	Uréia	S.A.	Uréia
	kg.ha ⁻¹									
32 (11 - 12 folhas)	188	202	2,4 a	12,7 a	1,5 B	5,3 aB	0,1 B	2,9 aA	2,3	9,8 a
47 (florescimento)	197	192	2,4 a	8,2 ab	1,8 A	1,9 bA	0,1 A	0,4 bA	2,3	7,8 ab
99 (mat. fisiológica)	190	172	1,3 b	6,2 b	1,6 A	1,5 bA	0,1 A	0,1 bA	1,2	6,1 b
Transformação	-		√x		-		Inx + 10		-	
DMS ³	n.s		0,4*		1,1		0,1*		n.s.	
DMS ⁴	n.s		n.s		1,6		0,1*		2,2	
C.V. ³ (%)	2,1		3,1*		13,8		0,8*		6,8	
C.V. ⁴ (%)	5,2		11,2*		31,0		1,6*		21,2	

Análises realizadas nos laboratórios do ICIAG e CENA/USP

- (1) Letras minúsculas iguais na mesma coluna, para cada fonte, e letras maiúsculas iguais para uma mesma linha, dentro de cada variável analisada, indicam que não houve diferenças significativas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.
 - (2) d.a.a. : dias após a aplicação de nitrogênio.
 - (3) Entre fontes dentro de uma mesma época.
 - (4) Entre épocas dentro de uma mesma fonte.
- * Referem-se aos dados transformados.

De acordo com Andrade et al. (1975), o acúmulo máximo de nitrogênio no milho ocorre entre 90 e 100 dias após a germinação, dependendo do híbrido. Segundo Fancelli e Dourado-Neto (1997), no estágio de 12 folhas (entre 42 e 49 dias após a emergência), o milho apresenta de 80% a 90% de sua área foliar máxima, com alta taxa de crescimento do colmo, pendão e espiga superior. Os autores afirmaram ainda que é no intervalo entre o estágio de 12 folhas e o florescimento (63 a 70 dias após a emergência) que a disponibilidade de água e nutrientes, é fator essencial para se alcançar a produção esperada. Portanto, é neste intervalo de aproximadamente 28 dias que todos os nutrientes, inclusive o nitrogênio e a água, devem estar prontamente disponíveis e em quantidades adequadas para a máxima produtividade do milho.

Mas, por meio das Tabelas 3 e 4, nota-se que já a partir do estágio de 11 - 12 folhas, tanto para a aplicação do N em pré-semeadura quanto em cobertura, o N mineral total e o N_{mspf} eram de aproximadamente 1kg.ha⁻¹ no volume de solo na linha de adubação analisado, mantendo-se esse valor no florescimento, em um período no qual a necessidade de nitrogênio pela planta era máxima. No entanto, conforme será visto no próximo item, no florescimento, em qualquer tratamento, o milho já havia absorvido cerca de 150kg.ha⁻¹ de N (parte aérea e raízes), seja nativo do solo ou dos fertilizantes utilizados, com exceção do tratamento com uréia em pré-semeadura, no qual a absorção de N foi por volta de 100kg.ha⁻¹.

Esses dados, aparentemente contraditórios, que mostram uma elevada absorção de nitrogênio mineral pelo milho, apesar de sua quantidade aparentemente insignificante no solo, podem ser explicados por meio do efeito "priming".

A adição de nitrogênio no solo acelera a decomposição da matéria orgânica e da palhada (Alfaia, 1997; Franzluebbers et al., 1995), o que é conhecido como efeito "priming", apesar de em alguns casos tal fenômeno não

ser notado (Sampaio & Salcedo, 1993). Essa aceleração na decomposição de resíduos orgânicos foi mostrada por McCarty & Meisinger (1997), quando verificaram que quantidades adequadas de nitrogênio (135 kg.ha^{-1}) aplicadas ao solo cultivado com milho aumentaram o N mineral disponível e a biomassa microbiana no solo; no entanto, quando se aplicou nitrogênio em excesso (270 kg.ha^{-1}), ocorreu o resultado inverso: diminuição da biomassa microbiana e do N mineral, provavelmente em decorrência de maior lixiviação, perdas gasosas e menor imobilização desse nutriente.

A rápida decomposição da palhada de soja e de aveia preta, que tiveram a sua massa reduzida de 5.000 kg.ha^{-1} para 1.000 kg.ha^{-1} em cerca de 6 meses, após o corte da aveia, no experimento aqui discutido, pode ser em parte creditada à adição de fertilizantes nitrogenados e ao N acumulado na palhada de soja. Lara Cabezas (2001) supõe que o efeito "priming" seja um dos responsáveis pela rápida decomposição de palhada de nabo forrageiro, com a aplicação de nitrogênio em pré-semeadura: a adição de N fez com que a biomassa microbiana do solo utilizasse o carbono da palhada do nabo, que possui estreita relação C/N, acelerando sua decomposição e liberando excesso de nitrogênio mineral no solo, em uma época que não existiam plantas para absorvê-lo ou carbono em quantidades suficientes para promover sua imobilização, o que favoreceu as perdas de nitrogênio, refletidas na recuperação do N-fertilizante pelo milho, que atingiu 26,8%.

Quando a adubação com N em pré-semeadura foi feita sobre palhada de milheto, nesse mesmo trabalho de Lara Cabezas (2001), a recuperação do N-fertilizante foi o dobro (51,3%), pois esse N foi, provavelmente, imobilizado em um primeiro momento, mesmo com a aceleração de sua decomposição, devido à grande quantidade de carbono do milheto, sendo então liberado posteriormente, durante o ciclo do milho, quando o teor de carbono no solo diminuiu, restringindo a atividade microbiana. Cabe salientar que no ano desse

experimento houve maior disponibilidade hídrica para as culturas de inverno, o que permitiu grande produção de matéria seca, tanto para o nabo forrageiro quanto para o milho.

Dessa forma é possível que grandes quantidades de nitrogênio nativo do solo estejam sendo mineralizadas, mas, ao mesmo tempo, dependendo do tipo de manejo e palhada, grandes quantidades de N também podem estar sendo imobilizadas, obtendo-se um balanço líquido de nitrogênio mineral baixo, como visto nas Tabelas 3 e 4. Isso pode levar a um erro de interpretação, ao acreditar que quantidades insuficientes de N estariam disponíveis para o milho.

4.2.3 Absorção de Nitrogênio e Recuperação do N-Fertilizante pelo Milho

Na Tabela 5, encontram-se os valores referentes à recuperação do N-fertilizante pela cultura do milho, quando aplicado em pré-semeadura, na forma de sulfato de amônio e uréia. Nota-se que, ao atingir o estágio de 5 - 6 folhas, a quantidade de nitrogênio total absorvido pelo milho foi de $5,7\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ e $7,2\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ para os tratamentos onde se aplicaram S.A. e uréia, respectivamente, enquanto a quantidade do N-fertilizante absorvido foi próxima a zero, para ambas as fontes. Este fato provavelmente ocorreu em razão da distância entre o local de aplicação do nitrogênio e o sistema radicular do milho, ainda restrito neste estágio. Quando o milho atingiu o estágio de 11 - 12 folhas, a absorção de nitrogênio total foi de $112,4\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ e $94,6\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ para o S.A. e a uréia, respectivamente (Tabela 5). Estatisticamente a quantidade de N total absorvida do estágio de 11 - 12 folhas até o florescimento foi a mesma, dentro de uma mesma fonte e também entre as fontes. Andrade et al. (1975) observaram dados semelhantes para a absorção de N no milho: aos 20 dias após a germinação,

TABELA 5. Massa seca, nitrogênio total na planta, nitrogênio na planta proveniente do fertilizante (Nppf) e nitrogênio fertilizante recuperado pela planta (Nfrp), a partir da aplicação de 80 kg.ha⁻¹ de nitrogênio na forma de sulfato de amônio (S.A.) e uréia em pré semeadura¹.

d.a.a ² . (estádio)	Massa seca		Nitrogênio total		Nppf		Nfrp	
	S.A.	Uréia	S.A.	Uréia	S.A.	Uréia	S.A.	Uréia
			kg.ha ⁻¹				%	
64 (5 - 6 folhas)	121 b	156 b	5,7 b	7,2 b	0,02 Ab	0,02 A b	0,1A b	0,1 Ab
105 (11 - 12 folhas)	6.271 a	7.450 a	112,4 a	94,6 a	35,4 Aa	18,8 Ba	44,2 Aa	23,5 Ba
119 (florescimento)	9.098 a	7.356 a	153,8 a	106,2 a	45,7 Aa	22,7 Ba	57,1 Aa	28,3 Ba
Transformação	√x		√x		lnx + 10		lnx + 10	
DMS ³	n.s		n.s.		0,2*		0,2*	
DMS ⁴	18,9		2,4*		0,4*		0,4*	
C.V. ³ (%)	7,5		5,5*		5,8*		5,8*	
C.V. ⁴ (%)	18,8		18,1*		6,8*		6,8*	

Análises realizadas nos laboratórios do ICIAG e CENA/USP

- (1) Letras minúsculas iguais na mesma coluna, para cada fonte, e letras maiúsculas iguais para uma mesma linha, dentro de cada variável analisada, indicam que não houve diferenças significativas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.
 - (2) d.a.a. : dias após a aplicação de nitrogênio.
 - (3) Entre fontes dentro de uma mesma época.
 - (4) Entre épocas dentro de uma mesma fonte.
- * Referem-se aos dados transformados.

os diferentes híbridos avaliados haviam acumulado cerca de $12\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de nitrogênio, mas, aos 40 dias após a emergência, em média, os híbridos já haviam acumulado aproximadamente $100\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de N.

A recuperação do N-fertilizante pelo milho, quando utilizado em pré-semeadura (Nfrp), mostrada na Tabela 5, foi de 44,2% para o S.A. e 23,5% para a uréia no estádio de 11 - 12 folhas. Até o florescimento 57,1% e 28,3% do nitrogênio do sulfato de amônio e da uréia aplicados, respectivamente, foram recuperados pela planta. O sulfato de amônio, a partir do estádio de 11-12 folhas até o florescimento, recuperou aproximadamente o dobro do N-fertilizante em relação ao tratamento com uréia, que teve praticamente estagnada a recuperação do N-Uréia no estádio de 11 - 12 folhas.

A aplicação antecipada do nitrogênio antes da semeadura do milho pode levar a uma baixa eficiência, como demonstrado por Timmons & Cruse (1990), em que a aplicação de uran (uma fonte líquida obtida com a mistura de uréia e nitrato de amônio), cerca de três meses antes da semeadura do milho, levou à recuperação de apenas 10% a 22% do N-fertilizante aplicado ($224\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) pela planta, enquanto sua aplicação logo após a semeadura do milho levou a uma recuperação que variou entre 54% e 59%. Segundo os autores, ambos os tratamentos estiveram sujeitos a processos de desnitrificação, lixiviação e volatilização de amônia, mas no tratamento com o nitrogênio aplicado em pré-semeadura o nutriente esteve sujeito a estes processos por mais tempo, e sem que houvesse a presença de plantas para absorvê-lo, o que determinou as maiores perdas e conseqüentemente a menor recuperação do N-fertilizante aplicado.

Recous & Machet (1999) analisaram a recuperação do N-fertilizante aplicado, em oito diferentes épocas no trigo, entre o período de preparo do solo e o florescimento, e verificaram que a recuperação do N da uréia variou de 45% a 65%. Os autores observaram que a recuperação do nitrogênio do fertilizante foi

aumentando conforme sua época de aplicação se aproximava do período de florescimento, e que a menor eficiência do N-fertilizante aconteceu quando da sua aplicação no período de preparo do solo (45%) e a maior (65%), quando aplicado no florescimento. Essas diferenças foram provocadas, provavelmente, por perdas gasosas ou lixiviação, e não em decorrência do processo de imobilização, que, independente da época de aplicação do N, manteve-se entre 13% e 16% do N-fertilizante utilizado.

Para a aplicação do nitrogênio em cobertura (Tabela 6), a recuperação do N-fertilizante foi de 66,2% para o sulfato de amônio e de 50,4% para a uréia, não havendo diferenças estatísticas entre as fontes e nem entre as diferentes épocas. Comparando-se com a aplicação de nitrogênio em pré-semeadura, a recuperação do N-U e do N-SA pareceu maior, apesar de não terem sido comparados estatisticamente, em razão de apenas duas épocas de amostragem coincidirem entre os tratamentos de N em pré-semeadura e cobertura.

Lara Cabezas et al. (2000), em sistema plantio direto, verificaram que dos 100kg.ha⁻¹ de N aplicados em cobertura, utilizando como fonte a uréia, 60% foram recuperados pela planta, valores semelhantes aos encontrados por Coelho et al. (1991), em que o milho absorveu 53% dos 60 kg.ha⁻¹ de nitrogênio proveniente da uréia, aplicada incorporada no solo, em plantio convencional. No caso do sulfato de amônio, Jokela & Randall (1997), testando diferentes doses, solos e épocas de aplicação (na semeadura ou no estágio de 8 folhas) no milho, mostraram que a recuperação do N-fertilizante variou de 31% a 60% para a menor dose (75 kg.ha⁻¹ de N), e de 25% a 45% para a maior dose (150 kg.ha⁻¹ de N), levando os autores a concluir que doses excessivas de nitrogênio aumentaram a lixiviação de nitrato para abaixo das camadas do solo onde se encontra o sistema radicular do milho, uma vez que a quantidade de nitrogênio aplicada em um curto período de tempo supera a capacidade de absorção de N pela cultura.

TABELA 6. Massa seca, nitrogênio total na planta, nitrogênio na planta proveniente do fertilizante (Nppf) e nitrogênio fertilizante recuperado pela planta (Nfrp), a partir da aplicação de 80 kg.ha⁻¹ de nitrogênio, na forma de sulfato de amônio (S.A.) e uréia em cobertura¹.

d.a.a ² . (estádio)	Massa seca		Nitrogênio total		Nppf		Nfrp	
	S.A.	Uréia	S.A.	Uréia	S.A.	Uréia	S.A.	Uréia
	kg.ha ⁻¹							%
32 (11 - 12 folhas)	8238 b	6.493 b	143,7	101,4	47,1	21,6	58,9	27,0
47 (florescimento)	9407 b	9.755 b	154,4	163,6	41,2	33,2	51,5	41,5
99 (mat. fisiológica)	17454 a	14.928 a	196,0	174,0	53,0	40,4	66,2	50,4
Transformação	√x		-		-		-	
DMS ³	n.s		n.s.		n.s.		n.s.	
DMS ⁴	19,9*		n.s.		n.s.		n.s.	
C.V. ³ (%)	13,2*		22,5		19,8		19,8	
C.V. ⁴ (%)	18,8*		27,1		36,7		36,7	

Análises realizadas nos laboratórios do ICIAG e CENA/USP

- (1) Letras minúsculas iguais na mesma coluna, para cada fonte, e letras maiúsculas iguais para uma mesma linha, dentro de cada variável analisada, indicam que não houve diferenças significativas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.
- (2) d.a.a. : dias após a aplicação de nitrogênio.
- (3) Entre fontes dentro de uma mesma época.
- (4) Entre épocas dentro de uma mesma fonte.

* Referem-se aos dados transformados

O nitrogênio é um nutriente que tem seu comportamento ligado à matéria orgânica e à biomassa do solo; assim, fatores que os afetam irão, conseqüentemente, influenciar as transformações do nitrogênio, em vista disso encontram-se tantas variações em relação à eficiência de utilização do N-fertilizante, que em raras ocasiões atinge 50% ou mais de recuperação. De acordo com Muchow (1998), a eficiência de utilização do nitrogênio proveniente do fertilizante aplicado, no sorgo e no milho, é altamente variável sob diferentes climas, solos e sistemas de manejo, logo é preciso levar em consideração os efeitos dos fatores abióticos, a quantidade de N-fertilizante a ser aplicado em um determinado local, sem que haja excesso ou falta de N, dentro de uma estratégia de manejo local, para que a produtividade seja máxima e as perdas sejam as mínimas possíveis.

Dessa forma, a recuperação do N-fertilizante total aplicado pode variar de acordo com a cultura: Karlen et al. (1996) observaram que a recuperação foi de 33,5%; 32,5% e 20,5% do N aplicado para as culturas de milho, trigo e algodão, respectivamente; Ladd & Amato (1986) verificaram que o trigo absorveu entre 14% e 33,8% do nitrogênio utilizado, dependendo da dose aplicada. Varvel & Peterson (1990) concluíram que a recuperação do N aplicado varia com o manejo das espécies cultivadas, pois no tratamento com rotação de culturas (soja, aveia ou sorgo antecedendo o milho), o nitrogênio absorvido do nitrato de amônio pelo milho foi de 58,6% e 52,3%, para as doses de 90kg.ha⁻¹ e 180kg.ha⁻¹, respectivamente, enquanto na monocultura, para a mesma fonte e doses, a recuperação ficou entre 49,8% e 43,4% do N aplicado; Omay et al. (1998) também determinaram a influência da rotação de culturas na recuperação do nitrogênio: na rotação soja-milho a recuperação do N aplicado pelo milho variou de 22,8% a 36,8% e com milho contínuo variou de 25,6% a 29,8%; Samater et al. (1998) relataram que a presença de nitrito inibe a absorção de nitrogênio, além de ser tóxico para o milho: a recuperação do N variou entre

21,2% e 49%, dependendo da quantidade de nitrito utilizada, e na ausência de NO_2^- , a absorção variou de 32,5% a 62%, dependendo da dose.

4.3 Destino do N-Fertilizante no Estádio de Florescimento do Milho

Especificamente para o estágio de florescimento, em que as épocas de amostragem coincidiram nos quatro tratamentos, dada a importância desse período, fez-se a comparação de alguns parâmetros, mas sem a análise estatística para não haver incompatibilidade com as análises feitas separadamente para as aplicações de N em pré-semeadura e em cobertura, mostradas anteriormente.

Na Tabela 7, encontram-se os valores referentes ao N proveniente das fontes nitrogenadas encontradas no solo nas formas mineral (Nmspf) e orgânica (Nispf), e absorvido pelo milho no florescimento, de acordo com as diferentes épocas de aplicação do sulfato de amônio e da uréia.

No estágio de florescimento do milho, entre 41,4 e 50,6kg.ha⁻¹ do N-fertilizante (dos 80kg.ha⁻¹ inicialmente aplicados) foram encontrados no solo e na planta, com exceção do tratamento com uréia em pré-semeadura, onde 30,7kg.ha⁻¹ do nitrogênio aplicado foi quantificado, ou seja, 60% do N-fertilizante aplicado nesse tratamento não foram recuperados pelo milho ou “estocados” no solo do sulco de aplicação do nitrogênio (Tabela 7).

O nitrogênio do fertilizante na forma mineral (Nmspf) respondeu por 0,4kg.ha⁻¹ ou menos, do total aplicado, seja em pré-semeadura ou em cobertura, mostrando as rápidas reações destas fontes no solo, independente da época de aplicação. Tran & Giroux (1998) aplicaram 180kg.ha⁻¹ de N na forma de nitrato de amônio em diferentes locais e safras, e observaram que durante o período de colheita do milho o teor de N mineral proveniente do fertilizante variou de 1,4%, em solos sujeitos a elevada pluviosidade, a 20,6% naqueles solos submetidos à

condições de déficit hídrico. Os autores ainda notaram que o teor de N mineral oscilou de acordo com o tipo de solo e o ano avaliado.

Os solos de cerrado, por serem profundos, bem drenados e submetidos à elevada pluviosidade em um curto período de tempo (novembro a março), teriam todos os elementos para favorecer as perdas por lixiviação do nitrogênio mineral proveniente do adubo. No entanto, isso não tem sido confirmado em trabalhos conduzidos na região: Lara Cabezas et al. (2000) encontraram até 1,5m de profundidade, entre 1% e 5% do N-fertilizante aplicado em cobertura, na forma mineral, dependendo da fonte e forma de aplicação; Coelho et al. (1991) avaliaram o solo até 1,5m de profundidade e verificaram que cerca de 5% do N-fertilizante aplicado em cobertura se encontravam em formas inorgânicas. Considerando que abaixo de 0,1m de profundidade a atividade microbiana é mínima, não havendo, portanto, imobilização de N (o N permanece em formas minerais), há indicação de que o processo de lixiviação pode não ser relevante em solos de cerrado em determinadas situações.

No total, Lara Cabezas et al. (2000) observaram que ao final do ciclo do milho entre 53% e 70% do nitrogênio aplicado estava presente na planta e no solo; Coelho et al. (1991), por sua vez, encontraram 80% do N aplicado, seja na planta ou no solo, em formas orgânicas ou minerais, indicando que perdas gasosas de nitrogênio podem ser relevantes.

Ainda de acordo com a Tabela 7, dos 80kg.ha⁻¹ de N-fertilizante aplicados, cerca de 8kg.ha⁻¹ se encontravam imobilizados, no tratamento com uréia aplicada em pré-semeadura ou cobertura, no período de florescimento, enquanto nos tratamentos com sulfato de amônio ficou abaixo dos 4,8kg.ha⁻¹ no mesmo período.

A recuperação do N-fertilizante do sulfato de amônio variou de 41,2 a 45,7kg.ha⁻¹ para a sua aplicação em cobertura e pré-semeadura, respectivamente. A recuperação do nitrogênio fertilizante foi menor para a uréia, principalmente

quando aplicada em pré-semeadura, em que apenas 22,7kg.ha⁻¹, ou 28%, foram absorvidos pela planta. No estágio de florescimento, o nitrogênio total no milho em todos os tratamentos era de 154 a 160kg.ha⁻¹, com exceção do tratamento com uréia em pré-semeadura, em que o N total na planta foi de 106 kg.ha⁻¹, provavelmente em razão das maiores perdas por via gasosa e lixiviação do N-fertilizante. Andrade et al. (1975), em diferentes híbridos de milho, verificaram que no florescimento o teor de N total na planta variou de 140 a 180kg.ha⁻¹ para uma produtividade que oscilou entre 5.600 e 6.700kg.ha⁻¹, valores compatíveis com os encontrados no experimento aqui discutido, mas que estão muito acima do nitrogênio presente no milho quando a uréia foi colocada em pré-semeadura.

TABELA 7. Destino do nitrogênio mineral no solo proveniente do fertilizante (Nm_{spf}), nitrogênio imobilizado proveniente do fertilizante (Ni_{spf}) e do nitrogênio na planta proveniente do fertilizante (N_{ppf}), no estágio de florescimento do milho, a partir da aplicação de 80kg.ha⁻¹ de N, na forma de sulfato de amônio ou uréia aplicados em pré-semeadura ou em cobertura.

Pool	S.A.pré	S. A.-cobertura	Uréia-pré	Uréia-cobertura
	kg.ha ⁻¹			
N _{m_{spf}}	0,1	0,1	0,1	0,4
Ni _{spf}	4,8	2,4	7,9	7,8
N _{ppf}	45,7	41,2	22,7	33,2
Total	50,6	43,7	30,7	41,4

Dessa forma, percebe-se que a aplicação de uréia em pré-semeadura foi o tratamento menos vantajoso, pois foi onde o milho apresentou o maior teor de N imobilizado e a menor recuperação pela planta (Tabela 7).

Ladd & Amato (1986) verificaram que a recuperação pelo trigo, de uma mesma dose de N, aplicada na forma de uréia, amônio e nitrato, imediatamente antes da semeadura, foi de aproximadamente 50%, encontrando-se no solo e na

planta 80% do N-fertilizante aplicado, independente da fonte. Para o sulfato de amônio, Jokela & Randall (1997) observaram que, em diferentes solos, safras, doses e épocas de aplicação (no plantio ou no estágio de 8 folhas), o N-fertilizante recuperado pelo milho e encontrado no solo foi de aproximadamente 80% no período de colheita do milho.

Assim, se apenas uma parte do N aplicado como fertilizante está imobilizada no solo, no sulco de aplicação do adubo, pode ser uma indicação da ocorrência de perdas gasosas como a desnitrificação e/ou movimentação do nitrogênio com a água para camadas distantes do sistema radicular do milho. Isso pode justificar a maior ou menor eficiência de recuperação do N de uma determinada fonte a partir de seu manejo e comportamento no solo, em uma dada condição edafoclimática.

4.4 Produtividade do milho

A produtividade do milho, determinada a partir da utilização de sulfato de amônio e uréia em pré-semeadura ou cobertura, é mostrada na Figura 3. Os resultados indicaram que, independente da época de aplicação do N-fertilizante, a produtividade do milho, quando se usou sulfato de amônio, foi estatisticamente maior em relação à uréia. Dessa forma, as diferenças de produtividade não foram devidas às épocas de aplicação do N, e sim às características das fontes utilizadas.

A presença do enxofre (24%) no sulfato de amônio aplicado em pré-semeadura ou em cobertura pode ter favorecido essa fonte em relação à uréia na produtividade do milho, pois aplicaram-se, além dos $27\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de S na semeadura, $96\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de enxofre, o que pode ter feito a diferença para a cultura do milho, no estágio em que a acumulação de S foi máxima, 100 dias após a germinação.

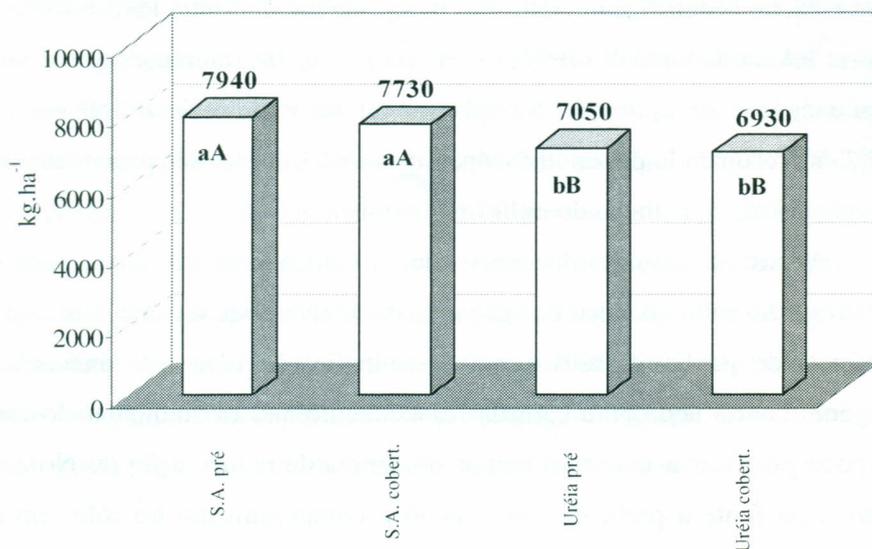


FIGURA 3. Produtividade do milho, com a aplicação de sulfato de amônio (S.A.) e uréia em pré-semeadura (p e cobertura, onde letras minúsculas iguais indicam que não existe diferença significativa dentro de uma mesma fonte para diferentes épocas de aplicação de N e letras maiúsculas diferentes indicam que existe diferença significativa entre as fontes dentro de uma mesma época de aplicação, pelo teste de Tukey a 5 % probabilidade.

Apesar dessas considerações, a Tabela 8 mostra que a concentração de enxofre foliar entre os tratamentos é semelhante, e estatisticamente não existem diferenças entre eles, além de estar dentro dos níveis considerados ideais para o S no milho, que variam entre 1,0 e 2,0 g.kg⁻¹ de massa seca (Comissão...,1999). O fósforo, o potássio e o cálcio também apresentaram concentração ideal, já o magnésio mostrou deficiência, variando entre 1,6 g.kg⁻¹ e 1,8 g.kg⁻¹, quando o recomendado é de 2,5 g.kg⁻¹ a 4,0 g.kg⁻¹. Entretanto a falta deste nutriente foi igual para todos os tratamentos, não podendo ser a justificativa para as diferenças de produtividades entre as fontes nitrogenadas.

Uma possibilidade a ser levantada é a de que a amostragem foliar, que ocorreu por volta de 50 dias após a germinação do milho, aconteceu em um

momento em que ainda havia nitrogênio disponível no solo, proveniente da adubação de semeadura, onde se aplicaram $112\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de S.A., o equivalente a $27\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de enxofre. Andrade et al. (1975), em cinco diferentes híbridos de milho, observaram que 50 dias após a germinação, as plantas haviam acumulado, em média, $10\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de enxofre, e aos 100 dias após a germinação, chegou-se a $23,5\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de S acumulado. Em um dos híbridos que se destacou, aos 50 dias após a germinação, a quantidade de S por ele acumulada atingiu os $10\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, mas, aos 100 dias, este híbrido totalizava $40\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de enxofre acumulado. Isso mostra que pelo menos 60% do enxofre absorvido pelo milho aconteceu após a amostragem para análise foliar.

TABELA 8. Concentração de macronutrientes, a partir de análise foliar, para a cultura do milho, com a aplicação de sulfato de amônio (S.A.) e uréia em pré-semeadura (pré) ou em cobertura (cobert.)¹.

Tratamento	N	P	K	Ca	Mg	S
	g.kg ⁻¹					
S.A. pré	35,4 a	2,8	18,5	5,3	1,8	1,8
S.A. cobert.	35,3 a	3,2	21,8	5,0	1,6	2,3
Uréia pré	29,8 b	2,8	20,5	4,8	1,8	1,7
Uréia cobert.	30,2 b	2,7	20,2	4,8	1,6	1,6

1. Letras minúsculas diferentes em uma mesma coluna indicam que existe diferença significativa entre os tratamentos, e a ausência de letras minúsculas mostra que não existe diferença significativa pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Como o enxofre é imóvel na planta, ou seja, não se transloca das folhas mais velhas para as mais novas (Raij, 1991), caso o estoque do solo se esgote

após o período de amostragem foliar, o milho irá apresentar deficiência de enxofre.

Então, os dados de suficiência de S no milho, vistos na Tabela 8, podem ser válidos somente até o momento da amostragem foliar para aqueles tratamentos que receberam S apenas na semeadura, pois a partir dos 50 dias após a germinação, o estoque de S no solo poderia ser pequeno, seja por imobilização, lixiviação ou pela absorção do milho, afetando a formação dos sistemas reprodutivos e enchimento dos grãos, diminuindo assim a produtividade.

Além disso, a biomassa microbiana também imobiliza o enxofre, (Wu et al., 1995), tornando-o fator limitante ao seu desenvolvimento. Assim, a deficiência de enxofre restringe a decomposição de palhada e matéria orgânica, (Chapman, 1997), o que, por sua vez, irá diminuir a liberação de outros nutrientes, principalmente nitrogênio, às plantas.

Outro dado a ser notado na Tabela 8 é que, pela análise foliar, a concentração de nitrogênio foi maior no milho quando se aplicou sulfato de amônio, seja em pré-semeadura ou em cobertura, em relação à uréia, apesar de, em todos os tratamentos, a concentração de N se encontrar dentro ou até acima do recomendado (Comissão...,1999). Segundo Marschner (1997), o enxofre possui papel fundamental na assimilação de N pelas plantas, o que por sua vez também pode ter influenciado na produtividade da cultura.

CONCLUSÕES

O processo de imobilização não se caracterizou como um fator de restrição à produtividade do milho, seja para o nitrogênio aplicado em pré-semeadura ou em cobertura.

Os fatores limitantes ao aproveitamento do nitrogênio do fertilizante pelo milho estiveram relacionados com o comportamento no solo das fontes utilizadas e com as perdas por lixiviação e por via gasosa.

Independente da época de aplicação do nitrogênio, a produtividade do milho foi maior quando se utilizou como fonte o sulfato de amônio, e não a uréia.

LITERATURA CITADA

ALFAIA, S.S. Mineralização do nitrogênio incorporado como material vegetal em três solos da Amazônia Central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, p.387-392, 1997a.

ALFAIA, S.S. Destino de adubos nitrogenados marcados com ^{15}N em amostras de dois solos da Amazônia central. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, p.379-385, 1997b.

ANDRADE, A.G.; HAAG, H.P.; OLIVEIRA, G.D; SARRUGE, J.R. Acumulação diferencial de nutrientes por cinco cultivares de milho (*Zea mays* L.) I - Acumulação de macronutrientes. In: **ANAIS DA ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA "LUIZ DE QUEIROZ"**, PIRACICABA, p. 115-149, 1975.

ASSAD, E.D. Análise do risco climático do plantio à colheita. In: LANDERS, J.N. **Fascículo de experiências de plantio direto no cerrado**. 2 ed. Goiânia: Associação de Plantio Direto no Cerrado, 1995. p. 167-196.

BASSO, C.J.; CERETTA, C.A. Manejo do nitrogênio no milho em sucessão a plantas de cobertura de solo, sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, p.905-915, 2000.

BAKER, J.L.; TIMMONS, D.R. Fertilizer management effects on leaching of labeled nitrogen for no-till corn in field lysimeters. **Journal of Environmental Quality**, v.23, p.305-310, 1994.

BARRACLOUGH, D. The use of mean pool abundances to interpret ^{15}N tracer experiments - I. Theory. **Plant and Soil**, v. 131, p. 89-96, 1991.

BARRACLOUGH, D. ^{15}N isotope dilution techniques to study soil nitrogen transformations and plant uptake. **Fertilizer Research**, v. 42, p. 185 - 192, 1995.

BARRADAS, C.A.A.; FREIRE, L.R.; ALMEIDA, D.L.; De-POLLI, H. Comportamento de adubos verdes de inverno na região serrana fluminense. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.36, n.12, p. 1461-1468, dezembro/2001.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. Sistemas de manejo do solo e seus efeitos sobre o rendimento do milho. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.28, n.1, p.23 - 28, 1998.

BARRET, J.E.; BURKE, I.C. Potential nitrogen immobilization in grassland soils across a soil organic matter gradient. **Soil Biology and Biochemistry**, v.32, p. 1707-1716, 2000.

BIGERIEGO, M.; HAUCK, R.D.; OLSON, R.A. Uptake, translocation and utilization of N-depleted fertilizer in irrigated corn. **Soil Science Society of America Journal**, v.43, p.528-533, 1979.

BJARNASON, S. Calculation of gross immobilization and mineralization in soil. **Journal of Soil Sciences**, v.39, p.393-406, 1988.

BODDEY, R.M.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S. Métodos de estudo da origem do nitrogênio em planta. In: I SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE NITROGÊNIO EM PLANTAS. **Anais**. Itaguaí: UFRJ, 1991. p. 322-342.

BORTOLINI, C.G.; SILVA, P.R.F.; ARGENTA, G.; FORSTHOFER, E.L. Rendimento de grãos de milho cultivado após aveia-preta em resposta a adubação nitrogenada e regime hídrico. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, n.9, p. 1101-1106, setembro 2001.

BORTOLUZZI, E. C.; ELTZ, F.L.F. Manejo da palha de aveia preta sobre as plantas daninhas e rendimento de soja em semeadura direta. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.31, n.2, p.237-243, 2001.

BRADY, N.C. **Natureza e propriedades dos solos**. 7 ed.. Rio de Janeiro: Livraria Freitas Bastos, 1989. 898p.

CATTELAN, A.J.; GAUDÊNCIO, C.A.; SILVA, T.A. Sistemas de rotação de culturas em plantio direto e os microrganismos do solo, na cultura da soja, em Londrina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.21, p.293-301, 1997.

CERETTA, C.A.; FRIES, M.R. Adubação nitrogenada no sistema de plantio direto. In: NUERNBERG, N.J. **Conceitos e fundamentos do sistema plantio direto**. Lages: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Regional Sul, 1998. p. 111-120.

CHAPMAN, S.J. Carbon substrate mineralization and sulphur limitation. **Soil Biology and Biochemistry**, v.29, n.2, p. 115-122, 1997.

CHICHESTER, F.W.; LEGG, J.O.; STANFORD, G. Relative mineralization rates of indigenous and recently incorporated ^{15}N -labeled. **Soil Science**, v.120, n.6, p.455-460, 1975.

COELHO, A.M.; FRANÇA, G.E.; BAHIA, A.F.C.; GUEDES, G.A.A. Balanço de nitrogênio(^{15}N) em um Latossolo Vermelho-Escuro, sob vegetação de cerrado, cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.15, p.187-193, 1991.

COELHO, A.M.; FRANÇA, G.E.; BAHIA, A.F.C.; GUEDES, G.A.A. Doses e métodos de aplicação de fertilizantes nitrogenados na cultura do milho sob irrigação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.16, p.61-67, 1992.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO DE MINAS GERAIS. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais. 5ª Aproximação**, Viçosa, 1999. 359p.

CROZIER, C.R.; KING, L.D.; VOLK, R.J. Tracing nitrogen movement in corn production systems in the North Carolina Piedmont: a nitrogen-15 study. **Agronomy Journal**, v.90, p.171-177, 1998.

EMBRAPA. **Recomendações técnicas para a cultura da soja na região central do Brasil - 1997/1998**. EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Soja. Londrina, 1997.171p.

ERREBHI, M.; ROSEN, C.J.; GUPTA, S.C.; BIRONG, D.E. Potato yield response and nitrate leaching as influenced by nitrogen management. **Agronomy Journal** , v.90, n.1, p.10-15, 1998.

FANCELLI, A.L.; DOURADO-NETO, D. Fenologia do milho In: YAMADA, T. **O nitrogênio e o potássio na adubação da cultura do milho**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, n.78, junho/1997. (Informações Agronômicas).

FANCELLI, A.L.; DOURADO-NETO, D. Milho: fisiologia da produção e produtividade. In: **Milho: adubação e produtividade**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" -USP, 2001. p. 25-47.

FAO, FAOSTAT: Statistics database. <http://apps.fao.org>. 2002

FERNANDES, F.M.; HECKLER, J.C. Comportamento da soja após milho safrinha, trigo, aveia e nabo forrageiro. **Revista Plantio Direto**, n.57, p.24, maio/junho 2000.

FIRESTONE, M.K. Biological denitrification. In: STEVENSON, F.J. **Nitrogen in agricultural soils**. 2 ed. Madison, American Society of Agronomy, 1982. p. 289-326. 940p.

FLOSS, E.L. Aveia e semeadura direta: cobertura e renda. **Revista Plantio Direto**, n.56, p.21-28, março/abril 2000a.

FLOSS, E.L. Benefícios da biomassa de aveia ao sistema de semeadura direta. **Revista Plantio Direto**, n.57, p.25-29, maio/junho 2000b.

FRANCIS, D.D.; DORAN, J.W.; LOHRY, R.D. Immobilization and uptake of nitrogen applied to corn as starter fertilizer. **Soil Science Society of America Journal** v.57, p.1023-1026, 1993.

FRANZLUEBBERS, A.J.; HONS, F.M.; ZUBERER, D.A. Soil organic carbon, microbial biomass, and mineralizable carbon and nitrogen in sorghum. **Soil Science Society of America Journal**, v.59, p.460-466, 1995.

FREY, S.D.; ELLIOT, E.T.; PAUSTIAN, K; PETERSON, G.A. Fungal translocation as a mechanism for soil nitrogen inputs to surface residue decomposition in a no-tillage agroecosystem. **Soil Biology and Biochemistry**, v.32, p. 689 - 698, 2000.

GASSEN, D.; GASSEN, F. **Plantio direto, o caminho do futuro**. 1 ed.. Passo Fundo: Aldeia Sul Editora, 1996. 207p.

GONÇALVES, C.N.; CERETTA, C.A. Plantas de cobertura de solo antecedendo o milho e seu efeito sobre o carbono orgânico do solo, sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, p.307-313, 1999.

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 no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, p.153-159, 2000.

GREEN, C.J.; BLACKMER, A.M. Residue decomposition effects on nitrogen availability to corn following corn or soybean. **Soil Science Society of America Journal**, v.59, p.1065-1070, 1995.

IFA, International Fertilizer Industry Association. Statistics. www.fertilizer.org/ifa. 2002.

HEINRICHES, R.; FANCELLI, A.L. Influência do cultivo consorciado de aveia preta (*Avena strigosa* Schieb) e ervilhaca comum (*Vicia sativa* L.) na produção de fitomassa e no aporte de nitrogênio. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.56, n.1, 1999. (www.scielo.br)

JANSSON, S.L.; PERSSON, J. Mineralization and immobilization of soil nitrogen. In: STEVENSON, F.J. **Nitrogen in agricultural soils**. 2 ed. Madison, American Society of Agronomy, 1982. P. 229-252. 940p.

JOKELA, W.E.; RANDALL, G.W. Fate of fertilizer nitrogen as affected by time and rate of application on corn. **Soil Science Society of America Journal**, v.61, p.1695-1703, 1997.

KARLEN, D.L.; HUNT, P.G.; MATHENY, T.A. Fertilizer ¹⁵nitrogen recovery by corn, wheat, and cotton grown with and without pre-plant tillage on Norfolk loamy sand. **Crop Science**, v.36, p.975-981, 1996.

KEENEY, D.R.; NELSON, D.W. Nitrogen-inorganic forms. In: PAGE, A.L.; MILLER, R.H.; KEENEY, D.R. **Methods of soil analysis, part 2. Chemical and microbiological properties**. 2 ed. Madison: American Society of Agronomy, 1982. P. 643-698.

KITUR, B.K.; SMITH, M.S.; BLEVINS, R.L.; FRYE, W.W. Fate of ^{15}N depleted ammonium nitrate applied to no-tillage and conventional tillage corn. **Agronomy Journal**, v.76, p.240-242,1984.

KOWALENKO, C.G. Nitrogen transformations and transport over 17 months in field fallow microplots using ^{15}N . **Canadian Journal of Soil Science**, v.58, p.69-76,1978.

KOWALENKO, C.G.; CAMERON, D.R. Nitrogen transformations in soil-plant systems in three years of field experiments using tracer and non-tracer methods on an ammonium-fixing soil. **Canadian Journal of Soil Science**, v.58, n.2 p.195-208,1978.

LADD, J.N.; AMATO, M. The fate of nitrogen from legume and fertilizer sources in soils successively cropped with wheat under field conditions. **Soil Biology and Biochemistry**, v.18, n.4, p. 417-425, 1986.

LANDERS, J.N. **Fascículo de experiências de plantio direto no cerrado**. 2 ed. Goiânia: Associação de Plantio Direto no Cerrado, 1995. 261p.

LAPEDES, D.N D. **McGraw-Hill dictionary of scientific and technical terms**. 2 ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1978. 1832p.

LARA CABEZAS, W.A.R.; KORNDORFER, G.H.; MOTTA, TRIVELIN, P.C.O. Volatilização de N-NH₃ na cultura do milho: I. efeito da irrigação e substituição parcial da uréia por sulfato de amônio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, p.481-487, 1997a.

LARA CABEZAS, W.A.R.; KORNDORFER, G.H.; MOTTA, TRIVELIN, P.C.O. Volatilização de N-NH₃ na cultura do milho: II. avaliação de fontes sólidas e fluidas em sistema de plantio direto e convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, p.489-496, 1997b.

LARA CABEZAS, W.A.R.; TRIVELIN, P.C.O.; KORNDORFER, G.H.; PEREIRA, S. Balanço da adubação nitrogenada sólida e fluida de cobertura na cultura de milho, em sistema de plantio direto no Triângulo Mineiro (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, p.363-376, 2000.

LARA CABEZAS, W.A.R. Possibilidades de aplicação de nitrogênio em sistema de plantio direto. In: FANCELLI, A.L.; DOURADO-NETO, D. **Milho: adubação e produtividade**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" -USP, 2001. p. 138-178.

LEDGARD, S.F.; JARVIS, S.C.; HATCH, D.J. Short term nitrogen fluxes in grassland soils under different long-term nitrogen management regimes. **Soil Biology and Biochemistry**, v.30, n.10/11, p. 1233-1241, 1998.

LEGG, J.O.; MEISINGER, J.J. Soil nitrogen budgets. In: STEVENSON, F.J. **Nitrogen in agricultural soils**. 2 ed. Madison, American Society of Agronomy, 1982. p. 503-566. 940p.

LIBARDI, P.L. Balanço de nitrogênio em culturas agrícolas e desvios encontrados na sua quantificação. Piracicaba, Esalq, 1984.113p. (Tese de Livre-Docência)

MAPA, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Estatísticas**. www.agricultura.gov.br, 2002.

MATTOS JÚNIOR, D.; CANTARELLA, H.; RAIJ van, B. Manuseio e conservação de amostras de solo para preservação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.19, p.423-431, 1995.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2 ed. London: Academic Press Limited, 1997. 889p.

McCARTY, G.W.; MEISINGER, J.J. Effects of fertilizer treatments on biologically active N pools in soils under plow and no tillage. **Biol. Fertil Soils**, v.24, p.406-412, 1997.

McKENNEY, D.J.; WANG, S.W.; DRURY, C.F.; FINDLAY, W.I. Denitrification, immobilization, and mineralization in nitrate limited and nonlimites residue-amended soil. **Soil Science Society of America Journal**, v.59, p.118-124, 1995.

MELO FILHO, G.A.M.; RICHETTI, A. Estimativa de custo de produção de milho 1ª safra, 2001/2002, em Mato Grosso do Sul. **Comunicado Técnico, 42**. 2001. www.cpa0.embrapa.br/publicacoes/custodeproducao

MEIRELLES, N.M.F.; LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K. Absorção e lixiviação de nitrogênio em cultura de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.4, n.2, p.83-88, 1980.

MUCHOW, R.C. Nitrogen utilization efficiency in maize and grain sorghum. **Soil Biology and Biochemistry**, v.56, p. 209-216, 1998.

NELSON, D.W. Gaseous losses of nitrogen than through denitrification. In: STEVENSON, F.J. **Nitrogen in agricultural soils**. 2 ed. Madison, American Society of Agronomy, 1982. p. 327-363. 940p.

NORMAND, B.; RECOUS, S.; VACHAUD, G.; KENGNI, L.; GARINO, B. Nitrogen-15 tracers combined with tensio-neutronic method to estimate the nitrogen balance of irrigated maize. **Soil Science Society of America Journal**, v.61, p.1508-1518, 1997.

OLSON, R.A. Fate of tagged nitrogen fertilizer applied to irrigated corn. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p.514-517, 1980.

OMAY, A.B.; RICE, C.W.; MADDUX, L.D.; GORDON, W.B. Corn yield and nitrogen uptake in monoculture and in rotation with soybean. **Soil Science Society of America Journal**, v.62, p.1596-1603, 1998.

OVERMAN, A.R.; WILSON, D.M.; KAMPRATH, E.J. Estimation of yield and nitrogen removal by corn. **Agronomy Journal**, v.86, p.1012-1016, 1994.

OWENS, L.B.; EDWARDS, W.M.; SHIPITALO, M.J. Nitrate leaching through lysimeters in a corn-soybean rotation. **Soil Science Society of America Journal** , v.59, p.902-907, 1995.

PAULETTI, V.; COSTA, L.C. Época de aplicação de nitrogênio no milho cultivado em sucessão à aveia preta no sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.30, n.4, p.599-603, 2000.

PAVINATO, A.; AITA, C.; CERETTA, C.A.; BEVILÁQUA, G.P. Resíduos culturais de espécies de inverno e o rendimento de grãos de milho no sistema de cultivo mínimo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.29, n.9, p. 1427-1432, setembro/1994.

PORTER, L.K.; FOLLET, R.F.; HALVORSON, A.D. Fertilizer nitrogen recovery in a no-till wheat-sorghum-fallow-wheat sequence. **Agronomy Journal** , v.88, p.750-757,1996.

PURI, G.; ASHMAN, M.R.; Microbial immobilization of ¹⁵N-labelled ammonium and nitrate in a temperate woodland soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v.31, p. 929-931, 1999.

QIAN, J.H.; DORAN, J.W.; WALTERS, D.T. Maize plant contributions to root zone available carbon and microbial transformations of nitrogen. **Soil Biology and Biochemistry**, v.29, p. 1451-1462, 1997.

RAIJ, B. van **Fertilidade do solo e adubação**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 1991. 343p.

RAUN, W.R.; JOHNSON, G.V. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. **Agronomy Journal**, v.91, p.357-363,1999.

RECOUS, S.; MACHET, J-M., Short immobilization and crop uptake of fertilizer nitrogen applied to winter wheat: effect of date of application in spring. **Plant Soil**, v. 206, p. 137-149, 1999.

REDDY, G.B.; REDDY, K.R. Fate of nitrogen-15 enriched ammonium nitrate applied to corn. **Soil Science Society of America Journal**, v.57, p.111-115,1993.

REICHARDT, K.; LIBARDI, P.L.; VICTORIA, R.L.; VIEGA, G.P. Dinâmica do nitrogênio num solo cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.3, n.1, p.17-20, 1979.

REMBON, F.S.; MACKENZIE, A.F. Soybean nitrogen contribution to corn and residual nitrate under conventional tillage and no-till. **Canadian Journal of Soil Science**, v.77, p.543-551, 1997.

RENNIE, D.A.; PAUL, E.A.; JOHNS, L.E. Natural nitrogen-15 abundance of soil and plant samples. **Canadian Journal of Soil Science**, v.56, p.43-50, 1976.

ROLSTON, D.E.; FRIED, M.; GOLDHAMER, D.A. Denitrification measured directly from nitrogen and nitrous oxide gas fluxes. **Soil Science Society of America Journal**, v.40, p.259-115-266, 1976.

RODRIGUES, M.B.; KIEHL, J.C. Distribuição e nitrificação da amônia proveniente da uréia aplicada ao solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.16, p.403-408, 1992.

ROSSETO, C.A.V.; NAKAGAWA, J. Época de colheita e desenvolvimento vegetativo de aveia preta. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.58, n.4, p. 731-736. 2001. (www.scielo.br)

SÁ, J.C.M. **Manejo de nitrogênio na cultura de milho no sistema plantio direto**. Passo Fundo: Aldeia Norte Editora, 1996. 24p.

SALTON, J.C. Opções de safrinha para agregação de renda nos cerrados. In: LARA CABEZAS, W.A.R; FREITA, P.L. **Plantio direto na integração lavoura-pecuária**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2000. p. 179-188.

SAMATER, A.H.; VAN CLEEMPUT, O.; ERTEBO, T. Influence of the presence of nitrite and nitrate in soil on maize biomass production, nitrogen immobilization and nitrogen recovery. **Biol. Fertil Soils**, v.27, p.211-218, 1998.

SAMPAIO, E.V.B.; SALCEDO, I.H. Mineralização e absorção por milho do nitrogênio do solo, da palha de milho-(15N) e da uréia-(15N). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.17, p.423-429, 1993.

SANTOS, H.P. Soja em sucessão a aveia branca, aveia preta, azevém e trigo: características agronômicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.26, n.9, p. 1563-1576, setembro/1991.

SCHUCH, L.O.B.; NEDEL, J.N.; ASSIS, F.N.; MAIA, M.S. Vigor de sementes e análise de crescimento de aveia preta. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.57, n.2, 2000. (www.scielo.br)

SPEHAR, C.R.; LARA CABEZAS, W.A.R Introdução e seleção de espécies para a diversificação do sistema produtivo nos cerrados. In: LARA CABEZAS, W.A.R; FREITA, P.L. **Plantio direto na integração lavoura-pecuária**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2000. p. 179-188.

STEVENSON, D.S.; NEILSEN, G.H. Nitrogen additions and losses to drainage in orchard-type irrigated lysimeters. **Canadian Journal of Soil Science**, v.70, n.1, p.11-19. 1990.

STEVENSON, F.J.; COLE, M.A. **Cycles of soil: carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients**. 2 ed. New York: John Wiley & Sons, 1999. 427p.

SYNGENTA, www.syngentaseeds.com.br/produtos, 2002.

TIMMONS, D.R.; CRUSE, R.M. Effect of fertilization method and tillage on nitrogen-15 recovery by corn. **Agronomy Journal** , v.82, p.777-784, 1990.

TIMMONS, D.R.; CRUSE, R.M. Residual nitrogen-15 recovery by corn as influenced by tillage and fertilization method. **Agronomy Journal** , v.83, p.357-363,1991.

TISDALE, S.L.; NELSON, W.L.; BEATON, J.D. **Soil fertility and fertilizers**. 4 ed. New York: Macmillan Publishing Company, 1984. p. 112-188 754p.

TRAN, T.S.; GIROUX, M. Fate of ^{15}N -labelled fertilizer applied to corn grown on different soil types. **Canadian Journal of Soil Science**, v.78, p.597-605,1998.

TREHAN, S.P. Immobilization of $^{15}\text{NH}_4^+$ in three soils by chemical and biological processes. **Soil Biology and Biochemistry**, v.28, n.8, p. 1021-1027, 1996.

TRIVELIN, P.C.O.; SALATIE.; MATSUI,E. **Preparo de amostras para análise de ^{15}N por espectrometria de massas**. BT-002, Piracicaba, CENA, 1973,41p.

VARCO, J.J.; FRYE, W.W.; SMITH, M.S.; MacKOWN, C.T. Tillage effects on legume decomposition and transformation of legume and fertilizer nitrogen-15. **Soil Science Society of America Journal**, v.57, p.750-756,1993.

VARVEL, G.E.; PETERSON, T.A. Nitrogen fertilizer recovery by corn in monoculture and rotation systems. **Agronomy Journal** , v.82, p.935-938,1990.

VERHAGEN, F.J.M.; HAGEMAN, P.E.J.; WOLDENDORP, J.W.; LAANBROEK, H.J. Competition for ammonium between nitrifying bacteria and plant roots in soil in pots; effects of grazing by flagellates and fertilization. **Soil Biology and Biochemistry**, v.26, n.1, p.89-96, 1994.

WILD, A. **Russell's soil conditions and plant growth**. 11 ed. England: Longman Group UK Limited, 1988. 991p.

WISNIEWSKI, C.; HOLTZ, G.P. Decomposição da palhada e liberação de nitrogênio e fósforo numa rotação aveia-soja sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.32, n.11, novembro/1997.

WOLF, I.; RUSSOW, R. Different pathways of formation of N_2O , N_2 e NO in black earth soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v.32, p. 229-239, 2000.

WU, J.; O'DONNELL, A.G.; SYERS, J.K. Influences of glucose, nitrogen and plant residues on the immobilization of sulphate-S in soil. **Soil Biology and Biochemistry**, v.27, n.11, p.1363-1370, 1995.

ZANTUA, M.I.; BREMNER, J.M. Production and persistence of urease activity in soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v., p. 369-374, 1976.

ZHOU, X.; LEIBOVITH, S.; MACKENZIE, A.F.; MADRAMOOTOO, C.A.; DUTILLEUL, P.; SMITH, D.L. Confined microplot size for nitrogen-15 uptake by corn plants in a corn intercrop system. **Agronomy Journal**, v.90, p.155-161, 1998.