Universidade de São Paulo
Centro de Energia Nuclear na Agricultura

EDSON CABRAL DA SILVA

**Manejo da adubação nitrogenada e utilização do nitrogênio (^{15}N)
da uréia, do milho e da crotalária pelo milho sob semeadura
direta em solo de cerrado**

Piracicaba
Estado de São Paulo – Brasil
Abril - 2005

EDSON CABRAL DA SILVA
Engenheiro Agrônomo

**Manejo da adubação nitrogenada e utilização do nitrogênio (^{15}N)
da uréia, do milho e da crotalária pelo milho sob semeadura
direta em solo de cerrado**

Tese apresentada ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura, da Universidade de São Paulo, para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de concentração: Energia Nuclear na Agricultura.

Orientador: Prof. Dr. Takashi Muraoka

Piracicaba
Estado de São Paulo - Brasil
Abril - 2005

**AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES
TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA
FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE - O AUTOR.**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Seção Técnica de Biblioteca – CENA/USP

Silva, Edson Cabral da.

Manejo da adubação nitrogenada e utilização do nitrogênio (^{15}N) da uréia, do
milheto e da crotalária pelo milho sob semeadura direta em solo de cerrado /
Edson Cabral da Silva; orientador Takashi Muraoka. - Piracicaba, 2005.

111 f. : fig.

Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Ciências. Área de
Concentração: Energia Nuclear na Agricultura) – Centro de Energia Nuclear na
Agricultura da Universidade de São Paulo.

1. Dose de nitrogênio. 2. Época de aplicação de nitrogênio. 3. Adubo verde
marcado. 4. Pousio. 5. Matéria orgânica do solo. 6. Efeito residual de nitrogênio.
7. Sistema plantio direto.

CDU 621.039.8:631.8

A DEUS, por me conceder força, saúde e sabedoria para buscar os meus ideais; permitindo-me crescer profissional e espiritualmente; aos meus pais, **Orlando e Antônia**, lavradores incansáveis que com os seus conhecimentos “empíricos” muito me ensinaram e, à minha esposa, **Lázara Maria**, com amor, admiração e gratidão pela sua compreensão, carinho e incentivos,

DEDICO

Aos meus irmãos, Eleuza, Sebastião, Euzamar (*in memorium*), Adelson, Maria Helena, Edmar, aos meus queridos sobrinhos, cunhados e minha sogra, pelo apoio, incentivos e amizade,

OFEREÇO

A todos os meus ex-professores, especialmente àqueles mediadores da minha formação em Ciências Agrárias, da Escola da Agrotécnica Federal de Rio Verde, Goiás; Escola Superior de Ciências Agrárias de Rio Verde, Goiás - ESUCARV/FESURV; Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - FEIS/UNESP; Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - ESALQ/USP e do Centro de Energia Nuclear na Agricultura - CENA/USP,

MINHA HOMENAGEM E ETERNA GRATIDÃO

AGRADECIMENTOS

Para que a presente Tese de Doutorado pudesse evoluir e ser concluída foi necessária à participação de instituições e de pessoas, às quais desejo expressar os meus sinceros agradecimentos:

Ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura, da Universidade de São Paulo - CENA/USP, pela oportunidade de realização do curso de Doutorado e condições de trabalho ao longo do curso;

Ao Professor Dr. Takashi Muraoka, pela excelente orientação, ensinamentos, exemplos e amizade e, sobretudo, pelo brilhante profissionalismo;

À Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, da Universidade Estadual Paulista - FEIS/UNESP, por nos colocar à disposição a área experimental, máquinas e implementos para a condução dos ensaios de campo;

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP, pela concessão da bolsa de Doutorado e apoio financeiro (Processo 01/02427-4), possibilitando a realização desta pesquisa;

À International Atomic Energy Agency - IAEA, pela concessão do nitrogênio marcado (^{15}N) para a condução do experimento (Processo BRA. 10954/RB);

Ao Conselho de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela concessão de bolsa de estudo na fase inicial do curso (Processo: 142114/2001-4);

Ao professor Dr. Salatiér Buzetti, pelos ensinamentos, exemplos e amizade e pelo apoio na condução dos ensaios e valiosas sugestões no desenvolvimento do trabalho;

Aos professores Dr. Paulo César Ocheuze Trivelin e Dra. Marisa Pícolo, pelos ensinamentos, amizade sugestões e colaboração para a realização da presente pesquisa.

Aos meus grandes amigos Marcelo Moraes e Patrícia Kompier e à sua família, pela afetuosa amizade e incentivos, com exemplos de inteligência, luta e dedicação;

Aos meus amigos Marco Emanuel e Madaila Veloso, Francisco Ednaldo e Francilene, Miguel e Cristiane, Rodrigo e Priscylla, Luis Gonzaga e Cleide, Nildo, Geovane, Dolorice, Ananda, Simão, Anderson e Felipe, pelo companheirismo e os bons momentos de convivência, fundamentais ao êxito no curso;

Aos Funcionários da Seção de Fertilidade do Solo, Maria Aparecida Callegaro, Sandra Tereza Pereira, Marileusa A. Bassi, Henriqueta e João Salvador, pela amizade e auxílio na realização das análises laboratoriais;

Aos funcionários da Biblioteca do CENA/USP pelo cordial atendimento, em especial à Sra. Marília, pelas correções e normatização das referências bibliográficas;

Às Funcionárias da Seção de Pós-Graduação do CENA/USP, Neuda, Regina, Alzira, Claudia e Cristina pelo cordial atendimento e amizade;

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para realização desta Tese, meus sinceros agradecimentos.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	xi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xiii
RESUMO.....	xiv
ABSTRACT	xvi
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 Aspectos gerais e ecofisiológicos sobre a cultura do milho	3
2.2 Cultivo do milho na região do cerrado	4
2.3 Ciclo biogeoquímico do nitrogênio em agroecossistemas	5
2.3.1 Mineralização e imobilização do nitrogênio	7
2.3.2 Perdas de nitrogênio no solo.....	8
2.4 Recomendação de nitrogênio para a cultura do milho	10
2.5 Manejo do nitrogênio nos sistemas de produção agrícola.....	14
2.6 Uso de plantas de coberturas (adubos verdes) nos agroecossistemas	20
2.7 Método do traçador isotópico para nitrogênio – Princípio da diluição isotópica.....	23
2.7.1 Eficiência de utilização do nitrogênio pela cultura do milho	25
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	28

3.1. Localização e caracterização da área experimental	28
3.2. Delineamento experimental e caracterização dos tratamentos	30
3.3 Semeadura, marcação isotópica com ^{15}N e manejo das plantas de cobertura	32
3.4 Semeadura e condução da cultura do milho	32
3.5 Avaliações	33
3.5.1 Análises químicas do solo	33
3.5.2 Estado nutricional da planta de milho, milheto e crotalária.	34
3.5.3 Altura de planta e da inserção da espiga.....	34
3.5.4 Estande final	34
3.5.5 Número de grãos por espiga	34
3.5.6 Massa média de mil grãos	34
3.5.7 Produtividade de grãos	34
3.5.8 Teor de N nos grãos	35
3.5.9 Teor de N total, de carbono orgânico e de N mineral (N-NH_4^+ e N-NO_3^-) no solo	35
3.5.10 Produtividade de matéria seca do milheto, da crotalária, da vegetação espontânea (pousio) e do milho.....	35
3.5.11 Relação carbono nitrogênio (C/N) da crotalária, do milheto e da vegetação espontânea (pousio).....	35
3.5.12 Teor de fibra, lignina e fenóis totais da crotalária, do milheto e da vegetação espontânea (pousio).....	36
3.5.13 Efeitos dos tratamentos e aproveitamento do N pela planta de milho, grãos e palha (restante da aérea) proveniente do fertilizante e dos adubos verdes (milheto e crotalária)	36
3.6 Efeito residual das plantas de coberturas e do N do fertilizante.....	38
3.7 Máxima produtividade física e máxima produtividade econômica.....	39

3.8 Análise estatística dos dados	39
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
4.1 Plantas de cobertura do solo	40
4.2 Carbono orgânico e formas de N no solo	44
4.3 Componentes da planta e produtividade do milho	51
4.4 Aproveitamento do nitrogênio do fertilizante uréia pelo milho	64
4.5 Aproveitamento do nitrogênio dos adubos verdes milheto e crotalária pelo milho	69
4.6 Nitrogênio proveniente do solo no milho	72
4.7 Análise econômica da produtividade de grãos em função das doses e épocas de aplicação do N	77
4.8 Efeito residual do fertilizante e das plantas de cobertura do solo no milho cultivado no ano subsequente	81
4.9 Considerações finais	86
5 CONCLUSÕES	87
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
APÊNDICE	110

LISTA DE TABELAS

TABELA	PÁGINA
1	Isótopos do elemento nitrogênio 24
2	Médias dos resultados das análises químicas do solo, em amostras coletadas antes da instalação dos ensaios, nos meses de julho de 2001 e julho de 2002. 29
3	Valores médios referentes a macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo, em amostras coletadas antes da instalação dos ensaios, nos meses de julho de 2001 e julho de 2002. 29
4	Tratamentos utilizados de acordo com as doses e épocas de aplicação do N (^{15}N -uréia) e sistemas de cobertura do solo (pousio e, crotalária e milho) marcados com ^{15}N 31
5	Produtividade de matéria seca da parte aérea, teor de N total na matéria seca, enriquecimento em % de átomos de ^{15}N em excesso (milho e crotalária) e quantidade de N acumulado pela crotalária, milho e vegetação espontânea (pousio), na época do manejo mecânico dos mesmos, anos agrícolas 2001/02 e 2002/03. 41
6	Valores referentes à relação C/N, teores de fibra, de lignina e de fenóis totais na matéria seca da parte aérea da crotalária, do milho e da vegetação espontânea (pousio), na época do manejo mecânico dos mesmos, anos agrícolas 2001/02 e 2002/03. 42
7	Quantidades de P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn e Zn acumulados na matéria seca da parte aérea da crotalária, do milho e da vegetação espontânea (pousio), na época do manejo mecânico dos mesmos, anos agrícolas 2001/02 e 2002/03. 44
8	Valores de F da análise de variância e coeficientes de variação para o teor de N-NH_4^+ e N-NO_3^- no solo, na época do florescimento do milho, em função de doses de N aplicadas no estágio quatro ou oito folhas, sistemas de cobertura do solo e profundidades, anos agrícolas 2001/02 e 2002/03. 46

9	Teores de N-NH_4^+ e N-NO_3^- no solo, na época do florescimento do milho, em função das doses de N, sistemas de cobertura e camadas do solo, anos agrícolas 2001/02 e 2002/03.....	48
10	Valores de F da análise de variância e coeficientes de variação referentes às avaliações teor de N na folha, número de grãos por espiga, massa média de mil grãos e produtividade de grãos, em função de doses de N aplicadas no estágio quatro ou oito folhas e sistemas de cobertura do solo, anos agrícolas 2001/02 e 2002/03.	53
11	Médias do teor de N na folha, número de grãos por espiga, massa de mil grãos e produtividade de grãos, em função das épocas de aplicação do N e dos sistemas de coberturas solo, anos agrícolas 2001/02 e 2002/03.	56
12	Desdobramento da interação significativa entre sistemas de cobertura do solo versus épocas de aplicação do N (estádio quatro ou oito folhas) para o teor de N na folha e produtividades de grãos de milho, ano agrícola 2002/03.	59
13	Correlações simples entre a produtividade de grãos versus a altura de planta, altura de inserção da espiga, teor de N na folha, número de grãos por espiga, massa média de 1000 grãos, em função de doses de N aplicadas no estágio quatro ou oito folhas e sistemas de cobertura do solo, anos agrícolas 2001/02 e 2002/03.....	60
14	Valores de F da análise de variância referente aos teores de P, K, Ca Mg, S, Cu, Fe, Mn e Zn na folha do milho, na época do florescimento, em função de doses de N aplicadas no estágio quatro ou oito folhas e sistemas de cobertura do solo, anos agrícolas 2001/02 e 2002/03.....	61
15	Teores de P, K, Ca Mg, S, Cu, Fe, Mn e Zn na folha do milho, na época do florescimento, em função de doses de N aplicadas no estágio quatro ou oito folhas e sistemas de cobertura do solo, anos agrícolas 2001/02 e 2002/03.....	62
16	Porcentagem de nitrogênio na planta (palha e grãos) proveniente do fertilizante (%Nppf), em função de doses de N aplicadas no estágio quatro ou oito folhas no milho cultivado em sucessão a crotalária, ao milheto e ao solo em pousio, anos agrícolas 2001/02 e 2002/03.	64
17	Quantidade do nitrogênio na planta (palha, grãos e palha + grãos - total), proveniente do fertilizante (QNppf) e aproveitamento do N do fertilizante, aplicado no estágio quatro ou oito folhas, no milho cultivado em sucessão à crotalária, ao milheto e ao solo em pousio, anos agrícolas 2001/02 e 2002/03.	66

18	Porcentagem (%Nppav) e quantidade (QNppav) de nitrogênio no milho (palha, grãos e palha + grãos) proveniente do milheto e da crotalária marcados e aproveitamento do nitrogênio da crotalária e do milheto, em função das doses de N aplicadas no estágio quatro folhas, anos agrícolas 2001/02 e 2002/03.	71
19	Valores de F da análise de variância e coeficientes de variação para a quantidade de N na planta de milho (palha e grãos) proveniente do solo (QNpps), em função de doses de N e sistemas de cobertura do solo, anos agrícolas 2001/02 e 2002/03.	73
20	Quantidade de nitrogênio no milho (palha, grãos e palha + grãos) proveniente do solo e outras fontes (QNpps) no milho cultivado em sucessão à crotalária, ao milheto e ao solo em pousio, em função doses de N aplicadas no estágio quatro ou oito folhas, anos agrícolas 2001/02 e 2002/03.	74
21	Valores de F da análise de variância, coeficientes de variação e médias para a produtividade de grãos em função de doses de N e sistemas de cobertura do solo utilizados no ano agrícola anterior, 2001/02 e 2002/03, observados no respectivo ano agrícola subsequente, 2002/03 e 2003/04 (efeito residual).	81
22	Quantidade de nitrogênio na planta de milho (palha, grãos e palha + grãos), proveniente da crotalária e do milheto (QNppav) e aproveitamento do N da crotalária e do milheto, utilizados como cobertura do solo no ano agrícola anterior, 2001/02 e 2002/03, observada no respectivo ano agrícola subsequente, 2002/03 e 2003/04 (efeito residual)..	83

LISTA DE FIGURAS

FIGURA	PÁGINA
1	Ciclo biogeoquímico do nitrogênio nos agroecossistemas..... 6
2	Teores de carbono orgânico (a) e de N total (b) no solo, nas camadas de 0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,4 m, na época do florescimento do milho cultivado em sucessão à crotalária, milheto e ao solo em pousio, anos agrícolas 2001/02 e 2002/03. (Obs. médias seguidas por letras distintas na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%). 45
3	Desdobramento da interação significativa entre doses de N versus sistema de cobertura do solo para os teores de N-NO_3^- no solo, e teores médios de N-NH_4^+ no solo, na época do florescimento do milho, em função de doses de N aplicadas no estádio quatro ou oito folhas, anos agrícolas 2001/02 (a e c) e 2002/03 (b e c). (Obs. *: significativo a 5% pelo teste F). 50
4	Altura de planta (a) e altura de inserção da espiga (b) de milho, em função de doses N aplicadas no estádio quatro ou oito folhas e sistemas de cobertura do solo, anos agrícolas 2001/02 e 2002/03 (Obs. **: significativo a 1% pelo teste F)..... 52
5	Desdobramento da interação significativa entre doses de N aplicadas no estádio quatro ou oito folhas versus sistemas de cobertura do solo, para teor de N na folha, ano agrícola 2001/02 (a) e 2002/03 (b). (Obs. * significativo a 5% pelo teste F). 54
6	Número de grãos por espiga (a) e massa de mil grãos (b) de milho, em função de doses de N aplicadas no estádio quatro ou oito folhas e sistemas de cobertura do solo, anos agrícolas 2001/02 e 2002/03. (Obs.*: significativo a 5% pelo teste F). 55
7	Desdobramento da interação significativa entre doses de N aplicadas no estádio quatro ou oito folhas versus sistemas de cobertura do solo para a produtividade de grãos, ano agrícola 2001/02 (a), e produtividade média de grãos em função de doses de N, ano agrícola 2002/03 (b). (Obs. * e **: significativo a 5 e 1% pelo teste F, respectivamente). 58

8	Médias da quantidade de nitrogênio na planta (palha + grãos) proveniente do fertilizante (QNppf), em função das doses de N aplicadas no estádio quatro ou oito folhas e dos sistemas de cobertura do solo crotalária, milheto e pousio, anos agrícolas 2001/02 (a) e 2002/03 (b). (Obs. *: significativo a 5% pelo teste F).....	65
9	Médias do aproveitamento do nitrogênio do fertilizante pelo milho (palha + grãos), em função de doses de N aplicadas no estádio quatro ou oito folhas e sistemas de cobertura do solo crotalária, milheto e pousio, anos agrícolas 2001/02 (a) e 2002/03 (b). (Obs. * e **: significativo a 5 e 1% pelo teste F, respectivamente).....	68
10	Quantidade de nitrogênio no milho (palha + grãos) proveniente do milheto e da crotalária (QNppav), em função das doses de N (não marcado) aplicadas no estádio quatro ou oito folhas, anos agrícolas 2001/02 (a) e 2002/03 (b). (Obs. *: significativo a 5% pelo teste F, respectivamente).	69
11	Aproveitamento do nitrogênio pelo milho (palha + grãos) do milheto e da crotalária, em função das doses de N (não marcado) aplicadas no estádio quatro ou oito folhas, anos agrícolas 2001/02 (a) e 2002/03 (b). (Obs. *: significativo a 5% pelo teste F, respectivamente).	70
12	Quantidade de N na planta de milho (palha e grãos) proveniente do solo (QNpps), em função de doses de N aplicadas no estádio quatro ou oito folhas e sistemas de cobertura do solo, anos agrícolas 2001/02 (a) e 2002/03 (b).	75
13	Produtividade de grãos de milho em função de doses de N aplicadas no estádio quatro folhas (a e c) ou oito folhas (b e d) e sistemas de cobertura do solo, anos agrícolas 2001/02 e 2002/03. (Obs. * e **: significativo a 5 e 1% pelo teste F, respectivamente).	78
14	Quantidade de nitrogênio no milho (palha, grãos e palha + grãos) proveniente do fertilizante (QNppf), aplicado em diferentes doses e épocas no milho cultivado no ano agrícola anterior, 2001/02 e 2002/03, observada no respectivo ano agrícola subsequente, 2002/03 (a) e 2003/04 (b) (Efeito residual). (Obs. *: significativo a 5% pelo teste F).	84
15	Aproveitamento pelo milho (palha, grãos e palha + grãos), do nitrogênio remanescente do fertilizante aplicado em diferentes doses e épocas no milho cultivado no ano agrícola anterior, 2001/02 e 2002/03, observado no respectivo ano agrícola subsequente, 2002/03 (a) e 2003/04 (b) (efeito residual). (Obs. *: significativo a 5% pelo teste F).	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CR - Crotalária

MI - Milheto

SD - Semeadura direta

SPD - Sistema plantio direto

CM - Cultivo mínimo

PC - Plantio convencional

MOS - Matéria orgânica do solo

NA - Nitrogênio acumulado

MS - Matéria seca

%Nppf - Porcentagem de nitrogênio na planta proveniente do fertilizante

%Nppav - Porcentagem de nitrogênio na planta proveniente do adubo verde

QNppf - Quantidade de nitrogênio na planta proveniente do fertilizante

QNppav - Quantidade de nitrogênio na planta proveniente do adubo verde

QNA - Quantidade de nitrogênio aplicada

AP - Aproveitamento do nitrogênio do fertilizante ou do adubo verde pelo milho

%Npps - Porcentagem de nitrogênio na planta proveniente do solo

QNpps - Quantidade de nitrogênio na planta proveniente do solo

RESUMO

SILVA, E. C. *Manejo da adubação nitrogenada e utilização do nitrogênio (^{15}N) da uréia, do milheto e da crotalária pelo milho sob semeadura direta em solo de cerrado*. 2005. 111 f. Tese (Doutorado) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

O nitrogênio é o nutriente absorvido em maior quantidade pelo milho e o que mais influencia na produtividade de grãos, tendo sua dinâmica no sistema solo-planta condicionada pelo manejo. O trabalho foi desenvolvido na fazenda experimental da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP, Selvíria-MS, em um Latossolo Vermelho distrófico, fase cerrado. Os objetivos do trabalho foram de avaliar a melhor dose e época de aplicação do N, na forma de uréia, no milho cultivado sob semeadura direta (SD) em sucessão à crotalária (CR) (*Crotalaria juncea*), milheto (MI) (*Pennisetum americanum*) ou solo em pousio na entressafra; quantificar o aproveitamento pelo milho do N da uréia e do N mineralizado dos resíduos vegetais da parte aérea da CR e do MI; avaliar o efeito dos adubos verdes no aproveitamento do N-uréia e vice-versa, e de averiguar o aproveitamento do N remanescente da uréia e dos adubos verdes pelo milho cultivado em SD no ano agrícola subsequente. Foram conduzidos dois ensaios em áreas distintas e anexas, nos anos agrícolas de 2001/02 e de 2002/03, com a avaliação, nas respectivas áreas e ano agrícola subsequente, 2002/03 e 2003/04, do aproveitamento pelo milho do N residual dos adubos verdes e do N do fertilizante e seu efeito sobre a produtividade do milho. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados com 24 tratamentos e quatro repetições, dispostos em esquema fatorial incompleto ($3 \times 3 \times 2$) + 6 tratamentos adicionais (três tratamentos controles sem a aplicação de N e três tratamentos que receberam somente 30 kg ha^{-1} de N na semeadura, sobre CR, MI e solo em pousio. Os demais tratamentos constituíram-se pela combinação de três

doses de N: 80, 130 e 180 kg ha⁻¹, aplicando-se 30 kg ha⁻¹ na semeadura e o restante em cobertura; três sistemas de cobertura do solo: CR e MI cultivados no inverno/primavera e o solo em pousio na entressafra, e duas épocas de aplicação do N: estágio quatro folhas ou estágio oito folhas. O fertilizante ¹⁵N-uréia foi aplicado nos tratamentos com 30 kg ha⁻¹ de N na semeadura ou 50, 100 e 150 kg ha⁻¹ de N em cobertura nos estádios quatro folhas ou oito folhas. A CR ou MI marcados com ¹⁵N foram utilizados somente nos tratamentos receberam o N no estágio quatro folhas, testemunha ou apenas 30 ha⁻¹ de N na semeadura. A produtividade de grãos foi superior no milho em sucessão à CR, nos dois anos agrícolas, em relação ao cultivo em sucessão ao MI e ao solo pousio, que diferiram entre si com menor produtividade na sucessão MI-milho no primeiro ano agrícola e quando o N foi aplicado no estágio oito folhas no segundo. As épocas de aplicação do N não influenciaram no seu aproveitamento pelo milho, mas, a aplicação no estágio quatro folhas demonstrou ser mais viável economicamente quando o milho foi cultivado em sucessão ao MI e ao solo em pousio, e indiferente para o cultivo em sucessão à CR. O incremento na dose de fertilizante nitrogenado proporcionou aumento na quantidade de N na planta proveniente do fertilizante e diminuiu o seu aproveitamento, que foi em média de 53%, 49% e 44% para o milho cultivado em sucessão à CR, pousio e MI, respectivamente. O incremento na dose de fertilizante nitrogenado proporcionou aumento linear no aproveitamento pelo milho do N da CR, e quadrático no segundo ano agrícola para o N do MI, que foi em média de 15,60% e 7,60%, respectivamente. A CR promoveu maior aproveitamento pelo milho do N da uréia comparada ao MI, que acumulou proporcionalmente maior quantidade de N proveniente do solo. O aproveitamento do N remanescente da parte aérea do MI e da CR pelo milho cultivado no ano agrícola subsequente, foi inferior a 3,5% e 3%, respectivamente, da quantidade inicial, e o do N remanescente do fertilizante uréia foi inferior a 3% do aplicado inicialmente.

Palavras-chave: Dose de nitrogênio, época de aplicação de nitrogênio, adubo verde marcado, pousio, matéria orgânica do solo, efeito residual de nitrogênio, sistema plantio direto.

ABSTRACT

SILVA, E. C. *Nitrogen fertilizer management and utilization of nitrogen (^{15}N) from urea, millet and sunnhemp by corn under no-tillage in cerrado soil*. 2005. 111 f. Thesis (Doctoral) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

Nitrogen is the most absorbed nutrient by corn crop and most affect the grains yield, and its dynamic in soil-plant system is conditioned by management. The research was carried in the Experimental Farm of Faculty of Engineering, Sao Paulo State University (UNESP), Ilha Solteira, located in Selvíria-MS, in a dystrophic Red Latosol, cerrado phase, during 2001/02 and 2002/03 growing season. The objectives were to evaluate the best rate and time of N application, as urea, and N utilization by corn crop grown under no-tillage system in succession to sunnhemp (*Crotalaria juncea* L) (SU), millet (*Pennisetum americanum*) (MI) and fallow; to quantify the utilization of N from urea and mineralized SU and MI residues by corn crop; to evaluate the effect of green manure on urea N utilization by corn crop and vice-versa; and to investigate the utilization by corn crop of N remnant from previous year applied urea and green manure by corn crop grown subsequent year under no-tillage system. Two experiments were carried out in distinct nearby areas in 2001/02 e 2002/03, with the evaluation, in the respective areas and subsequent years, 2002/03 and 2003/04, of utilization by corn by corn of green manure and fertilizer remnant N and their effects on corn yield. The experimental design was randomized complete blocks, with 24 treatments and four replications in an incomplete factorial, (3 x 3 x 2) +

6 additional treatments (three without N application and three that received 30 kg N ha⁻¹ at seeding); three N rates: 80, 130 and 180 kg N ha⁻¹; tree preceding cover crops SU, MI grown during winter/spring season and fallow; two N application time: four leaves or eight leaves stage. The fertilizer ¹⁵N-urea was applied in the treatments 30 kg ha⁻¹ of N at seeding or 50, 100 and 150 kg ha⁻¹ topdressed at four leaves or eight leaves stages. SU or MI labeled with ¹⁵N were used only in the treatments that received N in the four leaves stage, control or those which received 30 ha⁻¹ of N at seeding. The grains yield was higher in the corn in succession to SU, in both growing seasons, in relation to the cultivation in succession to MI and the fallow soil, that differed between them, with smaller productivity in the succession MI-corn in the first year and when N was applied at the eight leaves stage in the second. The N application times did not affect its utilization by the corn, but the application in four leaves stage demonstrated to be more economically viable when the corn was grown in succession to MI and the soil in fallow, and indifferent for the cultivation in succession to SU. The amount of N derived from fertilizer (Np_{dff}) increased with increasing N rate and reduced the N utilization efficiency (NUE), in average 53%, 49% and 44% for the corn grown in succession to SU, fallow and MI, respectively. The increasing nitrogen fertilizer rate increased linearly the utilization by corn of N from SU, and adjusted to quadratic model in the second year for N from MI, in average 15.60% 7.60%, respectively. SU promoted larger utilization of urea N compared to MI, which accumulated proportionally larger amount of N derived from the soil than SU. The utilization of N remnant from above ground part of MI and of SU by the corn grown in the subsequent year was less than 3.5% and 3%, respectively, of the initial amount, and the remaining N of the urea fertilizer was less than 3% of initially applied amount.

Key words: Nitrogen rate; time of nitrogen application, labeled green manure, fallow, soil organic matter, residual effect of nitrogen, no-tillage.

1 INTRODUÇÃO

O nitrogênio é o nutriente absorvido em maior quantidade pelo milho, e também o que mais influencia na resposta em produtividade de grãos e que mais onera no custo de produção da cultura, tendo sua dinâmica no sistema solo-planta condicionada pelo sistema de manejo e condições edafoclimáticas (Amado et al., 2002). Nos últimos anos, a crescente preocupação com a poluição do meio ambiente, especialmente dos recursos hídricos e da atmosfera, proveniente do manejo inadequado de fertilizantes nitrogenados, tem estimulado a busca de alternativas de manejos de menor custo e maior produtividade que possibilitem a substituição integral ou parcial desses insumos. Dessa forma, faz-se necessário um melhor conhecimento dos processos envolvidos na incorporação e transformação de N, e na perda de solo e de fertilizante para que se possa desenvolver estratégias de manejo que aumentem sua eficiência de utilização pelas culturas, que no caso do milho, raramente ultrapassa 50% do aplicado como fertilizante inorgânico (Scivittaro et al., 2000; Lara Cabezas et al., 2004; Cantarella & Duarte, 2004).

Nas regiões tropicais e subtropicais cultivadas intensivamente, geralmente a diminuição do potencial produtivo dos solos tem sido atribuída, principalmente, à erosão e à decomposição da matéria orgânica do solo (MOS). O não revolvimento do solo aliado à adição de carbono orgânico, por meio do cultivo de plantas de cobertura do solo (adubos verdes) e/ou de culturas “comerciais” que adicionem grandes quantidades de resíduos ao solo, são medidas fundamentais na preservação e busca do equilíbrio da MOS, que caracteriza na principal responsável pela capacidade de troca de cátions (CTC) dos solos tropicais e em importante fonte de N para as culturas.

No Brasil, o cultivo de grãos é realizado basicamente em dois sistemas, plantio convencional (PC) onde o solo é revolvido com arados e/ou grades ou em semeadura direta (SD), comumente denominada de sistema plantio direto (SPD), onde a semeadura é realizada no solo coberto com resíduos vegetais de culturas anteriores, adubos verdes e/ou resíduos de plantas daninhas. A expansão da área cultivada em SD foi bastante expressiva nos últimos anos, atingindo no ano agrícola 2002/03 cerca de 72 milhões de hectares no mundo. No Brasil

a SD alcançou na safra 2002/03 cerca de 22 milhões de hectares, ocupando a segunda maior área do mundo, correspondendo à aproximadamente 48% da área cultivada com grãos no país (FEBRAPDP, 2005).

A adoção da SD influencia nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, e altera a posição de distribuição dos resíduos vegetais no perfil, afetando as características e distribuição dos nichos biológicos e os processos de transformação do N e de sua eficiência de uso pelas plantas. O cultivo de adubos verdes antecedendo o cultivo do milho em SD, além da redução do processo erosivo do solo, tem demonstrado ser uma alternativa promissora na suplementação de N. A combinação de adubos verdes com fertilizantes minerais sem o revolvimento do solo, constitui-se numa alternativa de manejo recente e promissora, pois, preserva a qualidade ambiental, aumentando a produtividade das culturas, comparativamente ao uso exclusivo de determinada fonte mineral ou orgânica em PC. Postula-se, ainda, que o uso associado de adubos verdes e fertilizantes minerais otimize a eficiência de utilização do N de ambas as fontes pela cultura do milho.

A eficiência de utilização de fertilizantes nitrogenados pelas plantas pode ser determinada de duas formas, pelo método da diferença ou indireto ou pelo método isotópico ou direto. A grande vantagem da técnica isotópica é a sua exclusiva possibilidade de separar nas várias partes da planta a fração de um nutriente proveniente do fertilizante, daquele do solo e outras fontes.

Nesse contexto, estabeleceu-se as hipóteses de que o uso combinado de uma fonte mineral de N com adubos verdes aumenta a eficiência de utilização de N de ambas as fontes pelo milho cultivado em SD e prolonga a permanência do N no solo, proporcionando maior efeito residual no milho cultivado subsequentemente. Há diferença no aproveitamento do N pelo milho quando aplicado em cobertura e diferentes estádios e doses. O presente trabalho, utilizando-se uréia, crotalária e milheto marcados com ^{15}N , teve como objetivos:

a) Avaliar a melhor dose e época de aplicação do N, na forma de uréia, no milho cultivado sob semeadura direta em sucessão à crotalária (*Crotalaria juncea*), milheto (*Pennisetum americanum*) ou solo em pousio na entressafra.

b) Quantificar o aproveitamento pelo milho do N da uréia e do N mineralizado dos resíduos vegetais da parte aérea da crotalária e do milheto.

c) Avaliar o efeito dos adubos verdes no aproveitamento do N-uréia e vice-versa.

d) Averiguar o aproveitamento do N remanescente do fertilizante uréia e dos adubos verdes pelo milho cultivado em semeadura direta no ano agrícola subsequente.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Aspectos gerais e ecofisiológicos sobre a cultura do milho

O milho (*Zea mays* L.), originário da América, mais provavelmente na região onde situa-se o México, representa um dos principais cereais cultivados e consumido no mundo, em virtude do seu alto potencial produtivo, composição química e valor nutritivo. Este cereal assume grande importância social e econômica, principalmente pela geração de empregos na zona rural e urbana, e por fornecer produtos largamente utilizados na alimentação humana, tanto na forma “in natura” como processado, e para alimentação animal, representando o principal insumo para a confecção de rações. Além disso, o milho e seus derivados constituem-se em matéria-prima para vários segmentos da indústria, como por exemplo, farmacêutica, têxtil, bebidas, cosméticos, papéis, curtumes, colas dentre outras.

Apesar do Brasil ser o terceiro maior produtor mundial de milho, não tem sido auto-suficiente nos últimos anos, necessitando de importação desse cereal. São cultivados atualmente aproximadamente de 13 milhões de hectares com milho, destacando, entre os grãos, como o segundo em maior volume produzido e valor da produção, sendo superado apenas pela soja. A produtividade média de grãos de milho no Brasil e no Estado de São Paulo, no ano agrícola 2002/03, foi da ordem de 3.500 kg ha⁻¹ e 4.600 kg ha⁻¹, respectivamente (CONAB, 2005), podendo ser considerada baixa comparada à de outros países como a dos EUA (~7.000 kg ha⁻¹) e da Argentina (~5.000 kg ha⁻¹) e pelo potencial produtivo da cultura que é superior a 16.000 kg ha⁻¹ (Coelho et al., 2003). Dentre os principais fatores que contribui para a baixa produtividade média de milho no país, destacam-se: condições climáticas desfavoráveis de algumas regiões, utilização de variedades ou híbridos não adaptados a determinadas condições edafoclimáticas, uso de sementes não fiscalizadas e o manejo incorreto de corretivos e/ou de fertilizantes, principalmente dos nitrogenados, condicionando a um relativo baixo aproveitamento do N pela cultura.

Dentre as principais culturas de cereais dos trópicos sub-úmidos e semi-áridos, o milho tem a mais alta produtividade em condições adequadas de água, luz e nutrientes

minerais, com destaque para o N, que é o nutriente mineral absorvido em maior quantidade e essencial para o crescimento e desenvolvimento da planta, por ser constituinte de moléculas de proteína, enzimas, coenzimas, ácidos nucléicos e citocromos, além de ser integrante da molécula de clorofila, atuando diretamente no processo de divisão e expansão celular (Büll, 1993). Dessa forma, a deficiência de N proporciona a diminuição do índice de área foliar e da duração de folhas metabolicamente ativas (folhas verdes). Este fator repercute diretamente sobre a quantidade de radiação interceptada pela planta (fotossíntese), na produção de matéria seca e, conseqüentemente sobre o rendimento de grãos. Contudo, o efeito sobre essas variáveis depende do grau e estágio fenológico em que ocorrer a deficiência (Uhart & Andrade, 1995).

A produtividade da cultura do milho está estreitamente relacionada com a translocação de açúcares (Büll, 1993) e de N (Karlen et al., 1988) de órgãos vegetativos, principalmente das folhas, para os grãos. Por outro lado, o aumento na produtividade de grãos proporcionado pelo N pode ser atribuído, também, aos efeitos sobre o crescimento do sistema radicular, aumento do comprimento espiga e do número de espigas por planta (Fancelli & Dourado Neto, 2000).

O acúmulo de N pela planta de milho está relacionado principalmente com o caráter genético do híbrido ou variedade utilizada. Nesse sentido, Andrade (1975) observou que o acúmulo de N pela planta de milho seguiu uma tendência similar ao acúmulo de matéria seca, com o taxa máxima ocorrendo cerca de uma semana mais tarde que a de matéria seca, que coincidiu com o florescimento feminino. Entretanto, Ulhoa et al. (1982) constatou que somente cerca de 50% do N acumulou até o florescimento.

2.2 Cultivo do milho na região do cerrado

O milho representa uma das principais culturas, em termos de área plantada na região de cerrado, onde se encontram em torno de 40% da área cultivada com grãos em SD no Brasil (Lopes et al., 2004). Nos últimos vinte anos a área cultivada com milho, praticamente, manteve-se estagnada e os ganhos em produção de grãos foram em virtude do aumento em produtividade, destacando-se a região de cerrado com o principal índice (Sousa & Braga, 2004) Nessa região predominam os Latossolos com elevado grau de intemperismo, que em condições naturais proporcionam baixa produtividade, em função da elevada saturação por alumínio, baixos teores da maioria nutrientes minerais de plantas, baixos teores de MOS,

baixa CTC e alta capacidade de fixação de fósforo (Lopes et al., 2004; Sousa & Lobato, 2004).

Por outro lado, a maioria dos Latossolos apresenta propriedades físicas, como textura e estrutura, que favorecem o desenvolvimento de plantas e à produção agrícola, quando os mesmos são bem manejados quimicamente. Além disso, apresenta relevo plano a suave-ondulado, o que facilita a mecanização agrícola (EMBRAPA, 1999; Sousa & Lobato, 2004). Contudo, esses solos são bastante susceptíveis à erosão hídrica, o que é favorecido com o revolvimento e incorporação dos resíduos vegetais. Pesquisas têm demonstrado que em solos de igual declividade, a SD reduz em cerca de 75% a perda de solo e em 20% as perdas de água, em relação às áreas onde há o revolvimento do solo (Oliveira et al., 2002).

O cultivo sob SD na região de cerrado brasileiro vem sendo utilizado desde o início da década de 80, com aumento expressivo nos últimos anos, e tem demonstrado ser uma prática de manejo que promove, além da redução acentuada no processo erosivo, incremento nos teores de MOS com o decorrer do tempo de adoção, a qual tem recebido considerável atenção na recomendação de N para a cultura do milho na maioria das regiões brasileira, sobretudo no cálculo do N potencialmente mineralizável (Raij et al., 1996; Amado et al., 2002; Sousa & Lobato, 2004).

Na região de cerrado as altas temperaturas e umidade no verão promovem rápida decomposição dos resíduos vegetais, além da prolongada estação seca na entressafra, freqüentemente, dificultar o cultivo de plantas de cobertura e reduzir a produção de matéria seca. Dessa forma, os resíduos da cultura do milho contribuíram para a consolidação da SD, por propiciarem a reposição e a manutenção mais prolongada da palhada no solo, em virtude da elevada relação C/N e da grande quantidade de resíduos produzidos, geralmente superior a seis toneladas por hectare (Wisniewski & Holtz, 1997). Além disso, na região de cerrado o milho constitui-se numa das principais opções de rotação/sucessão de cultura com a soja e mais recentemente, também com o algodão.

2.3 Ciclo biogeoquímico do nitrogênio em agroecossistemas

Dentre todos os elementos essenciais às plantas, o N é o que sofre maior número de transformações biogeoquímicas no sistema solo-planta (Stevenson, 1982; Camargo & Sá, 2004), sendo todas as transformações no solo mediadas por microrganismos (Victória et al., 1992). O movimento de N entre os organismos e as formas orgânicas produzidas pelos mesmos ocorrem num curto espaço de tempo, como por exemplo, a nitrificação, ou em anos,

como a mineralização do N orgânico de frações recalcitrantes da MOS (Smith et al., 1994).

No sistema solo-planta de um agroecossistema (Figura 1) as principais formas de adição de N podem ser caracterizadas como sais de amônio e nitratos trazidos pela precipitação pluviométrica; aplicação de fertilizantes nitrogenados, obtidos através da fixação industrial do N_2 atmosférico pelo homem; aplicação de fertilizantes orgânicos de origem animal ou vegetal; fixação biológica do N_2 , realizada por microrganismos, de forma simbiótica ou assimbiótica.

Fonte: PICCOLO, M. C. Biogeoquímica do nitrogênio em ecossistemas tropicais. Piracicaba: CENA/USP. (Disciplina CEN5749). Disponível em: <http://www.cena.usp.br/apostilas/marisa>.

Figura 1. Ciclo biogeoquímico do nitrogênio nos agroecossistemas.

Por outro lado, as principais formas de saída do N são a exportação pelas culturas

através das colheitas; perdas gasosas por meio dos processos de volatilização de amônia, de desnitrificação e de queimadas, perdas por lixiviação e por erosão por meio do escoamento superficial. No solo o N pode se encontrar como N orgânico lentamente lábil, N orgânico imobilizado na biomassa microbiana, nos resíduos vegetais ou animais, N fixado nas argilas e N na forma mineral, predominantemente como amônio e nitrato (Victória et al., 1992).

Apesar do N ser um dos elementos mais abundantes na natureza, constituindo cerca de 78% dos gases inertes da atmosfera, o mesmo encontra-se na forma combinada de N_2 , não diretamente disponível às plantas. Por outro lado, a maior parte do N no solo (95% ou mais) encontra-se em combinações orgânicas e, pequena fração na forma mineral como $N-NO_3^-$ ou $N-NH_4^+$, apresentando geralmente bastante variação no solo (Cantarella & Duarte, 2004). A forma de N predominante em solos com boas condições de aeração é a nítrica, e o processo de fluxo de massa corresponde por mais de 98% do contato íon-raiz no fornecimento de N para o milho (Malavolta, 1997; Below, 2002). Pelo método da diferença é difícil determinar qual das duas formas mineral de N é a preferida pelas plantas. Com a ajuda técnicas isotópicas, pôde-se estabelecer que a planta de milho utiliza o íon amônio de forma mais rápida e intensa nos primeiros estádios de crescimento, e o íon nitrato nos estádios finais (Schrader et al., 1972). A assimilação de nitrato tem um elevado custo energético para a planta, equivalente à cerca de 20% da energia luminosa capturada na fotossíntese (Malavolta et al., 1997).

Normalmente, o teor de N total da camada de 0 a 0,20 m dos solos brasileiros cultivados, varia de 0,05 a 0,5% de N, o que equivale de 1.000 a 10.000 kg ha⁻¹ (Malavolta, 1980). Este compartimento não é o principal estoque de N da biosfera, mas tem papel primordial, porque a maior parte do N assimilado pelas plantas é derivado dos reservatórios de N-inorgânico do solo (NH_4^+ e NO_3^-), resultante do processo de mineralização do N da MOS (Hart et al., 1994).

2.3.1 Mineralização e imobilização do nitrogênio

A mineralização é a conversão do N orgânico em N mineral (NH_4^+ e NO_3^-), realizada por microrganismos quimiorganotróficos. Esse processo, nos agroecossistemas é governado pelas condições edafoclimáticas, onde a temperatura, a umidade, a relação C/N dos resíduos vegetais, a textura do solo, o pH e o tipo de argila são os principais fatores controladores do mesmo. A imobilização caracteriza-se no fenômeno oposto a mineralização, representando a passagem do N na forma mineral, oriundo dos fertilizantes minerais ou orgânicos (reimobilização) para a forma orgânica. Entretanto, esse processo além de ser promovido por

microrganismos quimiorganotróficos, é realizado também pelas plantas através da assimilação e incorporação em seus tecidos. Apesar da redução drástica do teor de N mineral no solo na presença de resíduos de alta relação C/N ($>30/1$), a imobilização não representa uma perda irreversível de N para a cultura subsequente, em virtude da população microbiana não crescer indefinidamente, começando a ocorrer progressiva liberação de N a partir do ponto em que o carbono facilmente oxidável começa a desaparecer (Victória et al., 1992; Lopes et al., 2004). A maioria dos pesquisadores considera a relação C/N de 25/1 como o ponto de equilíbrio, onde inferior a esta começa a ocorrer liberação de N para o solo. Ressalta-se, entretanto, que esses processos ocorrem no solo simultaneamente podendo ocorrer reimplantação e remineralização do mesmo “pool” de N.

A nitrificação constitui-se na oxidação do N amoniacal (forma mais reduzida de N no solo) a nitrito e depois a nitrato (forma mais oxidada de N no solo). Esse processo é mediado, predominantemente, por microrganismos quimiolitotróficos especializados, onde as bactérias do gênero *nitrosomonas* transformam NH_4^+ a NO_2^- e as do gênero *nitrobacter* transformam NO_2^- a NO_3^- . O processo acidificante para o meio em virtude da liberação de H^+ durante as reações (Victória et al., 1992).

2.3.2 Perdas de nitrogênio no solo

A lixiviação de N ocorre em ordem decrescente para $\text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ > \text{N-orgânico}$. A maior lixiviação na forma de nitrato ocorre por causa de sua carga negativa ser repelida pelos colóides de solo onde predomina a mesma carga (Gonçalves et al., 2000). A maior lixiviação de N na SD comparada ao PC, é atribuída à maior infiltração de água no solo condicionada pela continuidade de poros e pela “rugosidade” da superfície do solo propiciada pela presença de palha (Muzilli, 1983; Salet et al., 1997; Amado et al., 2002). Entretanto, esta, num sistema bem manejado e com cultivo de plantas de cobertura na entressafra, pressupõe-se que a lixiviação poderia ser até menor, comparada a de outros sistemas de cultivos, visto que, há uma tendência da MOS concentrar-se na camada superior do solo e, segundo Gonçalves et al. (2000), a presença de cobertura vegetal favorecer a reciclagem do N-NO_3^- das camadas mais profundas. Além disso, normalmente há uma maior oferta de carbono orgânico na SD, o que favorece à maior permanência do N na forma amoniacal, e a alta atividade microbiana devido à relativa elevada temperatura proporciona uma “competição” entre os microrganismos e o sistema radicular das plantas, dessa forma, deixando o N mineral menos suscetível a perdas.

Conforme Schlegel et al. (1996) quando combinada com uma quantidade apropriada

de outros nutrientes, principalmente de P, taxas suficientemente altas de N podem ser aplicadas com segurança para estimular o crescimento da planta, o que protege o solo da erosão e aumenta a absorção e o uso-eficiência dos nutrientes, ao mesmo tempo em que propicia ao agricultor maior produtividade e lucratividade. No caso de perda de N, na forma de nitrato, a agravante é seu efeito danoso à saúde humana, sendo que a máxima concentração permitida pela Legislação Brasileira para uma água ser considerada potável é de 10 mg L^{-1} para nitrato e 1 mg L^{-1} para nitrito, sendo o mesmo valor adotado pelos EUA, e o valor de 50 mg L^{-1} de nitrato pela União Européia (Tundisi, 2003).

A volatilização caracteriza-se numa forma de perda gasosa de N como NH_3 , condicionada por diversos fatores como: temperatura do solo, vento, umidade do solo, umidade relativa do ar, resíduos vegetais, teor de MOS, textura do solo e presença da enzima urease (Lara Cabezas et al., 1997; Villas Bôas, 1999; Cantarella et al., 2004). A perda de N por volatilização na SD é favorecida, principalmente quando é usada uréia sobre os resíduos vegetais sem a sua incorporação (Cantarella, 1993). No entanto, a incorporação de 5 a 7 cm reduz drasticamente as perdas, normalmente não havendo diferença entre fontes de N e a SD e o PC (Lara Cabezas et al., 1997; Silva et al., 1997).

A desnitrificação também é uma forma de perda gasosa de N, porém como N_2 , N_2O e NO_x , promovida, principalmente, por bactérias anaeróbicas facultativas (*Pseudomonas*, *Bacillus*, *Thiobacillus denitrificans* e outras), que na ausência de oxigênio e presença de matéria orgânica energética, utilizam o nitrato como receptor final de elétrons (Victória et al., 1992; Camargo & Sá, 2004). Este é o único processo microbiológico que resulta em perda real de N do solo. Na SD tem sido especulado que a maior perda de N por desnitrificação ocorra em virtude do surgimento de microsítios anaeróbicos, em virtude da maior retenção de umidade, maior adensamento do solo por causa da acomodação natural das partículas ou pela compactação proporcionada pelo trânsito de máquina com umidade do solo não adequada. Ainda, pode ser favorecida pela maior oferta de matéria orgânica energética na SD (Doran, 1987; Sá et al., 2004b).

A perdas por erosão envolvem todas as formas de N no solo e são dependentes da declividade da área, erodibilidade do solo (textura e estrutura), regime pluviométrico, natureza da vegetação e adoção de práticas conservacionistas. A remoção pelos produtos agrícolas de origem vegetal ou animal, necessariamente, não se constitui numa perda de N, porque o elemento é parte integrante do produto e indispensável à sua obtenção. Contudo, sob ponto de vista de retirada do solo pode ser considerada uma perda. No processo de erosão pelo escoamento superficial, a principal forma arrastada é a MOS e/ou resíduos em fase de

decomposição, devido à sua menor densidade e localização principalmente na superfície do solo.

2.4 Recomendação de nitrogênio para a cultura do milho

Em virtude da multiplicidade de reações químicas e biológicas, dependência das condições edafoclimáticas, vulnerabilidade a perdas por lixiviação, volatilização, desnitrificação e erosão, quando manejado inadequadamente, e ao processo de imobilização biológica e do seu efeito no rendimento das culturas, o N é o elemento que apresenta maiores dificuldades de manejo e recomendação na produção agrícola (Camargo & Sá, 2004; Cantarella & Duarte, 2004).

O N é o único dos nutrientes minerais que pode ser absorvido pelas plantas em duas formas distintas: como anion NO_3^- ou como cátion NH_4^+ . Além de ser absorvido também como aminoácidos e uréia (Malavolta et al., 1997) e em pequena quantidade como NH_3 presente na atmosfera (Francis et al., 1993).

Pesquisadores de várias partes do mundo investigam um método seguro que relacione parâmetros da análise de solo com a recomendação da dose de N a ser aplicada para a cultura do milho, freqüentemente, sem muito êxito. Em alguns estados brasileiros, a dose de N recomendada para o milho é relacionada com os teores de MOS, o histórico da área, produtividade esperada, o preço do fertilizante nitrogenado (Raij et al., 1996; Sousa & Lobato, 2004) e também a cultura de cobertura antecessora (Amado et al., 2002).

A complexidade das reações do N no solo dificulta o diagnóstico de sua disponibilidade para as plantas com base na análise do solo. Na utilização do teor de MOS como critério de recomendação do N, assume-se que a mineralização da mesma seja constante no tempo, o que muitas vezes não acontece, em virtude desse processo ser mediado por microrganismos e afetada por fatores climáticos dificilmente previsíveis. Esta mesma premissa é válida também, para a decomposição dos resíduos vegetais de culturas anteriores, de adubos verdes e/ou de plantas daninhas. Na região de cerrado, esse fato é ainda mais relevante, devido normalmente à ocorrência de períodos “prolongados” de estiagem na época das chuvas (veranicos).

A utilização da análise de N mineral no solo (NH_4^+ e NO_3^-) para a recomendação de N é uma técnica limitada por diversos fatores como, por exemplo, uma metodologia que possa ser incorporada na rotina de laboratórios de solo, critérios de amostragem no campo e passividade de transformações que o N pode sofrer da coleta da amostra até a chegada ao

laboratório, alta variabilidade espacial e temporal, proporcionando baixa correlação com as respostas pelas culturas. Estas metodologias de análises são empregadas em pequena escala por alguns países de condições climáticas bem definidas e regiões de clima árido, nas quais as perdas por lixiviação são pequenas, principalmente, para medir o N residual no solo (Keeney, 1982) e auxiliar na tomada de decisão da dose de N a ser aplicada na cultura subsequente. Esta metodologia praticamente não é aplicada para a recomendação de N para o milho no Brasil.

O aumento na dose aplicada de N, na maioria das vezes, proporciona aumento no rendimento da cultura do milho (Duarte, 2003; Cantarella & Duarte, 2004). De acordo com Yamada (1995), a adubação nitrogenada no SPD tem boa probabilidade de respostas ao uso de 30 a 40 kg ha⁻¹ de N na semeadura, com cobertura nitrogenada feita logo após a semeadura, sendo recomendável uma segunda cobertura em solos de textura mais arenosa.

Recentemente, Sousa & Lobato (2004) propuseram a recomendação de N para o milho, considerando-se a produtividade esperada, o teor de MOS, as últimas três culturas antecessoras e suas respectivas produtividades de grãos e a eficiência de utilização do N do fertilizante pelo milho. Para tanto, recomendam considerar: a) 20 kg de N para cada tonelada de grãos esperada; b) capacidade de suprimento pelo solo igual a 30 kg ha⁻¹ de N para cada 10 g kg⁻¹ de MOS; c) as três últimas culturas antecessoras e suas respectivas produtividades de grãos, multiplicando-se para leguminosas o número de sacas (60 kg) produzidas no último, penúltimo e antipenúltimo ano por 0,45; 0,22 e 0,11, respectivamente. Para gramíneas, considerar o fator fixo de 0,1 para os três últimos anos multiplicados pelo número de sacas produzidas; d) fator eficiência de uso do N do fertilizante pelo milho, considerar 1,67 (eficiência de 60% no uso do N). Os autores recomendam aplicar 30 kg ha⁻¹ de N na semeadura e o restante, quando inferior a 100 kg ha⁻¹ de N, no estágio de sete a oito folhas para o PC e quatro a seis folhas para a SD. A eficiência de utilização do N tem alta dependência da forma de manejo e das condições edafoclimáticas, sendo que as maiores pesquisas indicam que raramente ultrapassa 50% do N do fertilizante aplicado (Scivittaro et al., 2000). Portanto, considerar a eficiência de 60% pode induzir a uma subestimativa da dose necessária que, provavelmente, não vai poder ser suprida pelo solo, pois no cálculo de recomendação já inclui o N mineralizado da MOS e o N proveniente da mineralização dos resíduos culturais.

Atualmente, a recomendação de N para a cultura do milho em SD para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina é feita levando-se em consideração, além do teor de MOS e a expectativa de produtividade de grãos (CFS-RS/SC, 1995), o tipo de cobertura

antecessora à cultura, considerando-se para isso três situações: leguminosa em cultivo solteiro, gramínea em cultivo solteiro e consorciações de gramíneas e leguminosas. A contribuição no fornecimento de N para o milho pelas leguminosas é calculada em função da quantidade de matéria seca produzida; para as gramíneas este é considerado como muito pequeno ou nulo em relação ao pousio invernal, especialmente para situações de elevada produção de matéria seca, por causa do decréscimo na disponibilidade de N pela imobilização microbiana. Além disso, quando o milho é cultivado em rotação com a soja, recomenda-se reduzir a dose de N em 20% (Amado et al., 2002).

No Estado de Minas Gerais a recomendação de N é feita em função do rendimento de grãos esperado, aplicando-se de 10 a 20 kg ha⁻¹ de N na semeadura para PC e 30 kg ha⁻¹ de N para SD. Em cobertura, a recomendação é de 60 kg ha⁻¹ de N para uma faixa de produtividade de quatro a seis toneladas por hectare, 100 kg ha⁻¹ de N para seis a oito toneladas por hectare e de 140 kg ha⁻¹ de N para expectativa acima de oito toneladas de grãos. No milho cultivado em sucessão à soja, recomenda-se reduzir 20 kg ha⁻¹ de N (Alves et al., 1999).

Mascarenhas et al. (1983), em experimento conduzido em áreas com um a quatro anos de cultivo da soja verificaram efeito positivo sobre a produtividade de grãos de milho. Esse efeito foi diretamente proporcional ao tempo de cultivo da soja, sendo que cada ano correspondeu à produção de milho com a aplicação de 17,3 kg ha⁻¹ de N.

No Estado de São Paulo, além da expectativa de rendimento, a recomendação de N para o milho estabelece classes de respostas, baseadas principalmente no histórico de uso e manejo da área como, por exemplo, o tempo de adoção da SD, cultivo de gramíneas, aplicação de adubos orgânicos, cultivos de leguminosas, textura do solo, reação do solo e outras. Recomenda-se 20 kg ha⁻¹ de N na semeadura para expectativa de produtividade de quatro a seis toneladas de grãos por hectare e 30 kg ha⁻¹ de N, para seis a doze toneladas de grãos por hectare. A adubação de cobertura varia de 20 a 140 kg ha⁻¹ de N, em função da produtividade esperada e da classe de resposta esperada a N, classificadas como baixa, média ou alta (Raij et al., 1997).

Nos EUA uma recomendação de adubação nitrogenada muito utilizada é a de 17,8 a 21,4 kg ha⁻¹ de N por tonelada de grãos a ser produzida (Sims et al., 1995). Esse valor é descontado da contribuição em N pela leguminosa cultivada anteriormente, 17 kg ha⁻¹ de N por tonelada de grãos de soja, até um máximo de 45 kg ha⁻¹ de N, ou da aplicação de adubos orgânicos ou outras fontes de N (Below, 2002). Nesse país, em algumas regiões, tem sido utilizado em pequena escala também, a determinação do teor de N mineral até 0,3 m de

profundidade, em amostras retiradas pouco antes da adubação nitrogenada de cobertura no milho, principalmente para avaliar valores críticos acima dos quais não há respostas à aplicação do N, valores na faixa de 20 a 30 mg kg⁻¹ de N nítrico tem sido sugerido (Fox et al., 1989; Sims et al., 1995).

Na Argentina, país que vem se despontando na produtividade média (5000 kg ha⁻¹) de milho (Coelho, 2003), não tem sido observado grandes diferenças na resposta a N para a SD e o PC (Echeverria et al., 2004). Assim como verificado por Sims et al. (1995) e Fox et al. (1995) nos EUA, algumas pesquisas na Argentina têm demonstrado também boas correlações entre o teor de N-NO₃⁻ na camada de 0 a 0,3 m, avaliado no estágio V4 a V6, com as doses de N aplicadas e a produtividade de grãos. Segundo Echeverria et al. (2004), nesse país a aplicação de pequenas quantidades de N na semeadura e a cobertura no estágio V5 a V6, tem proporciona maior eficiência de utilização do N pelo milho, em virtude da redução nas perdas de N por lixiviação e desnitrificação e pela menor imobilização microbiana do N. Contudo, para as condições brasileiras, varias pesquisa já demonstraram que, apesar de serem relativamente pequenas as exigências de N na fase inicial de desenvolvimento, há uma grande resposta em produtividade de grãos em função do N aplicado na semeadura (Sá, 1996; Yamada. 1996; Silva et al., 1997; Amado et al., 2002). Isso, provavelmente deve-se à maior fertilidade e CTC dos solos argentino comparados à maioria dos solos brasileiros cultivados com milho, proporcionando maior fornecimento de N à cultura na fase inicial.

Devido ao não revolvimento do solo e manutenção dos resíduos vegetais na superfície, no do solo sob SD ocorre alteração na dinâmica e na transformação das formas de N no solo (Amado et al., 2002). Na fase inicial da SD observa-se a necessidade de aplicação de maiores quantidades de N, devido à intensificação do processo de imobilização no solo pelos microrganismos quimiorganotróficos como resposta à maior oferta de carbono orgânico no sistema. Normalmente, após quatro anos, parece ocorrer o início do restabelecimento do equilíbrio das transformações no sistema, à medida que ocorre a reposição dos resíduos culturais (Sá, 1993).

A relativa grande variação nas recomendações de N para o milho ocorre virtude das condições edafoclimáticas distintas em que são conduzidos os experimentos de campo e, também, pelos genótipos distintos utilizados, impossibilitando de se fazer generalizações. Assim sendo, todas as recomendações apresentam certo grau de probabilidade de falta de respostas pelo milho, devido às transformações do N no solo serem mediadas por microrganismos, que assim como o processo de absorção depende das condições climáticas. Dessa forma, uma proposta de recomendação de N deve ser dinâmica, incorporando novos

resultados de pesquisa, sendo primordial o conhecimento pelo técnico responsável do histórico da área e das produtividades obtidas. Outro aspecto que deve ser considerado é o preço de mercado do fertilizante, o preço do milho e, apesar de difícil de serem previstos, os riscos climáticos, principalmente na segunda safra de milho (safrinha).

No Brasil tem surgido nos últimos anos pesquisas para diagnosticar a disponibilidade de N através da medição indireta da clorofila com a utilização do aparelho clorofilômetro (SPAD, Minota Co., Japão), onde uma leitura digital correspondente à quantidade de luz verde ou vermelha transmitida pela folha, que por estar correlacionada com a concentração de clorofila da folha (Malavolta et al., 1997). Entretanto, as leituras indicam o nível de N na planta, evidenciando plantas deficientes e com nível adequado deste nutriente, não indicando uma recomendação de dose. Segundo Argenta et al. (2003) para diagnosticar o nível de N na planta de milho, as leituras no clorofilômetro acima de 45,4; 52,1; 55,3 e 58,0, respectivamente, para os estádios três a quatro folhas, seis a sete folhas, dez a onze folhas e espigamento, indicam nível adequado de N, independente do híbrido utilizado.

2.5 Manejo do nitrogênio nos sistemas de produção agrícola

O não revolvimento do solo e a manutenção da cobertura vegetal na superfície constituem-se numa eficiente forma de redução do processo erosivo, em virtude de que, além de proteger o solo, quebrar a energia cinética das gotas de chuvas, bloqueando o seu impacto direto com o solo, impedindo o desencadeamento da primeira fase do processo erosivo, a desagregação. A presença de cobertura vegetal sobre a superfície do solo, também, é muito eficiente na mitigação da segunda fase do processo erosivo, que é o transporte de sedimentos, em virtude de conferir uma maior rugosidade à superfície, favorecendo a infiltração da água, impedindo a formação de enxurradas (Calegari, 2004).

A SD, quando bem manejado, tem proporcionado produtividade de milho superior a outros sistemas de cultivo como o cultivo mínimo (CM) e o PC (Fernandes et al., 1998) e com um menor custo de produção, principalmente, em virtude da diminuição dos gastos com combustíveis, máquinas, implementos e mão de obra (Melo Filho, 2000; Silva et al., 2001). Entretanto, há necessidade de mais estudos para o entendimento da dinâmica dos nutrientes nesse sistema de cultivo, principalmente o N, por ser o nutriente exigido em maior quantidade e o principal responsável pelo aumento na produtividade da cultura de milho (Fernandes et al., 1998), além de ser o que mais onera no custo de produção (Yamada, 1996; Silva et al., 2001).

Um dos principais benefícios da SD é o aumento no teor de MOS com o decorrer do tempo de adoção desse sistema, em consequência da mineralização dos resíduos deixado na

superfície do solo ser mais lenta, por causa do seu menor contato, diminuindo a ação dos microrganismos e também pela maior adição de matéria seca das culturas em rotação ou sucessão. Além disso, a maior preservação da estrutura do solo confere à MOS maior preservação ao ataque de microrganismos e de seus complexos enzimáticos (Sá, 2001; Lopes et al., 2004).

O incremento no teor de MOS está diretamente ligado ao aumento na adição de carbono orgânico e/ou redução da taxa de decomposição dos materiais orgânicos frescos e do húmus, proporcionando aumento no teor de N, pois a MOS é constituída por 5% de N (relação C/N em torno de 10/1). Este aspecto tem relação direta com as entradas e saídas de N do sistema. Outrossim, o recíproco é verdadeiro, pois o incremento no teor de MOS depende da adição de N ao solo, seja pela fixação biológica ou pelos fertilizantes minerais ou orgânicos (Lopes et al., 2004).

As modificações no solo sob SD, devido ao não revolvimento do mesmo e acúmulo de material orgânico, podem alterar a disponibilidade de nutrientes, principalmente de N, às culturas, provocando alterações no acúmulo de N total e de N proveniente do fertilizante, causando ou não queda na produtividade de grãos (Kitur et al., 1984; Meisinger et al., 1985; Timmons & Baker, 1992).

De acordo com Mendonça & Oliveira (2000) os processos de mineralização/imobilização de N, exercidos pelos microrganismos quimiorganotróficos no solo sob SD, levam a MOS a funcionar como fonte ou dreno de N, o que na maioria das vezes, depende do tempo de adoção da SD. Segundo esses autores, nos primeiros anos de adoção da SD, prevalece o caráter dreno, devido o acúmulo de MOS exceder a decomposição. Após alguns anos da implantação da SD, ocorre a estabilização no sistema e o caráter fonte e dreno se equivale e, com o passar dos anos, com aporte de N via decomposição de resíduos será maior que a quantidade de N imobilizado pelos microrganismos do solo. Neste ponto, o caráter fonte de N da MOS predomina em relação ao caráter dreno, assim, quanto maior o tempo de adoção da SD maior será o caráter fonte de N da MOS (Oliveira et al., 2002).

A SD é, muitas vezes, introduzida em áreas com um certo grau de degradação. Neste sentido, Sá (1996) observou que até o quarto ano da implantação da SD o caráter dreno da MOS foi maior que o caráter fonte. O autor observou ainda que dependendo das condições edafoclimáticas e da seqüência estabelecida em rotação de culturas, após o quarto ano ocorreu restabelecimento entre a demanda e a oferta de N no sistema. Mas, somente após 9 a 12 anos da implantação ocorreu maior liberação de N no sistema. Em virtude disso, normalmente recomenda-se para o manejo da adubação nitrogenada na SD, principalmente fase inicial de

adoção, doses de N de 10 a 30% maiores que as aplicadas no PC (Ceretta, 1997; Ceretta & Fries, 1998) e de no mínimo 30 kg ha⁻¹ de N na semeadura (Rice et al., 1986; Sá, 1996).

Avaliando a resposta do milho ao fertilizante nitrogenado em SD sobre diferentes adubos verdes, Sá (1996) verificou que a maior dose de N-fertilizante na sucessão aveia-preta/milho proporcionou o mesmo rendimento de grãos que uma dose menor de N-fertilizante na sucessão ervilhaca/milho. Power et al. (1986), avaliando o aproveitamento do N dos resíduos de soja e milho marcados com ¹⁵N pela mesma cultura em sucessão, verificaram que, praticamente todo N-orgânico contido no resíduo da soja foi utilizado pela planta de soja subsequente, mas nada do N-orgânico proveniente do resíduo vegetal de milho foi utilizado pelo milho cultivado em sucessão.

A velocidade de decomposição/mineralização e, conseqüente utilização do N contido no adubo verde, resíduos de culturas comerciais e plantas daninhas, depende das suas características, principalmente a relação C/N, lignina/N e polifenóis/N, teor de N, de lignina e de polifenóis (Myers et al., 1994; Palm & Sanchez, 1991). Existem fatores ambientais que também afetam a disponibilidade do N no solo para as plantas, relacionados à sua ação sobre a atividade dos microrganismos decompositores (quimiorranotróficos), destacando-se a temperatura e a umidade (Gava et al., 2002), o teor e a localização da MOS (Dick, 1983) e a quantidade de resíduo vegetal deixado ou adicionado ao solo (Amado et al., 2002).

A imobilização do N aplicado ao solo pela biomassa microbiana na SD pode ser significativa quando o fertilizante é aplicado sobre a superfície do solo, devido à maior presença de material orgânico nessa camada (Amado et al., 2002). Isso ocorre com maior intensidade numa seqüência de culturas com predominância de gramíneas (alta relação C/N), que podem, pelo menos nos primeiros anos de SD, ocasionar a imobilização do N, o que poderá acarretar queda significativa na produtividade do milho. Além da menor disponibilidade de N, devido ao processo de imobilização, podem ocorrer perdas por processos de lixiviação, desnitrificação e volatilização (Fancelli & Favarin, 1989).

Os restos vegetais que permanecem no solo após a colheita têm menor taxa de mineralização na SD, a qual, associada a maiores adições de carbono e N, eleva seus teores no solo comparativamente ao PC (Bayer, 1996). Com isso, aumenta a atividade biológica, resultando no incremento de substâncias húmicas, especialmente os ácidos húmicos e fúlvicos, o que pode refletir sobre algumas propriedades físico-químicas, como a CTC e as formas de fósforo no solo.

O suprimento inadequado de N às plantas na SD, comparativamente ao PC, deve-se à maior perda de nitrato pela lixiviação, em razão do maior fluxo de drenagem condicionado

pela continuidade de poros e pela maior rugosidade da superfície do solo, devido à presença de palha (Muzilli, 1983; 1993; Randall & Iragavarapu, 1995). Também, por causa da menor decomposição dos restos de culturas, maior volatilização de amônia e maior imobilização microbiana (Phillips et al., 1980; Salet et al., 1997; Lopes et al., 2004). Para reduzir o processo de perda por volatilização na SD, segundo Cantarella (1993), quando a fonte de N a ser utilizada for a uréia, esta deverá ser incorporada de 0,05 a 0,10 m de profundidade, visto que os restos culturais na superfície promovem a rápida hidrólise desse fertilizante pela ação da urease e dificultam a retenção da amônia produzida.

Lara Cabezas et al. (1997) observaram perdas significativas de NH_3 por volatilização na SD, quando a uréia e o sulfato de amônio foram aplicados sobre palhada da aveia preta, sendo que a incorporação de 2 a 3 cm de profundidade contribuiu para redução dessas perdas. Os autores também observaram que a produtividade do milho correlacionou inversamente com as perdas de amônia.

Outro fator que influencia na disponibilidade de N na SD e a taxa de mineralização do N orgânico do solo e resíduos vegetais de plantas de cobertura do solo ou culturas. Neste sentido, Amado & Mielniczuk (2000), avaliando a mineralização do N no PC, CM e SD, observaram que a mineralização do N total do solo durante o ciclo do milho foi maior no PC e CM do que na SD, sendo que a disponibilidade de N das culturas de cobertura foi influenciada pela quantidade total de N na matéria seca e por sua relação C/N.

Na maioria das pesquisas sobre época de aplicação do N no milho cultivado em SD, não tem havido muita concordância sobre qual a melhor época. Alguns resultados de pesquisa têm demonstrado vantagens na aplicação do N em pré-semeadura do milho (Sá, 1996). Outros resultados demonstram a necessidade de aumento da dose de N no momento da semeadura para suprir a carência inicial em função da imobilização (Argenta & Silva, 1999), necessitando que parte do N seja fornecida em cobertura. Entretanto, existe uma série de variáveis que condicionam a dinâmica do N na SD, principalmente o tipo de solo, a precipitação (Diekow et al., 1998; Basso & Ceretta, 2000), a cultura antecessora (Amado et al., 2002), o esquema de rotação/sucessão de culturas e o tempo de adoção da SD (Lopes et al., 2004). Segundo Wiethölter (2000) a possibilidade de aplicação antecipada do N no milho para a cultura antecessora, depende essencialmente da ocorrência de chuvas na primavera. Se houver chuvas em excesso, poderá ocorrer lixiviação de N para promover deficiência de N. Neste caso, segundo o autor seria melhor a aplicação de parte do N na semeadura e a cobertura a partir de quatro a seis folhas.

Sá (1996), estudando os níveis de N na semeadura (0, 30, e 60 kg ha⁻¹) combinada à cobertura (0, 60 e 120 kg ha⁻¹) aplicada toda aos 35 dias após a semeadura (DAS) e 50% aos 35 DAS e o restante aos 55 DAS observou que a resposta em produtividade na dose de 30 kg ha⁻¹ de N na semeadura foi superior à dose de 120 kg ha⁻¹ em cobertura. O autor citou também, que a dose de 30 kg ha⁻¹ de N elimina a carência inicial devido à imobilização de N, causado pela decomposição dos resíduos da aveia.

Lera et al. (2000), estudando épocas de aplicação do ¹⁵N-uréia em SD, aplicando 45 dias antes da semeadura do milho e no estágio seis folhas, observaram que o N inorgânico aplicado antes da semeadura concentrava-se principalmente na camada de 0 a 10 cm, na forma de nitrato. Verificaram que no estágio seis folhas a maior parte do N ainda permanecia na camada de 0 a 0,2 m; no entanto, no estágio 12 folhas quase todo N aplicado antecipadamente encontrava-se abaixo de 0,2 m e o aplicado em cobertura encontrava acima. Apesar das diferenças nos teores do elemento no solo, não foi observada diferença na produtividade de matéria seca e teores de N na parte aérea, raízes e grãos.

Cantarella et al. (2003) observaram que quando se aplicou o N-fertilizante em pré-semeadura do milho, cerca de 30 dias, não foram verificados aumentos na eficiência de utilização do N e no rendimento de grãos, em relação à aplicação do N em pós-emergência da cultura do milho no estágio fenológico seis folha totalmente expandidas.

Em síntese, os dados de pesquisas realizados no Brasil (Silva et al., 1997; Basso & Ceretta; 2000; Coelho et al., 2002; Sangoi et al., 2002; Cantarella et al., 2003) indicam que não é possível generalizar a recomendação de N, substituindo indiscriminadamente a aplicação de parte do N na semeadura e o restante em cobertura, pela aplicação de parte do N na cultura antecessora e parte na semeadura. Esse fato é, ainda, mais complexo na região de cerrado, onde as condições climáticas limitam a produtividade de matéria seca das plantas de cobertura, principalmente pela baixa precipitação que ocorre no inverno/primavera.

Sabe-se que a absorção de N (ou de qualquer outro nutriente) é determinada pela velocidade de sua absorção por unidade de superfície de raiz, pela extensão e morfologia do sistema radicular. Mengel & Barber (1974) observaram que o fluxo de N, expresso por μM de N por metro de raiz por dia, atingiu um máximo aos 20 dias e que aos 70 dias este fluxo era reduzido a apenas 0,5% do atingido aos 20 dias. Esta maior eficiência inicial permitiu que, mesmo com um sistema radicular reduzido, a planta absorvesse considerável quantidade de N, cujo máximo ocorreu aos 50 dias de idade. O grande fluxo de N nas raízes das plantas jovens de milho indica que é desejável um maior teor de N no solo na fase inicial de desenvolvimento das plantas, que no final do ciclo, pois quando houver menor concentração

de N na solução do solo e menor eficiência na absorção, estas poderão ser compensadas pela maior extensão do sistema radicular, justificando o uso de maiores doses de N no início da implantação da cultura do milho, principalmente quando as condições do meio são mais propícias à imobilização microbiana do N.

Barber (1984), usando modelo mecanístico-matemático mostrou, em análise de sensibilidade, que a absorção de N aumentava linearmente com a taxa de crescimento das raízes e aumento do diâmetro médio das raízes (parâmetros relacionados com a área do sistema radicular), e com o aumento da velocidade máxima de absorção de N por metro de raiz. Assim, a eficiência máxima na absorção de N deve ser encontrada em plantas que tenham alta velocidade máxima de absorção e um sistema radicular extenso e em contínua expansão ao longo do desenvolvimento da cultura. Porém, na prática, foi observado que a velocidade de absorção de N por metro de raiz diminuía com a idade da planta.

Estudando o acúmulo de massa seca e de N na cultura do milho irrigado França et al. (1994) observaram que a maior parte do N na planta foi acumulada até o pendoamento, atingindo valores de 88% e 93%, nas regiões de Janaúba e Sete Lagoas, respectivamente. Estes dados corroboram com os de Mengel & Barber (1974), mostrando a importância de se manter altos níveis de N mineral no solo nos estádios iniciais da cultura do milho.

O maior fornecimento do N nos estádios iniciais de crescimento do milho favorece também à uma maior absorção de fósforo, principalmente, em virtude do maior desenvolvimento radicular (Marschner, 1995; Novais & Smith, 1999; Scivittaro et al., 2000). Isto proporciona maior potencial de produtividade de milho, especialmente nos solos da região do cerrado, onde um dos principais nutrientes limitantes da produção é o P, devido a grande capacidade de fixação dos mesmos (Magalhães, 1996; Novais & Smith, 1999). A disponibilidade de fósforo também influencia na forma de N absorvida, e em condições de deficiência de P a principal forma absorvida é a amoniacal (Magalhães, 1996).

Duarte (2003), avaliando resposta de cultivares de milho ao N em SD (30 kg ha⁻¹ na semeadura e 60, 120 e 180 em cobertura), verificou que o aumento da produtividade foi obtido com a redução da eficiência de uso do N na planta (unidade de massa na planta por unidade de N) e do fertilizante (N acumulado na planta/N aplicado) e, ao mesmo tempo, com aumento da partição de N nos grãos (N acumulado nos grãos/N acumulado na planta) e da eficiência de uso do N nos grãos.

Fernandes et al. (1998), estudando três sistemas de cultivo do solo (SD, PC e CM) e quatro doses de N em cobertura (0, 60, 120 e 240 kg ha⁻¹), verificaram que os dados de produção de grãos e de palhada se ajustaram a funções quadráticas em relação às doses de N e

que doses de 70 a 71 kg ha⁻¹ de N seriam suficientes para a obtenção de 90% da produção máxima de grãos, sendo de 147 a 168 kg ha⁻¹ de N, dependendo do sistema, atingiria produtividades de 4640 a 6177 kg ha⁻¹ de grãos.

Amado et al. (2000) observaram menor rendimento de milho na SD comparada ao PD, mas, verificaram também aumento no teor de N total do solo devido à inclusão de leguminosas no esquema de sucessão de culturas. Já, Carvalho et al. (2004), em condições de edafoclimáticas de cerrado, observaram produtividade de milho em SD cultivado em sucessão à adubos verdes (milheto, crotalária, guandu, mucuna e pousio) por dois anos agrícolas semelhante e inferior à do PC. As diferenças observadas entre os sistemas de cultivos normalmente são em função das diferentes condições de solo e de clima local no ano agrícola vigente, impossibilitando generalizações de recomendação e manejo da adubação nitrogenada.

2.6 Uso de plantas de coberturas (adubos verdes) nos agroecossistemas

Atualmente são cultivados no Brasil, cerca de 47,4 milhões de hectares com culturas anuais (Conab, 2005). Pequena parte dessa área é manejada na entressafra com plantas de cobertura do solo, ficando o restante exposto à ação da erosão e lixiviação de nutrientes e infestação por plantas daninhas. O cultivo de plantas de cobertura tem mostrado eficiência no controle da erosão, aumento no teor de MOS, reciclagem de nutrientes (Miyazawa et al., 1993; Calegari, 2004) e redução das perdas por lixiviação de nutrientes, principalmente de nitrato (Gonçalves et al., 2000).

A utilização da SD altera a dinâmica das formas N no solo, favorecendo o aumento do carbono orgânico e do N total do solo, o qual é mais acentuado na camada superficial e, com o tempo, estende-se para as camadas mais profundas (Bayer & Mielniczuck, 1997). Entretanto, existe uma série de variáveis que condicionam a dinâmica do N na SD, principalmente condições climáticas, o tipo de solo e a precipitação. O não revolvimento do solo aliado à adição de carbono orgânico através do cultivo de adubos verdes e a manutenção dos resíduos sobre o solo favorecem decomposição lenta e gradual desses resíduos, liberando compostos orgânicos que estimulam a formação e estabilidade dos agregados no solo, melhorando a sua estrutura (Six et al., 2002). Em adição, os resíduos vegetais contêm macro e micronutrientes em formas orgânicas lábeis, que podem tornar disponíveis para cultura subsequente, mediante a mineralização, dentre eles principalmente o N (Henrichs et al., 2000; Scivittaro et al., 2000; Amado et al., 2002; Muraoka et al., 2002; Ambrosano et al., 2003; Calegari, 2004; Carvalho et al., 2004).

O cultivo de adubos verdes no período de entressafra pode proporcionar suprimento de N para a cultura do milho. Entretanto, para o manejo da adubação nitrogenada deve-se observar as características do adubo verde ou do resíduo vegetal da cultura cultivada anteriormente, principalmente sua relação C/N, buscando um sincronismo de decomposição/mineralização do N-orgânico, com a curva de acumulação de N pelo milho (Myers et al., 1994; Amado et al., 2002).

Com o uso da prática de adubação verde é possível recuperar a fertilidade do solo, proporcionando aumento na CTC e disponibilidade de nutrientes às plantas; aumentar a formação e estabilização dos agregados; melhorar as condições para infiltração e armazenamento de água no solo e de aeração; diminuir a amplitude térmica; controlar fitoparasitas e fitopatógenos e, fornecer N obtido pela fixação biológica, especialmente por leguminosas (Igue, 1984; Calegari, 2004).

Além desses benefícios, estudos recentes têm demonstrado que as plantas de cobertura liberam, durante a sua decomposição, ácidos orgânicos de baixo peso molecular, tais como, cítrico, málico, t-aconítico entre outros. Alguns desses ácidos orgânicos podem competir pelos sítios de adsorção com o fósforo, deixando o nutriente mais disponível para as plantas na solução do solo (Maurer, 2004). Esses compostos presentes na planta na forma de anions orgânicos, no solo formam complexos organo-metálicos com cátions polivalentes como Ca^{2+} e Mg^{2+} , aumentando sua mobilidade no perfil do solo. Por outro lado, cátions monovalentes como o K^+ e o NH_4^+ acumulam-se na superfície do solo, por não formarem complexos organo-metálicos (Franchini et al., 1999).

Segundo Miyazawa et al. (2000), mesmo em pH baixo, o alumínio presente na solução do solo pode encontrar-se em formas que influenciam menos o crescimento das plantas, devido estar complexado com ligantes orgânicos oriundos na decomposição de resíduos orgânicos. Isto, por sua vez, determina um menor potencial químico de causar toxidez às plantas. Em adição, durante a decomposição são liberadas também bases e/ou sais que favorecem o aumento do pH do solo e/ou promovem maior tamponamento do mesmo (Cassiolato et al., 2000), o que pode, em partes, contrabalançar o efeito acidificante de fertilizantes nitrogenados amoniacais ou amídicos.

A quantidade de anions orgânicos nas plantas é mais abundante na época de pleno crescimento vegetativo ou início do florescimento, reduzindo com a idade fisiológica da planta, devido à redução nos teores de cátions e carbono solúvel. Isto explica a menor capacidade dos resíduos vegetais de culturas comerciais em neutralizar a acidez do solo, em média, um terço em relação à dos resíduos de plantas de cobertura (Miyazawa et al., 1993;

Franchini et al., 2001).

Os efeitos na química do solo proporcionado pelos compostos orgânicos presentes nos resíduos vegetais de plantas de cobertura são transientes. Porém, podem mitigar os efeitos acidificantes causados por grupos carboxílicos e fenólicos gerados durante a decomposição de resíduos vegetais, a reação dos adubos nitrogenados amídicos e amoniacais (processo de nitrificação) e a exportação de bases pelas colheitas (Franchini, et al., 2004; Anghinoni et al., 2004). Contudo, tais efeitos contrapõem-se aos benefícios de longo prazo associados à dinâmica da MOS, sendo assim, é viável também, a inclusão no esquema de rotação/sucessão de culturas, plantas que adicione ao solo maiores quantidades de resíduos e com maior relação C/N para o aumento do seu teor, a qual além de fornecer N para as plantas, pode formar complexos de alumínio com ácidos húmicos, e constitui na principal responsável pela CTC dos solos tropicais (Raij, 1991).

A adição regular de resíduos de adubos verdes nos solos tropicais, nos quais a MOS é geralmente inferior a 3%, contribui para a conservação do solo e da água, promovendo, principalmente na melhoria da estrutura, o que favorece a aeração e a infiltração de água no solo, assim como, menor amplitude térmica, favorecendo maior desenvolvimento do sistema radicular (Sá et al., 2004a). Sá et al. (2004b) observaram que quanto maior foi a quantidade de palha na superfície do solo, maior foi o desenvolvimento do sistema radicular do milho, sendo este de 42%, 41% e 38%, nas camadas de 0-0,1; 0,1-0,4 e 0,4-1,0 m, respectivamente. Os autores observaram também que quanto maior a presença de palha na superfície, maior foi a extração de nutrientes pelo milho, sendo que em ordem decrescente o potássio teve maior extração seguido do nitrogênio e do fósforo.

O maior benefício de adubos verdes, entretanto é, obviamente, o fornecimento de nutrientes e dentre eles o mais importante é o N (Scivittaro et al., 2000; Amado et al., 2002; Muraoka et al., 2002; Ambrosano et al., 2003). Aita et al. (2001), avaliando a uso de gramínea, leguminosa e pousio no inverno, evidenciaram a possibilidade de redução das quantidades de N mineral a aplicar no milho, quando este for cultivado após leguminosas. Isto se deve a fixação de N e à rápida decomposição em função da menor relação C/N. Carvalho et al. (1996), comparando as espécies de adubos verdes *Crotalaria juncea*, *Crotalaria ochroleuca*, *Cajanus cajan*, *Canavalia ensiformis*, *Mucuna aterrima* e *Brachiaria ruziziensis* verificaram a influência positiva das leguminosas sobre o rendimento de milho proporcionado pelo fornecimento de N.

De-polli & Chada (1989), estudando a adubação verde incorporada ou em cobertura na produção de milho em solo de baixo potencial de produtividade, verificaram que esta

propiciou produtividade até maior que a adubação com N mineral. A prática conservacionista da adubação verde demonstrou ser altamente viável, proporcionando produtividade até quatro vezes a do controle.

Dentre as plantas de cobertura do solo que podem ser utilizadas na região de cerrado para formação de cobertura do solo para a SD, destacam-se o milheto (*Pennisetum americanum*) (Salton & Kichel, 1998; Carvalho et al., 2004) e a crotalária (*crotalaria juncea*) (Amabile et al., 1999; EMBRAPA, 1999).

O milheto, que é uma planta anual da família das gramíneas de clima tropical, originária, provavelmente, das Savanas Africanas, apresenta crescimento ereto com porte alto, podendo atingir até 4 m de altura e é conhecida como pasto italiano na região Sul do Brasil. Apresenta condições de desenvolver-se e produzir grãos em condições extremamente secas e solos de baixa fertilidade, respondendo, entretanto, muito bem à adubação. O ciclo da planta é de aproximadamente 130 dias, podendo variar em função das condições climáticas e da época de semeadura. A produção de matéria seca de parte área pode ser superior a 15 t ha⁻¹ e a produtividade de grãos entre 500 a 1500 kg ha⁻¹. Para fins de cobertura do solo em SD, recomenda-se realizar o manejo químico ou mecânico quando a cultura apresentar cerca de 5% de panículas emitidas (Salton & Kichel, 1998).

A crotalária é uma planta originária da Índia com ampla adaptação às regiões tropicais. É arbustiva, de crescimento ereto e determinado, produzindo fibra com celulose de alta qualidade, própria para indústria de papel e outros fins. Recomendada para adubação verde é uma espécie de crescimento rápido, atingindo na estação normal de semeadura altura de 3,0 a 3,5 m. É considerada má hospedeira de nematóides. Apresenta produtividade média que varia de 10 a 15 t ha⁻¹ de matéria seca. O ciclo do plantio a colheita pode chegar a 180 dias, dependendo das condições climáticas e época de semeadura. Para fins de adubação verde recomenda-se manejar quando a planta apresentar máxima produção de matéria seca, que culmina com o florescimento (Fahl et al., 1998).

2.7 Método do traçador isotópico para nitrogênio – Princípio da diluição isotópica

Existem oito isótopos do elemento nitrogênio (Tabela 1), porém, somente os de números de massa 14 ou 15 são estáveis, os demais são radioativos artificiais de meia vida muito curta, limitando o seu uso em pesquisas sobre o ciclo biogeoquímico do N. O uso dos isótopos estáveis ¹⁴N e ¹⁵N como traçadores é fundamentado nas suas abundâncias naturais, respectivamente, numa razão de 99,634% e 0,366% ou 273:1. Portanto, compostos

nitrogenados com suas proporções alteradas artificialmente podem ser usados como traçadores, monitorando-se a taxa na qual muda o seu conteúdo e o enriquecimento de ^{15}N , devido à diluição pelo influxo de ^{14}N .

Tabela 1 - Isótopos do elemento nitrogênio.

Isótopos	Abundância Natural	Tipo de Desintegração Radiação	Meia Vida
^{12}N	-	Beta +	0,011 segundo
^{13}N	-	Beta +	9,97 minutos
^{14}N	99,634%	estável	-
^{15}N	0,366%	estável	-
^{16}N	-	Beta -	7,13 segundos
^{17}N	-	Beta -	4,17 segundos
^{18}N	-	Beta -	0,02 segundo
^{19}N	-	Beta -	0,32 segundo

Fonte: Heath (1973).

De maneira geral, a maioria das pesquisas que utilizam o N como traçador foram realizadas com compostos enriquecidos no “isótopo pesado” ^{15}N , ou seja, materiais que tem a concentração maior que 0,366% em átomos de ^{15}N . Por outro lado, alguns trabalhos de pesquisa agrícola também utilizam materiais empobrecidos em ^{15}N , ou seja, materiais que apresentam concentração menor do que 0,366% em átomos de ^{15}N (Legg et al., 1979; Kitur et al., 1984; Power et al., 1986).

As aplicações do método do traçador com o ^{15}N permitem avaliar as transformações individuais do N no solo, mesmo quando múltiplas transformações ocorrem simultaneamente no meio, fornecendo informações acerca do sistema e estimando as taxas de transformação do N. As pesquisas que utilizam o isótopo estável ^{15}N , em estudos dos processos de transformação do N no sistema solo-planta, com sua abundância natural alterada podem ser classificadas, de acordo com Hart & Myrold (1996), em quatro grupos: (i) técnica do traçador ^{15}N – quando um substrato ou fonte é marcado com ^{15}N e o movimento do isótopo no sistema é monitorado no tempo, de forma qualitativa e/ou quantitativa; (ii) técnica do princípio da diluição isotópica – quando um “pool” de N do solo é marcado com ^{15}N e a taxa na qual muda seu conteúdo e o seu enriquecimento de ^{15}N (porcentagem de átomos) é monitorada, devido à diluição pelo influxo de ^{14}N ; (iii) técnica da abundância natural de ^{15}N - quando leves

diferenças no enriquecimento em ^{15}N são usadas para avaliar as relações substrato-produto a longo prazo; (iv) técnica da distribuição dos isótopos de N - aplicada exclusivamente para a reação de desnitrificação, quando o $^{15}\text{NO}_3^-$ da origem ao $^{15}\text{N}_2\text{O}$ e $^{15}\text{N}_2$.

A recuperação, eficiência de utilização ou aproveitamento do N pelas plantas, pode ser determinada também pelo método da diferença, onde a quantidade do N absorvido pelas plantas é calculada mediante a diferença entre o N total absorvido nas parcelas com aplicação de N e uma testemunha sem aplicação de fertilizante nitrogenado. A grande vantagem da técnica isotópica é a exclusiva possibilidade de separar nas várias partes da planta a fração de um nutriente proveniente do fertilizante, daquele do solo, permitindo avaliar com maior precisão os efeitos dos tratamentos sobre a planta.

O método da diferença dá, freqüentemente, uma eficiência maior do N aplicado em relação ao método isotópico (Hauk & Bremner, 1976; Neptune, 1977), não sendo raro encontrar valores de recuperação acima de 100%. As discrepâncias entre resultados obtidos pelas duas metodologias são atribuídas ao aumento da mineralização do N do solo e o maior desenvolvimento do sistema radicular, explorando maior volume de solo nos tratamentos com adição de N-mineral (Jansson & Persson, 1982; Jenkinson et al., 1985; Rao et al., 1992). Outro aspecto que deve ser considerado é quando a recuperação aparente do fertilizante é calculada pelo método indireto, a qual depende, grandemente, de boas estimativas do N absorvido pela cultura no tratamento controle, e que variações não explicadas resultam em estimativas inadequadas do N absorvido, podendo até obter-se dados de recuperação negativa. Isto socorre pelo fato de que o método da diferença apresenta como condição básica que a quantidade de nutrientes absorvidos pelo tratamento testemunha representa exatamente aquela absorvida do N do solo nos tratamentos com fertilizante nitrogenado.

2.7.1 Eficiência de utilização do nitrogênio pela cultura do milho

A dinâmica do N no sistema solo-planta e, conseqüente eficiência de sua utilização pela planta, é condicionada principalmente pelo sistema de cultivo, formas de manejo do N e condições edafoclimáticas (Kitur et al., 1984; Meisinger et al., 1985; Amado et al., 2002). Normalmente grande parte do N aplicado não é utilizada pela cultura do milho (Lara Cabezas et al., 2000; Scivittaro et al., 2003), e o uso de uma fonte marcada com ^{15}N constitui-se no único método que permite quantificar com maior precisão a eficiência de utilização desse nutriente (Mohammed et al., 1995) e possibilita também quantificar a contribuição do N

proveniente do solo (Timmons & Baker, 1992; Elabbadi et al., 1996).

A maioria dos trabalhos demonstra que existe uma grande variação no aproveitamento do N do fertilizante pelo milho, raramente ultrapassando 50% do aplicado como fertilizante inorgânico (Scivittaro et al., 2000) e 20% de fontes orgânicas no caso de adubos verdes (Azam et al., 1985; Ambrosano, 1995; Muraoka et al., 2002). Essas diferenças ocorrem em função de diversos fatores, destacando-se as condições edafoclimáticas, o tipo de fertilizante e o sistema de cultivo (Meisinger et al., 1985; Lara Cabezas, et al., 2000). Estudos com milho cultivado em SD foram encontrados diferentes valores de eficiência de utilização do N do fertilizante 46% (Kitur et al., 1984); 10% (Timmons & Cruse, 1990); 42% (Timmons & Baker, 1992); 30% (Lara Cabezas et al., 2000); 37% (Gava, 2003); 48% para o N aplicado em pré-semeadura e 66% para o N aplicado em cobertura (Cantarella et al., 2003) e 40,4% para o N aplicado em pré-semeadura e 79,2% para o N aplicado em cobertura (Campos, 2005). De maneira geral, as médias de aproveitamento do N do fertilizante, nos estudos citados anteriormente, foram de 43% para a planta toda e 28% para os grãos. Isto equivale ao acúmulo de aproximadamente 65% do N proveniente do fertilizante nos grãos e 35% nas demais partes da planta.

Coelho (1987) encontrou aproveitamento do N pelo milho em Latossolo Vermelho de cerrado, na dose de 60 kg ha⁻¹, calculada pelo método isotópico e da diferença, respectivamente, de 56 e 63 %, indicando que o método da diferença superestimou a recuperação em 7 %.

Em experimento onde foi estudada a resposta do milho a diferentes doses de N em dois locais, Liang & Mackenzie (1994) verificaram que a eficiência de utilização do nitrato de amônio-¹⁵N, na dose de 170 kg ha⁻¹ de N foi de 22 a 30% nos dois locais em estudo. Quando utilizaram a dose 400 kg ha⁻¹ de N, a eficiência de utilização variou entre 9 e 22% para os dois locais. Nos anos subseqüentes, houve aumento na eficiência de utilização do fertilizante uma vez que os restos de cultura permaneceram no local do experimento. Os autores concluíram que a eficiência de utilização de N, avaliada pelo método do ¹⁵N, variou com o ano, com o local, com a dose aplicada e foi altamente dependente da produtividade da cultura.

Villas Bôas (1990) observou que o aproveitamento do N-uréia pelo milho, calculada pelos métodos, isotópico e da diferença, foi, respectivamente de 28,2% e 25,0% aos 70 dias após a semeadura (DAS); 40,7% e 45,0% aos 105 DAS e de 32,7% e 41,0% aos 135 DAS. O autor também observou que dos 32,7% de N utilizado pela planta de milho aos 135 DAS cerca de 23,9 % foi encontrado no grão, 4,5% no caule, 1,4% na palha, 1,2% na folha, 0,9 % no sabugo e 0,4 % na raiz.

Coelho et al. (1991), avaliando o balanço de N na cultura do milho com a aplicação de 60 kg ha⁻¹ de ¹⁵N-uréia, obtiveram eficiência de utilização do fertilizante de 56 %. Na camada de solo de 0 a 90 cm de profundidade, permaneceram 23 % do N do fertilizante, sendo que 15 % foram perdidos do sistema. Os autores observaram também que praticamente não houve variação isotópica do N nas diversas partes da planta. Ulloa et al. (1982) observaram que de 30% do N proveniente do fertilizante no final do ciclo da cultura do milho 10,6% foi encontrado na palha (restos da cultura) e 19,4% no grão. Observaram também que o aproveitamento do N do fertilizante aumentou conforme os estádios da cultura até a época de maturação. Lara Cabezas et al. (2000), avaliando a eficiência de utilização do N da uréia e do uran pelo milho, através do método isotópico, em SD sobre palhada de milheto em Uberlândia-MG, encontraram valores inferiores a 30% do N aplicado, independente do modo de aplicação, superficial ou incorporado.

A relativa baixa eficiência de utilização do N dos fertilizantes pelas culturas deve-se aos processos de perda por volatilização de amônia e desnitrificação, escoamento superficial, lixiviação e a imobilização microbiana. Com isso, para maximizar o uso do N, deve-se colocar o fertilizante em local, época e dose mais adequada, aliada ao sistema de manejo do solo e regime hídrico (Sims et al., 1998; Lara Cabezas et al., 2000; Amado et al., 2002).

Verifica-se, portanto, que a resposta da cultura do milho ao N, depende muito do sistema de manejo do solo, devido à sua dinâmica no sistema solo-planta ser dependente da temperatura, umidade e microrganismo, tipo de resíduos, histórico da área, dentre outros, justificando-se modelos diferenciados entre sistemas de cultivos. Assim, estudos de doses e época de aplicação do elemento, aliado ao uso de plantas de cobertura do solo, avaliando sua eficiência de utilização pelo milho, faz-se, portanto, necessários, no intuito de aumentar o seu aproveitamento e a produtividade do milho, com o mínimo risco ambiental.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e caracterização da área experimental

O experimento de campo foi desenvolvido na fazenda experimental da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP, e as análises laboratoriais realizadas no CENA/USP. A área experimental localiza-se no município de Selvíria-MS, cujas coordenadas geográficas são de 51° 22' W e 20° 22' S e 335 m de altitude. Segundo a classificação internacional de Köeppen, o clima da região é do tipo Aw, definido como tropical úmido com estação chuvosa no verão e seca no inverno, apresentando temperatura média anual de 24,5°C, precipitação pluviométrica média anual de 1370 mm e umidade relativa média de 64,8 % (Hernandez et al., 1995). Os dados de precipitação pluviométrica e temperaturas médias, ocorridos durante a condução do experimento nos anos agrícolas 2001/02, 2002/03 e 2003/04, encontram-se no apêndice A.

O solo do local foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico, argiloso, A moderado, hipodistrófico, álico, caulínítico, férrico, compactado, muito profundo, moderadamente ácido, fase cerrado, relevo suave ondulado (LVd) (Embrapa, 1999a). A área experimental apresentava um histórico de 19 anos com PC com culturas anuais (feijão, soja, milho e arroz) e os últimos cinco anos em SD, sempre permanecendo em pousio nas entressafras, tendo sido cultivada com a cultura do arroz no último ano agrícola. Antes da implantação da SD na área (1996/97) foi realizada uma calagem com calcário dolomítico, no intuito de se elevar a saturação por bases a 70%, e uma escarificação para eliminar possíveis camadas compactadas.

Antes da instalação dos ensaios foram realizadas amostragens do solo, nos meses de julho de 2001 e julho de 2002, nas camadas de 0 a 0,10; 0,10 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m, para a caracterização química (Tabela 2), conforme metodologias descritas em Raij et al. (2001). As análises granulométricas foram determinadas pelo método da pipeta, conforme metodologia descrita em Day (1965), observando-se os teores médios de 420, 530 e 50 g kg⁻¹ de areia, argila e silte, respectivamente. Foi realizada também, nas mesmas épocas e camadas do solo, a caracterização da macroporosidade, microporosidade e porosidade total, de acordo com o

método da mesa de tensão, e da densidade do solo (Tabela 3), pelo método do anel volumétrico (Embrapa, 1997). A média dos resultados da análise química do solo das camadas de 0 a 0,10 e 0,10 a 0,20 m foi utilizada para cálculo da adubação com potássio, fósforo e zinco para o milho, para uma faixa de produtividade esperada de 10 a 12 toneladas de grãos, conforme Raij et al. (1996).

Tabela 2 – Médias dos resultados das análises químicas do solo, em amostras coletadas antes da instalação dos ensaios, nos meses de julho de 2001 e julho de 2002.

Camada	pH CaCl ₂	N total	MO	P resina	Ca	Mg	K	Al+H	S	Cu	Fe	Mn	Zn
m		g kg ⁻¹	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	-----mmol _c dm ⁻³ -----				-----mg dm ⁻³ -----				
Ano 2001													
0,0-0,1	5,1	0,9	21,1	11,9	17,7	15,7	2,3	22,1	6,5	2,5	16,1	20,2	0,5
0,1-0,2	4,8	0,8	19,2	6,0	11,5	7,4	1,0	23,5	6,0	2,5	16,7	16,2	0,3
0,2-0,4	4,6	0,5	11,8	2,8	7,8	6,6	0,7	19,6	9,3	1,5	8,3	4,5	0,1
Ano 2002													
0,0-0,1	5,1	0,9	19,7	15,2	19,2	16,6	3,4	24,4	6,5	3,17	15,6	38,3	0,8
0,1-0,2	4,5	0,7	16,2	4,9	8,4	6,9	1,6	30,9	6,1	2,37	13,5	29,5	0,4
0,2-0,4	4,7	0,5	16,4	2,0	7,1	5,9	0,8	24,4	8,5	1,65	6,8	18,5	0,2

Tabela 3 – Valores médios referentes a macroporosidade, microporosidade, porosidade total e densidade do solo, em amostras coletadas antes da instalação dos ensaios, nos meses de julho de 2001 e julho de 2002.

Camada	Macroporosidade	Microporosidade	Porosidade total	Densidade do solo
m	----- m ³ m ⁻³ -----			kg dm ⁻³
Ano 2001				
0,0 - 0,1	0,09	0,33	0,42	1,55
0,1 - 0,2	0,10	0,32	0,42	1,49
0,2 - 0,4	0,14	0,32	0,46	1,33
Ano 2002				
0,0 - 0,1	0,10	0,33	0,43	1,55
0,1 - 0,2	0,11	0,32	0,43	1,45
0,2 - 0,4	0,13	0,32	0,45	1,33

O experimento constou de dois ensaios, conduzidos nos anos agrícolas de 2001/02 e de 2002/03, em duas áreas individuais e anexas, com o mesmo histórico de uso e manejo. Durante o período em que foi conduzido o primeiro ensaio, a área do segundo foi mantida roçada e dessecada. Nas mesmas áreas (parcelas e microparcelas), foi cultivado milho, no respectivo ano agrícola subsequente, 2002/03 e 2003/04, com a finalidade de se avaliar do efeito residual das plantas de cobertura do solo (milheto, crotalária e vegetação espontânea - pousio) sobre a produtividade do milho e o aproveitamento do N remanescente do milheto, da crotalária e do fertilizante ^{15}N -uréia utilizados no ano agrícola antecedente.

3.2 Delineamento experimental e caracterização dos tratamentos

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados com 24 tratamentos e quatro repetições (Tabela 4), dispostos em um esquema fatorial incompleto ($3 \times 3 \times 2$) + 6 tratamentos adicionais, sendo três tratamentos controles sem a aplicação de N (0 kg ha^{-1} de N no milho sobre crotalária, milheto e pousio) e três tratamentos que receberam somente 30 kg ha^{-1} de N na semeadura (30 kg ha^{-1} de N no milho sobre crotalária, milheto e pousio). Os demais tratamentos constituíram-se pela combinação de três doses de N no milho: 80, 130 e 180 kg ha^{-1} , aplicando-se 30 kg ha^{-1} de N na linha de semeadura e o restante (50, 100 e 150 kg ha^{-1} de N) em cobertura; três sistemas de cobertura do solo: pousio e, milheto e crotalária (marcados com ^{15}N -uréia) e, duas épocas de aplicação do N em cobertura: estágio quatro folhas ou estágio oito folhas plenamente expandidas (linha de união lâmina-bainha, “colar”, facialmente visível). Os tratamentos controles tiveram como função permitir isolar os efeitos das plantas de cobertura do solo daquele do N aplicado na semeadura e do N aplicado em cobertura.

O fertilizante ^{15}N -uréia foi utilizado nos tratamentos em que o milho recebeu somente a aplicação de 30 kg ha^{-1} de N na semeadura, e na cobertura dos tratamentos que receberam a dose de 50, 100 e 150 kg ha^{-1} de N, aplicado nos estádios quatro ou oito folhas. A crotalária ou milheto marcados com ^{15}N foram utilizados somente nos tratamentos receberam a aplicação do N no estágio quatro folhas, nos tratamentos controles (0 kg ha^{-1} de N) e nos tratamentos que receberam apenas 30 kg ha^{-1} de N na semeadura dentro da respectiva sucessão (Tabela 4).

As parcelas experimentais constituíram-se de oito linhas de 0,80 m de largura e 7,0 m de comprimento, considerando-se como área útil as quatro linhas centrais, desprezando-se 1,0 m em cada extremidade. Os tratamentos que receberam uréia, milheto ou crotalária

marcados com ^{15}N , tiveram microparcelas próprias (separadas) de 1,0 x 2,40 m (três linhas de milho de 1,0 x 0,80 m) dentro da parcela do respectivo tratamento.

Tabela 4 - Tratamentos utilizados de acordo com as doses e épocas de aplicação do N (^{15}N -uréia) e sistemas de cobertura do solo (pousio e, crotalária e milho marcados com ^{15}N).

Tratamento	Época de aplicação do N			Sistema de cobertura do solo
	Semeadura	Quatro folhas	Oito folhas	
	-----Dose de N, kg ha ⁻¹ -----			
T1- controle	0	0	0	Pousio
T2	30 - ^{15}N	0	0	Pousio
T3	30	50 - ^{15}N	0	Pousio
T4	30	0	50 - ^{15}N	Pousio
T5	30	100 - ^{15}N	0	Pousio
T6	30	0	100 - ^{15}N	Pousio
T7	30	150 - ^{15}N	0	Pousio
T8	30	0	150 - ^{15}N	Pousio
T9- controle	0	0	0	Crotalária marcada com ^{15}N
T10	30 - ^{15}N *	0	0	Crotalária marcada com ^{15}N *
T11	30	50 - ^{15}N	0	Crotalária marcada com ^{15}N
T12	30	0	50 - ^{15}N	Crotalária sem marcação
T13	30	100 - ^{15}N	0	Crotalária marcada com ^{15}N
T14	30	0	100 - ^{15}N	Crotalária sem marcação
T15	30	150 - ^{15}N	0	Crotalária marcada com ^{15}N
T16	30	0	150 - ^{15}N	Crotalária sem marcação
T17- controle	0	0	0	Milho marcado com ^{15}N
T18	30 - ^{15}N	0	0	Milho marcado com ^{15}N
T19	30	50 - ^{15}N	0	Milho marcado com ^{15}N
T20	30	0	50 - ^{15}N	Milho sem marcação
T21	30	100 - ^{15}N	0	Milho marcado com ^{15}N
T22	30	0	100 - ^{15}N	Milho sem marcação
T23	30	150 - ^{15}N	0	Milho marcado com ^{15}N
T24	30	0	150 - ^{15}N	Milho sem marcação

* Os tratamentos que receberam ^{15}N -uréia e/ou crotalária ou milho marcados com ^{15}N , tiveram microparcelas próprias (separadas) dentro das respectivas parcelas, para distinguir os efeitos das distintas fontes de N.

3.3 Semeadura, marcação isotópica com ^{15}N e manejo das plantas de cobertura do solo

A crotalária e o milho foram semeados mecanicamente em 17/09/01 e 24/09/02 no primeiro e segundo ano agrícola, respectivamente, utilizando-se semeadora apropriada para a SD, coincidindo com as primeiras chuvas na área. A crotalária foi semeada na densidade de 30 a 40 sementes viáveis por metro quadrado com espaçamento de 0,40 m entre linhas, segundo recomendações da Embrapa (1999b). Para o milho, foi utilizada a variedade BN 2, semeada em linhas espaçadas de 0,17 m, na dose de 20 kg ha⁻¹ de sementes, conforme recomendação de Salton & Kichel (1998).

A marcação isotópica do milho e da crotalária foi realizada diretamente no campo, em área adjacente à do experimento, utilizando-se em ambos os anos agrícolas, a dose de 30 kg ha⁻¹ de N-uréia, enriquecida em 10% de átomos de ^{15}N em excesso, exceto para o milho no segundo ano agrícola, quando foi utilizada a mesma dose, porém com 5% de átomos de ^{15}N em excesso. O fertilizante ^{15}N -uréia foi parcelado em três vezes, sendo a primeira aplicação aos 20 dias após a semeadura (DAS), aplicada toda via solo; a segunda aos 34 DAS, aplicada 50% via solo e 50% via foliar (pulverizada) e a terceira aos 48 DAS, toda via foliar. O manejo foi realizado mecanicamente com triturador de palha (triton) em 30/11/01 e 26/11/02 no primeiro e segundo ano agrícola, respectivamente. Realizou-se irrigação suplementar por aspersão nos períodos de estiagem prolongada para as plantas de coberturas do solo. Para a cultura do milho não foi realizada.

3.4 Semeadura e condução da cultura do milho

As semeaduras do milho foram realizadas mecanicamente, com semeadora apropriada para SD, em 05/12/01 e 28/11/02 no primeiro e segundo ano agrícola, respectivamente. Foram utilizadas sementes do híbrido simples Pioneer 30F80, de ciclo semiprecoce e soma térmica de 885 UC com 50% das plantas pendoadas, numa densidade de 65.000 sementes por hectare, previamente tratadas com o inseticida Thiodicarb, na dose de 700 g de i.a./100 kg de sementes. A adubação de semeadura foi de 105 kg ha⁻¹ de P₂O₅, 60 kg ha⁻¹ de K₂O e 4 kg ha⁻¹ de Zn (375 kg ha⁻¹ da fórmula NPK 08-28-16), aplicada a 0,05 m abaixo e ao lado das sementes. No mesmo dia e antes da semeadura do milho, foram aplicados os herbicidas Glyphosate e 2,4 D, nas doses de 1080 e 670 g i.a. ha⁻¹, respectivamente. O controle de plantas daninhas em pós-emergência foi realizado com o milho no estágio de cinco folhas, utilizando-se o herbicida Nicossulfuron na dose de 60 g i.a.

ha⁻¹. Para o controle da *Spodoptera frugiperda* (lagarta do cartucho) foi utilizado o inseticida Deltamethrin na dose de 75 ml ha⁻¹.

Para as microparcelas que receberam o milheto ou a crotalária marcada, as plantas presentes nestas microparcelas foram retiradas e substituídas pelas plantas marcadas com ¹⁵N logo após a semeadura do milho. Estas plantas foram previamente fragmentadas com facão, no intuito de simular o triturador de palha (triton), que foi passado em toda a área do experimento. O fertilizante ¹⁵N-uréia utilizado, em ambos os anos agrícolas (tratamentos com 30 kg ha⁻¹ de N na semeadura ou 50, 100 e 150 kg ha⁻¹ de N aplicado nos estádios quatro folhas ou oito folhas), apresentava enriquecimento de 2% em átomos de ¹⁵N em excesso para as doses 30 kg ha⁻¹ na semeadura e 50 kg ha⁻¹ de N em cobertura, e 1,5% em átomos de ¹⁵N para as doses 100 e 150 kg ha⁻¹ de N em cobertura.

A fonte de N utilizada em cobertura para todos os tratamentos foi a uréia, aplicada manualmente em um sulco superficial a 0,20 m da linha da cultura e coberta com uma camada de solo, simulando a aplicação com implemento apropriado para cobertura nitrogenada no milho em SD. As adubações nitrogenadas de cobertura foram realizadas, no primeiro ano agrícola, nos dias 28/12/01 e 14/01/02, para os estádios quatro folhas e oito folhas, respectivamente. No segundo ano agrícola, foram realizadas nos dias 20/12/02 e 06/01/03, para os estádios quatro folhas e oito folhas, respectivamente. No mesmo dia da aplicação do N no estágio quatro folhas, em ambos os anos agrícolas, foram aplicados 50 kg ha⁻¹ de K₂O, utilizando como fonte o cloreto de potássio, conforme recomendação descrita em Raij et al. (1996).

3.5 Avaliações:

3.5.1 Análises químicas do solo

Foram coletadas amostras de solo para as análises químicas antes da instalação dos ensaios, nos meses de julho de 2001 e julho de 2002, em 15 pontos (amostras simples) da área experimental do respectivo ensaio, nas camadas de 0 a 0,10; 0,10 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m. As coletas foram realizadas retirando-se uma fatia de solo de 3 a 5 cm de espessura, com auxílio de um enxadão e uma pá de corte, transversalmente aos sulcos de semeadura da cultura anterior, no espaço compreendido entre os pontos médios dos mesmos, segundo recomendação descrita pela Comissão de Fertilidade do Solo de Estado do Rio Grande do Sul e Santa Catarina - CFSRS/SC (1995) e Alves et al. (1999). Foram analisados: pH, MO, P, K, Ca, Mg, H + Al e S, segundo metodologia descrita em Raij et al. (2001), e para os

micronutrientes, Cu, Fe, Mn e Zn, foi utilizado o DTPA como extrator.

3.5.2 Estado nutricional da planta de milho, milheto e crotalária

Foram coletadas por ocasião do florescimento do milho, o terço central de dez folhas da base da espiga principal (superior), dentro da área útil das parcelas, segundo metodologia descrita em Raij et al. (1996). O material colhido foi levado ao laboratório, seco a 65°C em estufas com circulação forçada de ar por 72 horas, passado em moinho tipo Wiley e realizadas as determinações dos teores de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn e Zn, segundo metodologia descrita em Malavolta et al. (1997). Para o milheto, crotalária e vegetação espontânea (pousio), foram coletadas em 29/11/01 e 25/11/02, um dia antes do manejo mecânico dos mesmos, duas amostras da parte aérea por parcela para as análises do estado nutricional. Os procedimentos e metodologias analíticas utilizadas foram semelhantes às citados anteriormente para a cultura do milho.

3.5.3. Altura de planta e de inserção da espiga de milho

A altura da planta foi determinada, medindo-se com auxílio de uma régua graduada, por ocasião da maturação fisiológica, época em que os grãos apresentavam uma camada negra no ponto de inserção com o sabugo, à distância entre o colo da planta e a inserção da última folha. Para a espiga, a distância entre o colo da planta e a inserção da espiga principal, em amostras de 10 plantas seguidas em duas linhas da área útil da parcela.

3.5.4 Estande final

O estande final, em ambos os anos agrícolas, foi determinado cinco dias antes da colheita, contando-se as plantas em quatro linhas de dois metros na área útil da parcela.

3.5.5 Número de grãos por espiga

Avaliado através da contagem do número de grãos em duas amostras de 10 espigas, provenientes da área útil da parcelas, separadas aleatoriamente antes da trilhagem dos grãos.

3.5.6 Massa média de mil grãos

Avaliado através de duas amostragens de mil grãos por parcela da produtividade obtida, com a transformação dos dados para 13% de umidade.

3.5.7 Produtividade de grãos

As colheitas foram realizadas no final do mês abril, coletando-se manualmente as quatro linhas centrais da área útil da parcela, (exceto as plantas das microparcelas, as quais foram coletadas separadamente) desprezando-se um metro nas extremidades. As espigas

foram trilhadas mecanicamente e os dados transformados em kg ha^{-1} para 13% de umidade.

3.5.8 Teor de N nos grãos

Foi coletada aleatoriamente uma amostra de cem gramas de grãos em cada microparcela, para determinação de N, segundo metodologia descrita em Malavolta et al. (1997).

3.5.9 Teor de N total, de carbono orgânico e de N mineral (N-NH_4^+ e N-NO_3^-) no solo

Realizados em amostras de solo coletadas em quatro pontos da parcela, nas camadas de 0 a 0,10; 0,10 a 0,20 e 0,20 a 0,40 m, com auxílio de enxada, no centro da entrelinha, na época do florescimento do milho. A amostragem no primeiro ano agrícola foi realizada dia 01/02/02 e no segundo no dia 23/01/03. As análises de N total e de carbono orgânico foram realizadas, respectivamente, conforme metodologias descritas em Bremner (1996) e Raij et al. (2001). Para a determinação do N mineral (N-NH_4^+ e N-NO_3^-), a extração foi realizada no mesmo dia da coleta à umidade atual do solo, utilizando-se KCl 2 Molar e as amostras acondicionadas em geladeira até sua determinação, que foi realizada conforme metodologia descrita em Mulvaney (1996).

3.5.10 Produtividade de matéria seca do milheto, da crotalária, da vegetação espontânea (pousio) e do milho

Foram coletadas, um dia antes do manejo mecânico, em 29/11/01 e 25/11/02, a parte aérea das plantas de milheto e crotalária contidas em um metro de linha, em quatro pontos da área útil da parcela. Para a vegetação espontânea (pousio), foram coletados com auxílio de uma armação metálica seis pontos de $0,25 \text{ m}^2$ na área útil da parcela. Para o milho, foram coletadas na época da maturação fisiológica, três plantas na área útil da parcela e determinada a produtividade matéria seca em estufa com circulação forçada de ar 65°C , sendo o material pesado em balança de precisão e os dados transformados para kg ha^{-1} de matéria seca.

3.5.11 Relação carbono nitrogênio (C/N) da crotalária, do milheto e da vegetação espontânea (pousio)

Foi determinada em amostras da parte aérea, coletadas na época do manejo mecânico das mesmas, utilizando-se a metodologia de combustão via seca da amostra a 1400°C , por meio do aparelho LECO C/N.

3.5.12 Teor de fibra, lignina e fenóis totais da crotalária, do milho e da vegetação espontânea (pousio)

Foi determinada em amostras da parte aérea das plantas coletadas na época do manejo mecânica das mesmas, segundo a metodologia fibra detergente ácido (FDA), conforme descrita em Makkar (2001).

3.5.13 Efeitos dos tratamentos e aproveitamento do N pela planta de milho, grãos e palha (restante da aérea) proveniente do fertilizante e dos adubos verdes (milheto e crotalária)

Para a avaliação dos teores de ^{15}N nos grãos e na palha (restante da parte aérea da planta), denominada para folha, bainha, colmo, pendão, sabugo, cabelo e palha da espiga, foram coletadas três plantas na linha central das microparcelas após a maturação fisiológica dos grãos, sendo as espigas debulhadas manualmente e a palha fragmentada com facão, misturada e retirada uma amostra para análise do ^{15}N . O restante da planta, exceto os grãos, foi redistribuído no campo, na respectiva microparcela de origem, para a avaliação do aproveitamento do N contido nos mesmos, somado ao do N remanescente das plantas de cobertura do solo ou do N remanescente do fertilizante pelo milho cultivado no ano agrícola subsequente. As amostras foram secas a 65°C por 72 horas, depois moídas em peneira de 10 mesh, pesadas em balança de precisão (cinco casas decimais) e determinados do teor N total e da abundância de ^{15}N (% em átomos) em espectrômetro de massa interfaceado com um analisador elementar para N, conforme metodologia descrita em Barrie & Prosser (1996).

Os tratamentos foram avaliados pela produtividade de grãos em kg ha^{-1} , produtividade de palha em kg ha^{-1} , quantidade de N total acumulado pelo milho (grãos e palha) em g kg^{-1} e o enriquecimento obtido (grãos e palha), considerando-se a abundância isotópica do material aplicado (crotalária, milheto marcado com ^{15}N ou ^{15}N -uréia), descontado-se da variação natural do isótopo estável ^{15}N , que é de 0,366%. Foram determinadas a porcentagem e quantidades de N no milho proveniente das plantas de cobertura do solo (milheto e crotalária), porcentagem e quantidades do N no milho proveniente do fertilizante (N-uréia), aproveitamento do N das plantas de cobertura pelo milho, aproveitamento do N do fertilizante pelo milho e a porcentagem e a quantidade de N na planta proveniente do solo e outras fontes (sistema radicular das plantas de cobertura, fixação biológica, precipitação pluviométrica e outros).

O aproveitamento do N do fertilizante e dos adubos verdes pela cultura do milho e a quantidade de N na planta proveniente do solo foram calculados utilizando-se a sequência de

procedimentos:

a) Nitrogênio acumulado (NA, kg ha⁻¹)

$$NA = \frac{N \times MS}{1000} \quad \text{Equação 1}$$

N = Concentração de nitrogênio (g kg⁻¹).

MS = Matéria seca (kg ha⁻¹).

b) Percentagem de nitrogênio na planta proveniente do fertilizante (%Nppf)

Obtidas as percentagens de átomos ¹⁵N em excesso na planta e no fertilizante, utilizou-se a equação 2, obtida pelo princípio da diluição isotópica, para o cálculo da %Nppf.

$$\%Nppf = \frac{\% \text{ Átomos de } ^{15}\text{N em excesso na planta}}{\% \text{ Átomos de } ^{15}\text{N em excesso no fertilizante}} \times 100 \quad \text{Equação 2}$$

% átomos de ¹⁵N em excesso na planta = % Átomos de ¹⁵N na planta subtraindo-se a abundância natural ¹⁵N (0,366%).

% átomos de ¹⁵N em excesso no fertilizante = % Átomos de ¹⁵N no fertilizante subtraindo-se a abundância natural ¹⁵N (0,366%).

c) Quantidade de nitrogênio na planta proveniente do fertilizante (QNppf, kg ha⁻¹)

$$QNppf = \frac{\%Nppf \times NA}{100} \quad \text{Equação 3}$$

NA = nitrogênio acumulado (kg ha⁻¹).

%Nppf = percentagem de N na planta proveniente do fertilizante.

d) Aproveitamento do nitrogênio (AP%) do fertilizante e do N dos adubos verdes (milheto e crotalária)

O aproveitamento do N refere-se à eficiência de utilização do N aplicado como fertilizante ou adubo verde

$$AP = \frac{QNppf}{QNA} \times 100 \quad \text{Equação 4}$$

QNppf = quantidade de nitrogênio na planta proveniente do fertilizante (kg ha⁻¹).

QNA = quantidade de nitrogênio aplicado como fertilizante marcado (kg ha^{-1}).

Para o cálculo da quantidade de nitrogênio na planta de milho (grãos e palha) proveniente dos adubos verdes, milheto e crotalária (QNppav, kg ha^{-1}) e do aproveitamento do N (AP%) pelo milho, utilizou-se o mesmo procedimento de cálculos citados anteriormente, para o cálculo do N proveniente do fertilizante. Neste caso, tomando-se como base a produtividade de matéria seca das respectivas plantas de coberturas e a concentração de N na mesma, ou seja, a quantidade de N acumulado na matéria seca e o enriquecimento em % de átomos de ^{15}N em excesso.

e) Quantidade de N na planta de milho (palha + grãos) proveniente do solo e outras fontes (QNpps, kg ha^{-1})

$$QNpps = NA - QNppf - QNppav \quad \text{Equação 5}$$

NA = nitrogênio acumulado (kg ha^{-1}).

QNppf = quantidade de N (kg ha^{-1}) na planta de milho (palha + grãos) proveniente do fertilizante.

QNppav = quantidade de N (kg ha^{-1}) na planta de milho (palha + grãos) proveniente dos adubos verdes (milheto ou crotalária).

No caso do sistema de pousio, não foi considerado o N proveniente da vegetação espontânea, em virtude da mesma não ter sido marcada com ^{15}N , considerou-se apenas o N acumulado subtraído da QNppf.

3.6 Efeito residual das plantas de coberturas e do N do fertilizante

As áreas dos ensaios conduzidos nos anos agrícolas 2001/02 e 2002/03 foram deixadas em pousio na respectiva entressafra subsequente (2002 e 2003), com a finalidade de se avaliar efeito residual, no milho cultivado no respectivo ano agrícola subsequente (2002/03 e 2003/04), do N remanescente do milheto, da crotalária ou do fertilizante (^{15}N -uréia) utilizado do ano agrícola anterior, somado ao N dos resíduos da cultura do milho.

A vegetação presente na área, na época da semeadura do milho, foi manejada quimicamente com os herbicidas Glyphosate e 2,4 D, nas doses de 1080 e 670 g de i.a. ha^{-1} , respectivamente, nos dias 26/11/02 e 04/12/03. As semeaduras do milho foram realizadas nos dias 28/11/02 e 06/12/03, utilizando-se o mesmo híbrido (P30F80), densidade de sementes e

espaçamento utilizados nos anos agrícolas anteriores. A adubação de semeadura foi de 25, 85, 50 e 2 kg ha⁻¹, respectivamente, de N, P₂O₅, K₂O e Zn. A adubação de cobertura nitrogenada foi de 50 kg ha⁻¹ de N, na forma de uréia, aplicada mecanicamente à 0,20 m da linha da cultura quando apresentava quatro folhas totalmente expandidas. O controle de plantas daninhas em pós-emergência foi realizado com a aplicação do herbicida Nicossulfuron, na dose de 60 g i.a. ha⁻¹. Para o controle da *Spodoptera frugiperda* (lagarta do cartucho), utilizou-se o inseticida Deltamethrin na dose de 75 ml ha⁻¹.

As colheitas foram realizadas manualmente no final do mês de abril, sendo os procedimentos de preparo do material para análise de ¹⁵N, os mesmos descritos anteriormente.

3.7 Máxima produtividade física e máxima produtividade econômica

A máxima produtividade física (MPF) e a máxima produtividade econômica (MPE) foram obtidas através da derivada primeira da função $y = ax^2 + bx + c$, igualando-a a zero (MPF) ou à relação de custos unitários do milho pelo preço do N (MPE), segundo Raij (1991). No caso, considerou-se o preço médio de mercado do milho pelo preço médio do N-uréia dos últimos cinco anos (Agrianual, 2005), obtendo-se a relação média de 8/1. O preço da uréia dos últimos cinco anos foi em média de R\$ 981,70 por tonelada e o preço de mercado do milho de R\$ 16,74 por saca de 60 kg de grãos.

3.8 Análise estatística dos dados

Os dados foram submetidos à análise de variância aplicando-se o teste F ($p \leq 0,05$ e $p \leq 0,01$), comparação de médias pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$), análise de correlação das avaliações individuais de componentes de planta e produção versus a produtividade de grãos e comparação com o teste t ($p \leq 0,05$ e $p \leq 0,01$) e análise de regressão ($p \leq 0,05$ e $p \leq 0,01$). As análises estatísticas foram realizadas utilizando-se o programa “SAS System for Windows-release 6.11” (SAS, 1996).

4. RESULTADOS DISCUSSÃO

4.1 Plantas de cobertura do solo

A produtividade de matéria seca de parte aérea (Tabela 5) da crotalária foi superior à do milho, que foi superior à da vegetação espontânea (pousio), nos dois anos agrícolas. A crotalária, sendo uma leguminosa, portanto, fixadora de N, apresentou maior teor de N na matéria seca, proporcionando maior quantidade de N acumulado, resultado já esperado e também verificado em outros estudos (Ambrosano et al., 1997; Ramos et al., 2001). Além disso, a crotalária recicla muito N das camadas mais profundas do solo, como verificado por Burle et al. (1988). Verifica-se ainda na Tabela 5, que a crotalária e o milho, marcadas com ^{15}N no campo e substituído nas microparcelas no ano agrícola 2001/02, apresentavam respectivamente, um enriquecimento na matéria seca de 1,965% e 4,299% de átomos em excesso de ^{15}N . Para o ano agrícola 2002/03, o enriquecimento foi de 1,882% e 2,416% de átomos em excesso de ^{15}N , para crotalária e milho, respectivamente, valores esses, suficientes para estudos da dinâmica do N no sistema solo-planta, conforme Ambrosano et al. (1997). Tanto a crotalária quanto o milho receberam a mesma dose de N e com o mesmo enriquecimento em ^{15}N no primeiro ano agrícola (30 kg ha⁻¹ de N-uréia com 10% de átomos em excesso de ^{15}N). Já no segundo ano agrícola, utilizou-se a mesma dose de ^{15}N -uréia, porém, com um enriquecimento de 10% e 5% de átomos em excesso, para a crotalária e o milho, respectivamente. Isto, em virtude do alto enriquecimento obtido na matéria seca do milho no primeiro ano agrícola, o que é desnecessário para esse tipo de estudo. O menor enriquecimento em % de átomos na matéria seca da crotalária em relação à do milho, mesmo apesar de ter recebido uréia com mais alto enriquecimento, certamente foi devido à fixação biológica de N₂ atmosférico, a qual aumenta muito após os 40 dias da germinação da mesma, favorecendo a diluição do ^{15}N (Ambrosano et al., 2003). Por outro lado, deve-se considerar também a maior produtividade de matéria seca da crotalária em relação à do milho, em média, superior a de 2.200 kg ha⁻¹, o que certamente favoreceu a diluição do ^{15}N .

A maior quantidade de N acumulada na matéria seca da crotalária aliada à sua menor relação C/N, certamente proporcionou maior disponibilidade de N mineral no solo para a cultura do milho cultivada subsequente. No entanto, alguns estudos com adubos verdes marcados com ^{15}N indicam que a maior proporção do N contido na sua matéria seca tem como destino o solo (Ladd et al., 1981; Harris & Hesterman, 1990). Assim, o cultivo de adubos verdes pode favorecer além da cultura em sucessão, outras cultivadas em rotação, em razão do efeito residual (Scivittaro et al., 2000; Amado et al., 2002) e também, condicionar o incremento no teor MOS com o tempo. Outrossim, a elevação no mesmo está diretamente relacionada com a adição de N ao solo, seja pela fixação biológica ou pela adição de fertilizantes minerais ou orgânicos (Amado et al. 2002; Lopes et al., 2004; Sá 2004a).

Tabela 5 - Produtividade de matéria seca da parte aérea, teor de N total na matéria seca, enriquecimento em % de átomos de ^{15}N em excesso (milheto e crotalária) e quantidade de N acumulado pela crotalária, milheto e vegetação espontânea (pousio), na época do manejo mecânico dos mesmos, anos agrícolas 2001/02 e 2002/03.

Sistema de cobertura	Matéria seca	N total	Átomos de ^{15}N em excesso	N acumulado
	kg ha ⁻¹	g kg ⁻¹	%	kg ha ⁻¹
Ano agrícola 2001/02				
Crotalária	9770 a	17,30	1,965	169,00 a
Milheto	7370 b	9,30	4,299	68,50 b
Pousio	2490 c	11,28	-	28,10 c
Ano agrícola 2002/03				
Crotalária	8610 a	21,95	1,882	189,00 a
Milheto	6335 b	10,10	2,416	64,00 b
Pousio	2860 c	11,85	-	33,90 c

Obs. Médias seguidas por letras distintas na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Apesar da menor produtividade de matéria seca do milheto em relação à crotalária, os resíduos dessa gramínea promoveram uma cobertura mais persistente do solo, sobretudo em relação à vegetação espontânea (pousio). Tal fato está relacionado à maior relação C/N na matéria seca do mesmo (Tabela 6), que foi mais que o dobro que a da crotalária, e também

superior à da vegetação espontânea. Isto, especialmente na região de cerrado, constitui-se num importante fator no cultivo sob SD, em virtude das altas temperaturas associadas à alta umidade no verão, promoverem a rápida decomposição dos resíduos de baixa relação C/N (Amabile et al., 2000; Guimarães et al., 2003; Carvalho et al., 2004). Esse sistema tem como requisitos básicos, o não revolvimento do solo, exceto na linha de semeadura, e o cultivo sobre o solo coberto com palha (Six et al., 2002; Lara Cabezas et al., 2004).

A menor produção de matéria seca da vegetação espontânea em SD, quando comparada à dos adubos verdes, também foram verificadas por Favero et al. (2000) e Carvalho et al. (2004). Nesse contexto, Perin et al. (2004) também verificaram que a crotalária júncea produziu 31% a mais que o milho e 108% a mais que a área de pousio. Entretanto, ressalta-se que a produtividade de matéria seca por plantas de cobertura do solo depende, além das condições intrínsecas de solo e clima local, também da época de cultivo das mesmas, em virtude do fotoperíodo.

Tabela 6 - Valores referentes à relação C/N, teores de fibra, de lignina e de fenóis totais na matéria seca da parte aérea da crotalária, do milho e da vegetação espontânea (pousio), na época do manejo mecânico dos mesmos, anos agrícolas 2001/02 e 2002/03.

Sistema de cobertura	Relação C/N	Fibra	Lignina	Fenóis totais*
-----g kg ⁻¹ -----				
Ano agrícola 2001/02				
Crotalária	21 c	485,50 a	80,25 a	1,31 b
Milho	44 a	424,25 b	55,50 b	1,50 b
Pousio	38 b	416,25 b	72,75 a	2,88 a
Ano agrícola 2002/03				
Crotalária	20 c	457,00 a	75,44 a	1,34 c
Milho	46 a	418,50 b	52,03 b	1,69 b
Pousio	35 b	407,18 b	68,17 a	2,63 a

Obs. Médias com letras distintas na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

* Valores expressos como equivalente em ácido tânico.

Além da relação C/N, outras características dos resíduos vegetais como o teor de lignina, de polifenóis e a relação lignina/N e polifenóis/N, condicionam sua velocidade de

decomposição/mineralização. Isto, em virtude da lignina ser degradada por um grupo específico de microrganismos, os fungos, os quais têm a capacidade de liberarem exoenzimas específicas que quebram as diversas ligações químicas em seus compostos unitários para a degradação da lignina e dos polifenóis (Palm & Sanchez, 1991; Myers et al., 1994). Já, a celulose é degradada por um grupo maior de microrganismos do solo (bactérias, fungos, actinomicetos, protozoários) (Victória et al., 1992). No caso dos polifenóis, esses são substâncias de cadeias cíclicas e polimerizadas que “protegem” os resíduos vegetais ao ataque dos microrganismos quimiorganotróficos. No presente caso, ao contrário da relação C/N, os teores de lignina foram superiores na crotalária e os de fenóis totais na vegetação espontânea. Isto indica que provavelmente a decomposição/mineralização da crotalária foi mais acentuada no início, devido à alta concentração de substâncias simples como hemicelulose e açúcares simples, porém, pode ter se tornada mais lenta com o tempo comparado à do milho. Assim sendo, mesmo tendo relação C/N baixa, essa leguminosa pode vir a contribuir com o aumento do teor de MOS. Em adição, pode fornecer mais N para a cultura em sucessão que produzirá mais matéria seca, deixando maior quantidade de resíduos no solo.

Além do N, as plantas de cobertura do solo reciclaram consideráveis quantidades de outros nutrientes (Tabela 7). A crotalária retornou a maior quantidade da maioria dos nutrientes, o que se deve em parte, à sua maior produtividade de matéria seca, pois os teores totais de P, K, S, Mn e Zn, não apresentaram grandes diferenças em relação aos do milho. De maneira geral, o teor de Ca, Mg e Cu foi superior na matéria seca da crotalária, porém o teor de Fe foi maior na matéria seca do milho e a concentração da maioria dos micronutrientes foi superior na matéria seca da vegetação espontânea. No entanto, a maioria dos valores ficou dentro das faixas consideradas normais para essas plantas de cobertura do solo (Perin et al., 2004). Isto demonstra que as plantas de cobertura do solo além do N, têm um grande potencial como condicionadora de outros nutrientes para as culturas subsequentes, com destaque para o K, o qual geralmente, é rapidamente liberado dos resíduos, por não fazer parte de nenhum composto celular. Além disso, tem um custo relativamente alto e, assim como o N, é também passível de perdas por lixiviação (Yamada 1997; Sá et al., 2004b). Deve-se considerar, ainda, que as quantidades totais de N e demais macro e micronutrientes retornados ao solo pelos resíduos da crotalária, do milho e da vegetação espontânea (pousio) estão subestimados, em virtude de não estar sendo levado em consideração os nutrientes contidos no sistema radicular dessas plantas.

Tabela 7 - Quantidades de P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn e Zn acumulados na matéria seca da parte aérea da crotalária, do milheto e da vegetação espontânea (pousio), na época do manejo mecânico dos mesmos, anos agrícolas 2001/02 e 2002/03.

Sistema de cobertura	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Mn	Zn
	-----kg ha ⁻¹ -----								
	Ano agrícola 2001/02								
Crotalária	32,20	240,34	96,72	52,76	18,56	0,12	1,30	0,71	0,26
Milheto	23,58	193,83	31,70	21,37	11,10	0,05	4,82	0,69	0,23
Pousio	6,40	45,80	17,10	10,90	2,50	0,02	2,70	0,48	0,10
	Ano agrícola 2002/03								
Crotalária	23,24	223,08	82,31	40,81	13,43	0,09	1,70	0,52	0,21
Milheto	14,00	170,91	23,95	18,00	5,13	0,04	2,01	0,36	0,16
Pousio	7,10	51,50	27,92	12,90	2,60	0,03	4,40	0,70	0,10

A vegetação espontânea além de ter acumulado menor quantidade de nutrientes na sua matéria seca da parte aérea, proporcionou uma cobertura do solo bastante irregular, em virtude de ter se desenvolvido predominantemente em reboleira. Geralmente, a maioria das áreas cultivadas em SD no Brasil, sobretudo na região de cerrado, é deixada em pousio na entressafra, em razão, principalmente, dos custos de implantação das plantas de cobertura do solo, desconhecimento dos seus benefícios e condições climáticas desfavoráveis ao cultivo. Atualmente, pesquisas têm demonstrado vantagens no cultivo de adubos verdes em épocas marginais (início e final das chuvas), pois, apesar da pequena produtividade de matéria seca, não compete com a cultura comercial (Pereira et al., 1992; Amabile et al., 2000; Guimarães et al., 2003; Calegari et al., 2004; Carvalho et al., 2004).

4.2 Carbono orgânico e formas de N no solo

O teor no solo de carbono orgânico (Figura 2a) e de N total (Figura 2b), na época do florescimento do milho, anos agrícolas de 2001/02 e de 2002/03, não apresentaram diferenças significativas entre as mesmas camadas avaliadas. Entretanto, diminuíram com a profundidade, fato esse já esperado, pois, o teor de N total do solo acompanha o teor de carbono orgânico, o qual geralmente diminui com a profundidade, principalmente no solo sob

SD, por causa do seu não revolvimento e da manutenção dos resíduos vegetais sobre sua superfície promoverem a formação de um gradiente entre as camadas superiores e as mais profundas (Sá, 1993; Gonçalves et al., 2000; Sá et al., 2001).

O sistema de cultivo é um dos principais fatores que condiciona a velocidade de decomposição/mineralização da MOS e dos resíduos vegetais deixados pelas culturas, plantas de coberturas e/ou pela vegetação espontânea. Todavia, o acréscimo do teor de carbono orgânico e de N total no solo, somente ocorre ao longo dos anos (Sá et al., 2001; Calegari, 2004). Nesse sentido, Bayer & Mielniczuk (1997) observaram que a adoção de sistema de cultivos que promoveram o menor revolvimento do solo resultou, após cinco anos, em incremento do conteúdo de N total, porém, restrito às camadas superficiais 0,0 a 0,025 e 0,025 a 0,075 m. Fernandes et al. (1998) também observaram aumento no teor de MOS em SD, apenas na camada 0,0 a 0,075 m, atribuindo tal fato à maior atividade biológica nessa camada. Entretanto, Teixeira et al. (1994) observaram efeito significativo no N total do solo, após três anos de adoção, apenas na camada 0,0 a 0,025 m, enquanto, após cinco anos, até 0,175 m. Dessa forma, o fato de não ter havido diferença significativa entre as mesmas camadas no presente estudo, provavelmente foi em razão do relativo pouco tempo entre as amostragens (um ano).

Figura 2. Teores de carbono orgânico (a) e de N total (b) no solo, nas camadas de 0-0,1; 0,1-0,2 e 0,2-0,4 m, na época do florescimento do milho cultivado em sucessão à crotalária, milheto e ao solo em pousio, anos agrícolas 2001/02 e 2002/03. (Obs. médias seguidas por letras distintas na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%).

A razão do acréscimo no teor de MOS no cultivo sob SD com o decorrer do tempo de implantação, provém do fato de que, além de normalmente haver maior adição de resíduos vegetais e menor contato destes com o solo, em virtude do seu não revolvimento, ocorrer uma maior preservação da sua estrutura, o que confere à MOS maior proteção ao ataque de microrganismos e de seus complexos enzimáticos (Bayer et al., 2003). De maneira geral, as médias para os teores de N total no solo, considerando o teor de MOS em estudo, o qual tem como vegetação primária cerrado e apresentava menos de 20 g dm^{-3} , na camada 0 a 0,20 m, ficaram dentro dos padrões considerados normais (Sousa & Lobato, 2004).

As doses de N (Tabela 8) influenciaram significativamente no teor de N-NH_4^+ no solo, avaliado na época do florescimento do milho, somente no ano agrícola 2001/02. Já, para o teor de N-NO_3^- no solo, houve efeito significativo de doses de N nos dois anos agrícolas, e também, interação significativa das mesmas com os sistemas de cobertura do solo. Para os sistemas de cobertura do solo, houve efeito significativo para o teor N-NH_4^+ no ano agrícola 2001/02 e para o N-NO_3^- no ano agrícola 2002/03. Quanto às profundidades do solo avaliadas, houve efeito significativo para as duas formas de N mineral nos dois anos agrícolas.

Tabela 8 - Valores de F da análise de variância e coeficientes de variação para o teor de N-NH_4^+ e N-NO_3^- no solo, na época do florescimento do milho, em função de doses de N aplicadas no estágio quatro ou oito folhas, sistemas de cobertura do solo e profundidades, anos agrícolas 2001/02 e 2002/03.

	N - NH_4^+		N - NO_3^-	
	2001/02	2002/03	2001/02	2002/03
Dose (D)	2,78*	1,26ns	2,77*	2,68*
Sistema de cobertura (C)	13,51**	1,61ns	2,61ns	10,24**
Profundidade (P)	10,64**	17,82**	4,92*	4,23*
DxC	2,09ns	0,81ns	2,44*	3,33**
DxP	0,42ns	0,30ns	0,34ns	0,36ns
CxP	0,84ns	0,24ns	0,64ns	0,91ns
DxCxP	0,58ns	0,47ns	0,34ns	0,28ns
Coef. de variação (%)	24,4	25,8	19,8	16,5

Obs. ns, * e **: não significativo e significativo a 5 e 1% pelo teste F, respectivamente.

Os coeficientes de variação foram médios para o teor de N-NO_3^- e altos para o N-NH_4^+ (Pimentel-Gomes & Garcia, 2002). Silva et al. (2003) também encontraram altos coeficientes de variação para o teor de N-NH_4^+ e de N-NO_3^- em solo cultivado com milho em SD, verificando teor de N-NH_4^+ , na época do florescimento do milho, superior ao de N-NO_3^- em um ano agrícola e semelhante em outro. No entanto, ressalta-se que para essas variáveis deve-se considerar a sua grande dinâmica no solo, ou seja, a facilidade de movimentação no perfil do solo, principalmente para o N-NO_3^- , e também os processos de mineralização/imobilização do N. Esses processos são dependentes das características dos resíduos vegetais, como relação C/N, lignina/N e polifenóis/N, teor de N, de lignina e de polifenóis (Palm & Sanchez, 1991; Myers et al., 1994) e das condições edafoclimáticas como características químicas, físicas e mineralógicas do solo e a temperatura, umidade e aeração (Sá, 1993; Amado et al., 2002).

O teor de N-NH_4^+ no ano agrícola 2001/02 (Tabela 9), na época do florescimento do milho, foi menor no solo que permaneceu em pousio na entressafra, em relação ao cultivado com crotalaria ou milheto. Porém, não diferiu significativamente no ano agrícola 2002/03. Em ambos os anos agrícolas, o teor de N-NH_4^+ , na época do florescimento do milho, foi superior na camada de 0 a 0,1 m e semelhante estatisticamente nas camadas de 0,1 a 0,2 e 0,2 a 0,4 m. Já, o teor de N-NO_3^- foi superior e não diferiu significativamente entre as camadas de 0 a 0,1 e 0,1 a 0,2 m, decrescendo significativamente para a camada mais profunda 0,2 a 0,4 m. Embora, as camadas 0,1 a 0,2 e 0,2 a 0,4 m também não diferiram entre si. A mais homogênea distribuição dessa forma de N no solo, nessas camadas avaliadas, deve-se à sua carga negativa não ser retida pelos colóides do solo onde predomina cargas semelhantes. Pesquisas indicam a possibilidade de correlação do teor no solo de N-NO_3^- , avaliado até 0,6 ou 1,0 m de profundidade, antecedendo a semeadura do milho, com o N potencialmente mineralizável (Keeney, 1982), ou do N mineral até 0,3 m para avaliar a probabilidade de resposta à aplicação de N em cobertura ou de contaminação do lençol freático por nitrato (Fox et al., 1989; Sims et al., 1995; Echeverria et al., 2004). Entretanto, para as condições de solo e clima brasileiro, principalmente na região de cerrado, onde os solos apresentam baixa CTC, devido aos seus baixos teores de MOS, além de, freqüentemente, uma inconstância na precipitação pluviométrica (veranicos), limitam, na maioria das vezes, a adoção de métodos baseados no N mineral para o cálculo do N potencialmente mineralizável e recomendação da dose de N a ser aplicada para o milho.

Tabela 9 - Teores de N-NH_4^+ e N-NO_3^- no solo, na época do florescimento do milho, em função das doses de N, sistemas de cobertura e camadas do solo, anos agrícolas 2001/02 e 2002/03.

	N - NH_4^+		N - NO_3^-	
	2001/02	2002/03	2001/02	2002/03
----- mg kg ⁻¹ -----				
Sistema de cobertura				
Crotalária	7,14 a	6,56 a	7,73 ⁽¹⁾	7,11 ⁽¹⁾
Milheto	7,96 a	5,87 a	7,28	5,88
Pousio	5,60 b	6,10 a	6,87	6,82
Camada do solo				
0,0 a 0,1 m	8,07 a	7,43 a	7,81 a	6,95 a
0,1 a 0,2 m	6,62 b	5,98 b	7,50 ab	6,72 ab
0,2 a 0,4 m	6,00 b	5,11 b	6,66 b	6,15 b

Obs. Médias seguidas por letras distintas na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

⁽¹⁾ Médias sem letras na coluna referem-se à interação significativa de doses de N versus sistemas de cobertura do solo (Figura 3a e 3b).

De maneira geral, em ambos os anos agrícolas, os teores de N-NH_4^+ no solo, independentes dos tratamentos, não apresentaram grandes discrepâncias em relação ao de N-NO_3^- . Isto difere do que normalmente é observado no PC, onde normalmente prevalece a forma nítrica (Camargo & Sá, 2004). Tal fato, provavelmente deve ter ocorrido em razão do pH do solo encontrar-se abaixo de 6,0, favorecendo a retenção do N na forma amoniacal e retardando o processo de nitrificação, e também, pela maior oferta de carbono orgânico no sistema, desfavorável à atividade dos microrganismos nitrificantes (Vitti et al., 1999; Lopes et al., 2004). Em algumas situações, pode ser benéfico o maior teor de N na forma amoniacal no solo, devido prolongar o tempo de disponibilidade para a absorção pelas plantas, principalmente na SD, onde normalmente há uma maior infiltração de água, favorecida pela continuidade de poros (bioporos) deixados por raízes decompostas ou pela ação da macrofauna e mesofauna do solo (coleópteros, minhocas e outros), e pela rugosidade da superfície devido à presença de palha, favorecendo, assim, a maior lixiviação do N-NO_3^- (Muzilli, 1983; Bayer & Mielniczuk, 1997; Salet et al., 1997).

Vários estudos demonstram relativa pequena lixiviação do N aplicado como fertilizante comparado ao N proveniente da mineralização da MOS (Baker & Tmmons, 1994;

Addiscott, 2000; Coelho et al., 2002; Gava et al., 2003). Coelho et al. (1991) observaram que a perda de N do fertilizante por lixiviação em um Latossolo Vermelho sob PC foi de apenas 4% do total de N aplicado. Com o revolvimento do solo e incorporação dos resíduos vegetais no PC, a mineralização da MOS é muito superior àquela verificada na SD, sugerindo, neste último, um ambiente menos oxidativo, o que favorece a lixiviação do N quando a precipitação pluviométrica excede a evapotranspiração (Sá, 1996; Lara Cabezas et al., 2000; Amado et al., 2002).

Os teores de N-NO_3^- no solo (Figura 3a e 3b) apresentaram uma grande variabilidade em função das doses de N e dos sistemas de cobertura do solo, sendo que, em ambos os anos agrícolas, os dados não se ajustaram significativamente a nenhum modelo testado, apresentando um coeficiente de determinação relativamente baixo devido à sua grande variabilidade. Entretanto, na maioria das doses estudadas houve uma tendência a maiores teores de nitrato no solo cultivado com milho em sucessão à crotalária. O teor de N-NH_4^+ no solo (Figura 3c) aumentou linearmente, na época do florescimento do milho, em relação ao incremento na dose de N aplicada no primeiro ano agrícola (2001/02). No segundo ano agrícola, embora tenha ocorrido uma tendência de aumento com o incremento da dose de N, os dados não se ajustaram a nenhum modelo testado.

No caso dos Latossolos, como o utilizado no presente estudo, que são solos profundos, com horizontes espesso, baixo teor de matéria orgânica em profundidade e altamente intemperizados, os óxidos de ferro e alumínio podem predominar nas camadas mais profundas e constituírem na principal superfície de troca de iônica. Neste caso, dependendo do pH, a capacidade de troca de anions (CTA) pode superar a CTC, com conseqüente capacidade de adsorção de nitrato. Assim sendo, o nitrato pode situar-se fora da zona de exploração das raízes, mas, não necessariamente, estar contaminando o lençol freático, sugerindo a utilização de adubos verdes e/ou culturas comerciais com sistema radicular “agressivo” para a sua reciclagem e praticas de manejo que favoreçam o desenvolvimento do sistema radicular das culturas.

Figura 3. Desdobramento da interação significativa entre doses de N versus sistema de cobertura do solo para os teores de $N-NO_3^-$ no solo, e teores médios de $N-NH_4^+$ no solo, na época do florescimento do milho, em função de doses de N aplicadas no estágio quatro ou oito folhas, anos agrícolas 2001/02 (a e c) e 2002/03 (b e c). (Obs. *: significativo a 5% pelo teste F).

As épocas de aplicação do N não influenciaram significativamente nos teores de carbono orgânico, N total, $N-NH_4^+$ e $N-NO_3^-$ no solo. A grande dinâmica das formas mineral de N no solo, principalmente do $N-NO_3^-$, a variabilidade espacial e temporal e a sua inconstância, devido aos processos de mineralização/imobilização e nitrificação,

freqüentemente, conduz a resultados contrastantes. Isto, aliado à complicação de metodologias analíticas, dificulta a introdução da análise de N mineral em análises de rotina de laboratório de solo, assim como, o uso dos resultados para uma recomendação precisa de doses de N a serem aplicadas para a cultura do milho.

4.3 Componentes da planta e produtividade do milho

O estande final ficou por volta de 62.000 plantas por hectare e não foi observada discrepância entre os tratamentos, o que indica que não houve interferência dos tratamentos sobre a emergência e o desenvolvimento das plantas, provavelmente devido à dose de N aplicada na semeadura ter sido de 30 kg ha⁻¹ e o N mineralizado dos resíduos vegetais ter seguido um padrão gradual de decomposição (Aita et al., 2001). A maior interferência do N sobre a planta de milho ocorre geralmente quando se aplica uma dose elevada de fertilizante mineral na semeadura, em virtude da sua salinidade reduzir o potencial hídrico do solo nas proximidades onde é depositado, afetando a capacidade de absorção de raízes jovens (Yamada, 1996). Esse fato acontece, em particular, na fase inicial da cultura, quando a área foliar para síntese de carboidratos (fotossíntese) é pequena, comprometendo a quantidade de açúcares translocado às raízes. Contudo, a perda de água da semente varia entre as diferentes culturas e é maior quanto menor sua concentração em carboidratos. No caso do milho, este apresenta elevado teor de carboidrato (~720 g kg⁻¹) em relação a outras sementes como, por exemplo, a soja (~300 g kg⁻¹).

As épocas de aplicação do N não influenciaram significativamente na altura da planta e da inserção da espiga, em ambos os anos agrícolas. Quanto às doses de N estudados, os dados ajustaram-se a um modelo quadrático (Figura 4). Nesse sentido, Sá (1996), estudando a combinação das doses 0, 30 e 60 kg ha⁻¹ de N na semeadura e 0, 60 e 120 em cobertura aos 35 e 55 dias após a semeadura, também verificou redução de crescimento das plantas e sintomas de amarelecimento das folhas no nível de 0 kg ha⁻¹ de N. Entretanto, o autor observou que com a aplicação de 30 kg ha⁻¹ de N na semeadura houve melhor “arranque” e eliminação da carência inicial de N, devido à imobilização causada pela decomposição dos resíduos de aveia preta.

Para os sistemas de cobertura do solo, no ano agrícola 2001/02, a maior altura de planta foi para o milho cultivado em sucessão à crotalária (2,31 m), diferindo estatisticamente ($p \leq 0,05$) da sucessão pousio-milho (2,17 m) e milheto-milho (2,14 m), as quais não diferiram entre si. No ano agrícola 2002/03, a maior altura de planta foi também para o milho cultivado

em sucessão à crotalária (2,37 m), diferindo estatisticamente ($p \leq 0,05$) da sucessão pousio-milho (2,31 m) que diferiu da sucessão milheto-milho (2,22 m).

Figura 4. Altura de planta (a) e altura de inserção da espiga (b) de milho, em função de doses N aplicadas no estágio quatro ou oito folhas e sistemas de cobertura do solo, anos agrícolas 2001/02 e 2002/03 (Obs. **: significativo a 1% pelo teste F).

A mesma tendência com relação à altura de planta ocorreu para a altura de inserção da espiga, 1,26; 1,17 e 1,13 m, no primeiro ano agrícola, e 1,27; 1,24 e 1,13 m no segundo, respectivamente, para o milho cultivado em sucessão à crotalária, pousio e milheto. Isto indica que essa variável está intimamente associada à altura de plantas. Resultados demonstrando interdependência entre a altura da planta e de inserção da espiga também foram obtidos por Santos & Pereira (1994), trabalhando com milho em SD. Normalmente, a deficiência de N induz ao menor crescimento e desenvolvimento da planta, proporcionando menor índice de área foliar e duração de folhas metabolicamente ativas. Este fato repercute diretamente sobre a quantidade de radiação interceptada, produção de matéria seca e conseqüentemente na produtividade de grãos, sendo que o efeito sobre estas variáveis depende do grau e do estágio fenológico da planta em que ocorrer (Büll, 1993; Uhart & Andrade, 1995). No entanto, estas características são de alta herdabilidade genética e menos dependente do meio, a menos que a planta passe por uma deficiência nutricional muito acentuada, o que provavelmente ocorreu na dose 0 kg ha⁻¹ de N no milho cultivado em

sucessão ao milho e ao solo em pousio. Nesses tratamentos observou-se nitidamente amarelecimento das folhas velhas nos dois anos agrícolas, o que certamente condicionou a uma menor altura de planta e de inserção da espiga. A maior altura de planta e de inserção da espiga no milho cultivado em sucessão à crotalária, certamente deveu-se à menor imobilização microbiana do N mineral do solo e do N fertilizante, em razão da sua menor relação C/N, e também por ter fornecido maiores quantidades de N à cultura do milho, comparada às demais sucessões.

Verifica-se na Tabela 10 que, em ambos os anos agrícolas, houve efeito significativo das doses de N e dos sistemas de cobertura do solo para o teor de N na folha, número de grãos por espiga, massa de mil grãos e produtividade de grãos. Quanto às épocas de aplicação do N, houve efeito significativo apenas para a produtividade de grãos e somente no ano agrícola 2001/02. Houve também, no primeiro ano agrícola, interação significativa de doses de N versus sistemas de cobertura do solo para o teor de N nas folhas e para a produtividade de grãos.

Tabela 10 - Valores de F da análise de variância e coeficientes de variação referentes avaliações do teor de N na folha, número de grãos por espiga, massa de mil grãos e produtividade de grãos, em função de doses de N aplicadas no estádio quatro ou oito folhas e sistemas de cobertura, anos agrícolas 2001/02 e 2002/03.

	Teor de N na folha		Grãos por espiga		Massa de mil grãos		Prod. de grãos	
	2001/02	2002/03	2001/02	2002/03	2001/02	2002/03	2001/02	2002/03
Dose (D)	437,18**	155,86**	6,01**	26,70**	11,85**	51,15**	141,35**	180,62**
Época (E)	0,03 ns	3,58 ns	0,03 ns	3,12 ns	0,31 ns	1,01 ns	4,23*	30,08 ns
Cobertura (C)	61,84**	101,04**	6,60**	10,22**	33,03**	25,35**	166,60**	106,15**
DxE	2,45 ns	2,55 ns	0,56 ns	0,23 ns	0,78 ns	1,75 ns	1,17 ns	0,33 ns
DxC	16,26**	4,11**	1,54 ns	0,99 ns	1,67 ns	1,98 ns	4,57**	0,35 ns
ExC	1,40 ns	3,98*	0,11 ns	1,14 ns	1,28 ns	0,96 ns	2,50 ns	3,66*
DxExC	2,98 ns	0,60 ns	0,17 ns	0,37 ns	0,73 ns	0,74 ns	1,37 ns	0,37 ns
CV (%)	4,5	3,13	8,12	7,50	4,87	4,96	7,50	8,24

Obs. ns, * e **: Não significativo e significativo a 5 e 1% pelo teste F, respectivamente.

No ano agrícola 2002/03 (Tabela 10), para o teor de N na folha, assim como no primeiro ano, houve interação significativa de doses de N com os sistemas de cobertura do solo e também, de épocas aplicação do N versus sistemas de cobertura do solo, sendo esta última também observada para a produtividade grãos. O fato da interação entre diferentes variáveis em anos distintos, apesar de ter sido utilizado os mesmos tratamentos, é devido a dinâmica do N no solo e a cinética de decomposição dos resíduos vegetais ser dependente das condições climáticas vigente no ano agrícola (Lara Cabezas et al., 2000; Amado et al., 2002). Contudo, verifica-se que os coeficientes de variação foram relativamente baixos, demonstrando a relativa pequena variação dentro do mesmo tratamento.

O teor de N na folha, nos dois anos agrícolas (Figura 5a e 5b), aumentou de forma quadrática com o incremento das doses de N aplicadas nos três sistemas de cobertura do solo. Entretanto, para a maioria das doses e sistemas de cobertura, os teores foram inferiores ao descrito como adequado, 27,5 a 32,5 g de N kg⁻¹ de matéria seca (Malavolta et al., 1997), e 27 a 35 g de N kg⁻¹ (Raij, et al., 1996). Muzilli (1983), estudando efeito de preparos do solo e rotação de culturas, também, constatou menores teores de N foliar em SD, atribuindo tal fato às perdas de N por lixiviação. No presente caso, provavelmente esteve relacionado ao híbrido utilizado, visto que, em alguns tratamentos, mesmo nas doses mais elevadas de N (180 kg ha⁻¹ de N) e/ou no cultivo sobre resíduos de crotalária e com relativa alta respostas em produtividade, os valores não alcançaram o descrito como adequado na literatura.

Figura 5. Desdobramento da interação significativa entre doses de N aplicadas no estágio quatro ou oito folhas versus sistemas de cobertura do solo, para o teor de N na folha, ano agrícola 2001/02 (a) e 2002/03 (b). (Obs. * significativo a 5% pelo teste F).

O número de grãos por espiga (Figura 6a) e a massa de mil grãos (Figura 6b), aumentaram de forma quadrática com o incremento da dose de N aplicada no ano agrícola 2002/03. Para os sistemas de cobertura do solo (Tabela 11), os maiores valores de número de grãos por espiga foram observados no milho cultivado em sucessão à crotalária e menor no cultivado em sucessão ao milheto. Embora esse não tenha diferido significativamente do cultivo em sucessão ao solo em pousio, o qual também, não diferiu do cultivo em sucessão à crotalária. Já, a massa de mil grãos foi superior no milho em sucessão à crotalária em relação aos demais sistemas de cobertura do solo, que apresentaram comportamento semelhante entre si. O número de grãos por espiga e a massa de grãos têm relação direta com a produtividade de grãos e tem alta dependência da absorção de N pelo milho (Ulger et al., 1995). Por isso, certamente condicionaram à uma maior produtividade de milho cultivado em sucessão à crotalária. Nesse sentido, Boquet (1988) também verificou que o rendimento de grãos, massa de grãos individual, massa específica, número de grãos, massa por espiga e conteúdo de proteína no grão de milho, aumentaram com o aumento do nível de N aplicado (0 a 250 kg ha⁻¹), e que a dose ótima foi estimada em 100 kg ha⁻¹.

Figura 6. Número de grãos por espiga (a) e massa de mil grãos (b) de milho, em função de doses de N aplicadas no estágio quatro ou oito folhas e sistemas de cobertura do solo, anos agrícolas 2001/02 e 2002/03. (Obs.*: significativo a 5% pelo teste F).

A aplicação do N no estágio quatro folhas (Tabela 11) proporcionou maior produtividade de grãos no ano agrícola 2001/02, provavelmente pela compensação do N mineral da solução do solo imobilizado na fase inicial de desenvolvimento do milho, em relação aos tratamentos que receberam o N no estágio oito folhas. No sistema de SD, pesquisas têm demonstrado que a maior presença de resíduos orgânicos na superfície do solo favorece uma maior atividade e imobilização do N pelos microorganismos quimiorganotróficos (Sá, 1996; Aita et al., 2001; Cantarella et al., 2003), o que pode comprometer a disponibilidade de N para o milho (Amado et al., 2002). Além disso, os componentes de produção, como número de fileiras de grãos por espiga e tamanho da espiga, ou seja, a produção potencial da cultura do milho é definida nos estádios de quatro a seis folhas, necessitando nessa época de um suprimento adequado de N, conforme relatado por vários autores Mengel & Barber (1974); Yamada (1996); Varvel et al. (1997) e Fancelli & Dourado Neto (2000). Nesta fase, a deficiência de N reduz o número de óvulos nos primórdios da espiga (Schreiber et al., 1988).

Tabela 11 – Médias do teor de N na folha, número de grãos por espiga, massa de mil grãos e produtividade de grãos, em função das épocas de aplicação do N e dos sistemas de coberturas solo, anos agrícolas 2001/02 e 2002/03.

	Teor de N folha		Grãos por espiga		Massa/mil grãos		Prod. de grãos	
	2001/02	2002/03	2001/02	2002/03	2001/02	2002/03	2001/02	2002/03
	----- g kg ⁻¹ -----				----- g -----		-----kg ha ⁻¹ -----	
	Sistema de cobertura							
Crotalária	21,7 ⁽¹⁾	26,7 ⁽¹⁾	513,3 a	512,9 a	290,4 a	304,3 a	7790 ⁽¹⁾	7755 ⁽¹⁾
Pousio	20,1	24,8	494,2 ab	491,2 b	269,3 b	290,1 b	6339	6345
Milheto	19,8	24,1	469,5 b	475,6 b	268,7 b	289,5 b	5862	6068
	Época de aplicação do N							
Quatro folhas	20,5 a	25,3	496,9 a	499,2 a	276,80 a	293,0 a	6756 a	6810
Oito folhas	20,5 a	25,0	486,3 a	487,3 a	275,40 a	296,0 a	6571 b	6632

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

⁽¹⁾ Médias sem letras na coluna referem-se à interação significativa de sistemas de cobertura do solo versus épocas de aplicação do N para o teor de N na folha e produtividade de grãos, ano agrícola 2002/03 (Tabela 12), e sistema de cobertura versus doses de N para teor de N na folha, anos agrícolas 2001/02 e 2002/03 (Figura 5a e 5b) e produtividade de grãos, ano agrícola 2001/02 (Figura 7a).

A menor produtividade de grãos de milho cultivado em sucessão ao milheto (Figura 7a e Tabelas 11 e 12), provavelmente foi em virtude da imobilização do N do fertilizante aplicado pela microbiota do solo para a decomposição dos resíduos que apresentavam relativa alta relação C/N, e também, a imobilização do N do solo, que constitui na maioria das vezes, na principal fonte de N para as culturas (Amado et al., 2002). Da mesma forma, pode ter ocorrido reimobilização do próprio N mineralizado do milheto. Além disso, o sistema radicular dessa gramínea, que certamente apresentava maior relação C/N do que o da crotalária, durante sua mineralização, deve ter contribuído também para imobilização do N mineral da solução do solo. Em adição, essa gramínea deve ter exaurido mais o N mineral do solo durante seu crescimento comparado a crotalária e, provavelmente, a dose de 30 kg ha⁻¹ de N aplicados na semeadura não foi suficiente para compensar tal efeito nessa sucessão. Assim, todos esses fatores conjuntamente, possivelmente, condicionaram um assincronismo entre a época de demanda de N pela planta e a disponibilidade de N mineral na solução do solo, proporcionando menor produtividade de grãos. Por outro lado, grande parte do N mineralizado dos resíduos vegetais pode ter sido incorporado ao N orgânico do solo, corroborando o verificado por Ladd et al. (1981) e Harris & Hesterman (1990).

A produtividade de grãos no ano agrícola 2001/02 (Figura 7a), aumentou de forma quadrática em função das doses de N aplicadas, e a máxima eficiência técnica foi alcançada com a dose de 144, 149 e 161 kg ha⁻¹ de N, para o milho cultivado em sucessão à crotalária, pousio e milheto, respectivamente. Embora o milho em sucessão ao milheto tenha sido o sistema que demandou a maior dose de N para atingir a máxima produtividade física, foi o sistema que proporcionou menor produtividade de grãos, ao contrário da crotalária, que proporcionou maior produtividade com uma menor dose de N. No ano agrícola 2002/03 (Figura 7b) a produtividade média de grãos para os três sistemas de cobertura ajustou-se à um modelo quadrático em função das doses de N aplicadas, sendo a máxima produtividade de grãos alcançada com 174 kg ha⁻¹ de N.

Figura 7. Desdobramento da interação significativa entre doses de N aplicadas no estágio quatro ou oito folhas versus sistemas de cobertura do solo para a produtividade de grãos, ano agrícola 2001/02 (a), e produtividade média de grãos em função de doses de N, ano agrícola 2002/03 (b). (Obs. * e **: significativo a 5 e 1% pelo teste F, respectivamente).

Observa-se na Tabela 12, pelo desdobramento da interação das épocas de aplicação do N versus os sistemas de cobertura do solo (ano agrícola 2002/03) para o teor de N na folha e produtividade de grãos, que os maiores valores foram quando o milho foi cultivado em sucessão à crotalária em relação às demais sucessões. A sucessão pousio-milho foi superior à milheto-milho, apenas quando o N foi aplicado no estágio oito folhas. As épocas de aplicação do N não influenciaram na sucessão crotalária-milho e pousio-milho, provavelmente devido à menor relação C/N da crotalária aliada à maior quantidade de N acumulado, proporcionando um maior e mais regular fornecimento desse nutriente durante a maior fase de absorção pela planta. Outrossim, houve menor imobilização de N mineral proveniente do solo, freqüentemente absorvido em maior quantidade em relação ao N proveniente de outras fontes (Coelho et al., 1991; Marschner, 1995; Amado et al., 2002; Cantarella & Duarte, 2004). Além disso, as condições intrínsecas do solo, com relação à interação entre outros nutrientes, os quais foram acumulados em maiores quantidades nos resíduos da crotalária (Tabela 7), podem ter beneficiado o milho cultivado em sucessão à esta leguminosa. Ainda, como demonstrado na Tabela 5, a crotalária apresentava uma quantidade de N acumulado bem maior que a dos outros sistemas de cobertura do solo. Esses fatores, certamente, favoreceram à maior absorção

de N e translocação de açúcares e de N de órgãos vegetativos para os grãos (Karlen et al., 1988). Isto, em virtude de folhas bem nutridas em N terem maior capacidade de assimilação de CO₂ e de sintetização de carboidratos durante a fotossíntese, resultando em maiores quantidades de biomassa (Büll, 1993).

Para a vegetação espontânea, onde predominava o capim colonião, picão preto, trapoeraba e corda-de-viola, possivelmente sua relativa pequena quantidade de matéria seca produzida, e que apresentava menor relação C/N comparada ao milheto, também influenciou menos na imobilização do N mineral no solo, influenciando menos na sua absorção pelo milho. Nos tratamentos sob milheto, provavelmente a maior atividade dos microrganismos quimiorganotróficos para a decomposição dos resíduos tanto da parte aérea quanto do sistema radicular, principalmente na fase inicial de desenvolvimento do milho, deve ter causado imobilização temporária do N, corroborando com o observado em outros estudos (Sá 1993; Salet, 1994; Silva et al., 1997), levando assim, a um menor teor de N na folha e produtividade de grãos nessa sucessão, sobretudo nos tratamentos que receberam o N no estágio oito folhas.

Tabela 12 - Desdobramento da interação significativa entre sistemas de cobertura do solo versus épocas de aplicação do N (estádio quatro ou oito folhas) para o teor de N na folha e produtividades de grãos de milho, ano agrícola 2002/03.

Sistema de cobertura	Teor de N na folha		Produtividade de grãos	
	Quatro folhas	Oito folhas	Quatro folhas	Oito folhas
	----- g kg ⁻¹ -----		----- kg ha ⁻¹ -----	
Crotalária	26,70 aA	26,66 aA	7693 aA	7818 aA
Pousio	24,73 bA	24,80 bA	6400 bA	6281 bA
Milheto	24,48 bA	23,50 cB	6338 bA	5798 cB

Obs: Médias seguidas por letras distintas, minúscula na coluna e maiúscula na linha, diferem entre si pelo teste de Tukey (p ≤ 0,05).

Verifica-se na Tabela 13, que houve correlação positiva e significativa da produtividade de grãos com todos os componentes de planta e produção avaliados, em ambos os anos agrícolas. A correlação com a altura da planta e de inserção da espiga, certamente está ligada ao fato do N exercer papel importante na divisão e expansão celular, além de ser constituinte da molécula de clorofila, atuando conseqüentemente, no processo fotossintético da planta. Isto proporciona aumento de área foliar, translocação e acúmulo de carboidratos

nos grãos (Büll, 1993; Uhart & Andrade, 1995). Em adição, deve-se considerar também a influência positiva do N no desenvolvimento do sistema radicular, o que condiciona maior aproveitamento de água e nutrientes pela planta (Jenkinson et al., 1985; Rao et al., 1992; Rosolem, 1995; Sá et al., 2004b).

Tabela 13 - Correlações simples entre a produtividade de grãos versus a altura de planta, altura de inserção da espiga, teor de N na folha, número de grãos por espiga, massa de mil grãos, em função de doses de N aplicadas no estágio quatro ou oito folhas e sistemas de cobertura do solo, anos agrícolas 2001/02 e 2002/03.

Ano agrícola	Avaliações				
	Altura de planta	Altura de espiga	N na folha	Grãos/espiga	Massa de grãos
2001/02	0,95**	0,93**	0,79*	0,76*	0,80**
2002/03	0,87**	0,80**	0,96**	0,93**	0,91**

Obs. * e **: Significativo a 5 e 1%, respectivamente, pelo teste t.

O maior teor de N foliar proporciona maior crescimento e desenvolvimento da planta, conseqüentemente maior índice de área foliar, proporcionando maior síntese e acúmulo de carboidratos pela fotossíntese. Por conseguinte, a planta tem maior capacidade de alocar carboidrato para o sistema radicular, promovendo seu maior desenvolvimento, condicionando maior aproveitamento do N do solo, do fertilizante e da mineralização dos resíduos vegetais. Com relação ao número de grãos por espiga e a massa de grãos, estes são componentes diretamente relacionados com a produtividade de grãos, o que provavelmente, está relacionado ao maior teor de N nas folhas, conduzindo a um maior enchimento de grãos. O fato de a concentração de N na folha correlacionar com a produtividade de grãos é um indicativo que o elemento deve ser aplicado no lugar, época e doses adequadas, para se ter uma maior eficiência de utilização pela planta. Resultados nesse sentido foram observados por Santos & Pereira (1994).

Observa-se na Tabela 14 que, exceto para os teores de Mg e de Zn no primeiro e no segundo ano agrícola e o de K no segundo ano agrícola, houve efeito significativo de doses de N em todos os demais nutrientes na folha, amostrados na época do florescimento do milho. Quanto aos sistemas de cobertura do solo, esses influenciaram significativamente somente nos teores de Ca, Mg e S, no primeiro ano agrícola, e no teor de Ca, P, de Fe e de Zn no segundo.

Verifica-se pelas equações de regressão que no primeiro ano agrícola, exceto para os

teores de Cu e Zn que não se ajustaram a nenhum modelo testado, e o de Mn que se ajustou a um modelo linear, os demais nutrientes apresentaram um comportamento quadrático em função das doses de N aplicadas. No segundo ano agrícola, os teores de Mg, P, S, Cu, Fe e Mn se ajustaram a um modelo linear em relação às doses de N aplicadas. Os demais nutrientes não se ajustaram a nenhum modelo testado. De maneira geral, os coeficientes de variação foram baixos, exceto para Fe e Zn no primeiro ano agrícola e Cu no segundo ano agrícola, ficaram abaixo de 10%.

Tabela 14 – Valores de F da análise de variância e coeficientes de variação referente aos teores de P, K, Ca Mg, S, Cu, Fe, Mn e Zn na folha do milho, na época do florescimento, em função de doses de N aplicadas no estágio quatro ou oito folhas e sistemas de cobertura do solo, anos agrícolas 2001/02 e 2002/03.

	Ca	Mg	P	K	S	Cu	Fe	Mn	Zn
Ano agrícola 2001/02									
Dose (D) ⁽¹⁾	18,50**	2,11 ns	11,65**	3,38*	40,83**	45,60**	6,14**	19,77**	1,12ns
Cobertura (C)	9,96**	8,95**	1,62 ns	0,01ns	4,36*	3,26 ns	0,07ns	0,92 ns	1,02ns
DxC	0,99 ns	1,68 ns	1,41 ns	1,28ns	0,31ns	1,15 ns	0,96 ns	0,40 ns	1,02ns
CV (%)	5,47	5,60	3,16	3,30	5,89	6,04	12,65	7,49	13,99
Ano agrícola 2001/02									
Dose (D) ⁽¹⁾	2,94*	1,15 ns	3,93 *	1,05 ns	4,49*	3,58*	10,33**	3,21*	2,16 ns
Cobertura (C)	4,65 *	0,40 ns	12,18**	1,99 ns	0,69 ns	1,54 ns	12,85**	2,94 ns	3,71*
DxC	1,15 ns	1,19 ns	2,35ns	0,77 ns	0,79 ns	0,13 ns	1,99 ns	0,65 ns	0,43 ns
CV (%)	5,13	8,60	3,01	2,91	8,25	10,80	3,63	5,35	6,48

Obs. ns, * e **: Não significativo e significativo a 5 e 1% pelo teste F, respectivamente.

⁽¹⁾ Regressão para o teor de nutriente na folha, na época do florescimento do milho, em função das doses de N.

Ano agrícola 2001/02	Ano agrícola 2002/03
Ca - $Y = 3,236 + 0,010x - 0,000044x^2$ (**) $R^2 = 0,913$	Ca - $Y = 3,612 + 0,0035x - 0,00002 x^2$ (ns) $R^2 = 0,269$
Mg - $Y = 1,641 + 0,0024x - 0,00001x^2$ (*) $R^2 = 0,741$	Mg - $Y = 1,6049 + 0,00081x$ (*) $R^2 = 0,890$
P - $Y = 2,778 + 0,0027x - 0,000009x^2$ (*) $R^2 = 0,782$	P - $Y = 2,944 + 0,0015x$ (*) $R^2 = 0,741$
K - $Y = 23,580 + 0,018x - 0,00008x^2$ (*) $R^2 = 0,972$	K - $Y = 25,02 - 0,0047x + 0,00004x^2$ (ns) $R^2 = 0,827$
S - $Y = 1,009 + 0,0047x - 0,000012x^2$ (**) $R^2 = 0,946$	S - $Y = 1,493 + 0,00143x$ (**) $R^2 = 0,968$
Cu - $Y = 6,914 + 0,0284x - 0,00005x^2$ (ns) $R^2 = 0,922$	Cu - $Y = 8,675 + 0,0102x$ (**) $R^2 = 0,934$
Fe - $Y = 65,321 + 0,576x - 0,0023x^2$ (*) $R^2 = 0,742$	Fe - $Y = 83,555 + 0,0513x$ (**) $R^2 = 0,835$
Mn - $Y = 42,392 + 0,0918x$ (**) $R^2 = 0,968$	Mn - $Y = 64,864 + 0,0293x$ (*) $R^2 = 0,664$
Zn - $Y = 18,12 + 0,0341x - 0,00001x^2$ (ns) $R^2 = 0,713$	Zn - $Y = 24,21 - 0,015x + 0,00001x^2$ (ns) $R^2 = 0,190$

Verifica-se na Tabela 15 que o cultivo sobre o solo que permaneceu em pousio na entressafra proporcionou menor teor na folha do milho, na época do florescimento, de Ca, Mg e S no primeiro ano agrícola, e de P, Fe e Zn no segundo. No entanto, exceto para o teor de S e somente no primeiro ano agrícola, os demais nutrientes encontravam-se numa faixa considerada adequada, segundo Raij et al. (1996) e, menos para o teor de Mg nos dois anos agrícolas e o de S no primeiro ano agrícola, conforme Malavolta et al. (1997). Porém, isso provavelmente esteve relacionado ao híbrido utilizado, pois os teores médios no solo, na camada de 0 a 0,10 e 0,10 a 0,20 m antes da instalação dos ensaios, para Mg ($11,6 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$) e S ($6,3 \text{ mg dm}^{-3}$), encontravam-se alto e médio (Tabela 2), respectivamente (Raij et al., 1996). De maneira geral, não foi observado sintomas de toxidez e nem de deficiência nutricional (exceto de N) na avaliação visual, indicando que as doses, os sistemas de coberturas e as épocas de aplicação do N, pouco influenciaram nos teores desses elementos na folha.

Tabela 15 - Teores de P, K, Ca Mg, S, Cu, Fe, Mn e Zn na folha do milho, na época do florescimento, em função de doses de N aplicadas no estágio quatro ou oito folhas e sistemas de cobertura do solo, anos agrícolas 2001/02 e 2002/03.

Sistema de cobertura	Ca	Mg	P	K	S	Cu	Fe	Mn	Zn
	g kg ⁻¹					mg kg ⁻¹			
	Ano agrícola 2001/02								
Crotalária	3,67 a	1,79 a	2,92 a	24,23 a	1,30 a	9,00 a	89,30 a	58,80 a	20,80 a
Milheto	3,71 a	1,72 a	2,89 a	24,21 a	1,29 a	8,70 a	88,80 a	50,60 a	19,10 a
Pousio	3,35 b	1,61 b	2,87 a	24,19 a	1,21 b	8,40 a	86,50 a	50,90 a	19,20 a
Ano agrícola 2002/03									
Crotalária	3,79 a	1,69 a	2,97 a	25,26 a	1,65 a	9,90 a	91,30 a	69,50 a	25,00 a
Milheto	3,56 b	1,69 a	2,95 a	24,98 a	1,61 a	9,60 a	88,20 a	66,80 a	24,50 a
Pousio	3,78 a	1,64 a	2,84 b	24,84 a	1,58 a	9,10 a	84,10 b	65,70 a	23,10 b
Adequado*	2,5-8,0	1,5-5,0	2,0-4,0	17-35	1,5-3,0	6-20	30-250	20-200	15-100

Obs. Médias seguidas por letras distintas na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

* Faixas de teores considerados adequados, conforme Raij et al. (1996).

Os índices de colheita (IC), ou seja, a fração de grãos produzidos em relação à matéria seca total da parte aérea da planta de milho (grãos + palha), considerando-se a média para os três sistemas de cobertura do solo e as duas épocas de aplicação do N, para o ano agrícola 2001/02, foram de 0,45; 0,47; 0,49; 0,49 e 0,51, respectivamente, para as doses 0, 30, 80, 130 e 180 kg ha⁻¹ de N. Para o ano agrícola 2002/03, foram de 0,46; 0,46; 0,48; 0,48 e 0,52, respectivamente, para as doses 0, 30, 80, 130 e 180 kg ha⁻¹ de N. De acordo com dados relatados na literatura (Doorenbos & Kassam, 1994; Lima, 1995; Gadioli, 1999) o IC para milho varia de 0,3 a 0,5, sendo o valor de 0,4 considerado satisfatório para obtenção de alta produtividade. Segundo Fancelli & Dourado Neto (2000) o IC tem alta dependência do potencial produtivo do genótipo utilizado, podendo variar de 0,60 para híbridos de alta produtividade, até 0,10 para genótipos de baixa produtividade. Resultados concordantes com o deste trabalho foram obtidos por Lara Cabezas et al. (2000), de aproximadamente 0,54; Coelho et al. (1991), 0,46; Timmons & Backer (1992), 0,53 e Timmons & Cruse (1990), 0,27 a 0,46. O índice de colheita, além da dependência do genótipo, tem também alta dependência das condições climáticas vigentes no ano agrícola, principalmente a precipitação pluviométrica (Timmons & Cruse, 1990; Fancelli & Dourado Neto, 2000).

Os teores médios de N total na palha foram de 8,74 e 8,12 g kg⁻¹ de matéria seca, respectivamente, nos anos agrícolas 2001/02 e 2002/03, apresentando pequena variação entre os tratamentos, indicando que essa característica depende mais do genótipo do que das condições do meio. Para os grãos, os teores médios no ano agrícola 2001/02, foram de 14,10; 14,47; 16,65; 17,52 e 17,68 g kg⁻¹ de grãos para as doses 0, 30, 80, 130 e 180 kg ha⁻¹ de N, respectivamente. No ano agrícola 2002/03, foram de 13,50; 14,63; 14,44; 15,70 e 16,64 g kg⁻¹ de grão para as doses 0, 30, 80, 130 e 180 kg ha⁻¹ de N, respectivamente. Verifica-se que o incremento da dose de N proporcionou aumento no teor de N no grão, indicando ser esse componente o principal dreno de N e compostos nitrogenados da planta. O N na cultura do milho influencia além da quantidade de fitomassa produzida, também na sua qualidade, principalmente no teor protéico do grão. Tsai et al. (1992) reportaram que o aumento da produção de proteína devido à aplicação de N foi acompanhado pelo aumento da quantidade de zeína presente no endosperma. Como a zeína contém baixa quantidade de aminoácidos essenciais mais limitantes, lisina e triptofano, o aumento de produtividade de grãos reduz a concentração destes no grão, conseqüentemente, o valor biológico da proteína. No entanto, isto pode ser compensado, em alguns casos, pelo aumento do tamanho do germe decorrente da aplicação de N, por ter melhor balanço de aminoácidos do que o endosperma (Bhatia & Rabson, 1987). Porém, sabe-se que esta característica é de alta herdabilidade genética e, quase

sempre, a adubação nitrogenada é realizada visando aumentar a produtividade do milho, tendo em vista que o produtor geralmente recebe pela quantidade produzida e não pela qualidade nutricional do produto colhido.

4.4 Aproveitamento do nitrogênio do fertilizante uréia pelo milho

As porcentagens de N na planta proveniente do fertilizante (%Nppf) foram praticamente semelhantes nos grãos e na palha (folhas, colmo, sabugo, pendão, bainha e palha da espiga), em ambos os anos agrícolas (Tabela 16), ficando, em média, por volta de 24% do total do acumulado na parte aérea. Urquiaga (1982), Aquino (1984), Lara Cabezas et al. (2000) e Gava (2003) também, não observaram diferenças significativas quanto à %Nppf nas diferentes partes da planta em relação à dos grãos. Isto demonstra a grande dinâmica do N dentro da planta, proporcionando pequena variação isotópica, o que é decorrente da alta mobilidade tanto do N como dos compostos nitrogenados, por causa da sua contínua síntese e degradação (Coelho et al., 1991; Ta & Weiland, 1992). O aumento da %Nppf em função dos tratamentos utilizados seguiu a mesma tendência da QNppf (Figura 8), ficando os valores médios dentro das faixas obtidas em outros estudos (Lara Cabezas et al., 2000; Duete, 2000; Cantarella et al., 2003).

Tabela 16 - Porcentagem de nitrogênio na planta (palha e grãos) proveniente do fertilizante (%Nppf), em função de doses de N aplicadas no estágio quatro ou oito folhas no milho cultivado em sucessão a crotalária, ao milheto e ao solo em pousio, anos agrícolas 2001/02 e 2002/03.

Sistema de cobertura	Nppf			
	Grãos		Palha	
	2001/02	2002/03	2001/02	2002/03
	----- % -----			
Crotalária	24,73 a	26,44 a	23,23 a	25,25 a
Pousio	22,90 a	24,90 ab	22,65 a	22,75 b
Milheto	23,61 a	23,50 b	23,40 a	21,90 b

Obs. Médias seguidas por letras distintas na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Por outro lado, a maior parte do N na planta, em média 76%, proveio do solo e outras fontes e dos adubos verdes utilizados, valor parecido foi também observado por Lara Cabezas et al., (2000), em Latossolo Vermelho de cerrado em SD. Esses dados demonstram a importância do N orgânico do solo (Sampaio et al., 1990; Marschner, 1995; Cantarella & Duarte, 2004) e do N proveniente de outras fontes como, por exemplo, os adubos verdes para a cultura do milho (Amado et al., 2002). Muitas vezes, o N orgânico do solo influencia também na %Nppf e na QNppf (Tobert et al., 1992; Liang & Mackenzie, 1994), em virtude da grande interação que o N do fertilizante pode sofrer com o N orgânico do solo.

A quantidade de N na planta de milho (palha + grãos) proveniente do fertilizante (QNppf), em ambos os anos agrícolas, aumentou de forma quadrática com o incremento da dose de N aplicada nos três sistemas de cobertura do solo (Figura 8a e 8b). A maior média de QNppf (palha + grãos) (Tabela 17), no primeiro ano agrícola, foi observada no milho cultivado em sucessão à crotalária ($41,33 \text{ kg ha}^{-1}$) e ao solo em pousio ($39,65 \text{ kg ha}^{-1}$) e menor no milho em sucessão ao milheto ($35,76 \text{ kg ha}^{-1}$). No segundo ano agrícola, a maior QNppf também foi no milho cultivado em sucessão à crotalária ($41,60 \text{ kg ha}^{-1}$), e não houve diferença entre cultivo em sucessão ao pousio ($36,65 \text{ kg ha}^{-1}$) e ao milheto ($34,75 \text{ kg ha}^{-1}$). A mesma tendência quanto às sucessões de culturas e as épocas de aplicação do N, foi também observada para o aproveitamento do N do fertilizante pelo milho.

Figura 8. Médias da quantidade de nitrogênio na planta (palha + grãos) proveniente do fertilizante (QNppf), em função das doses de N aplicadas no estágio quatro ou oito folhas e dos sistemas de cobertura do solo crotalária, milheto e pousio, anos agrícolas 2001/02 (a) e 2002/03 (b). (Obs. *: significativo a 5% pelo teste F).

Provavelmente, a menor relação C/N da crotalária, tanto da palha quanto do sistema radicular, e a menor quantidade de matéria seca produzida pela vegetação espontânea (pousio), comparada ao milheto, promoveram menor imobilização do N do fertilizante, favorecendo o seu maior aproveitamento durante a fase de maior acúmulo pelo milho (fase vegetativa). Em adição, a maior disponibilidade de N certamente proporcionou maior desenvolvimento do sistema radicular e maior mineralização do N do solo (Jenkinson et al., 1985; Rao et al., 1992), condicionando à uma maior produtividade de matéria seca do milho cultivado em sucessão a essa leguminosa, conseqüentemente acumulando maior quantidade de N.

Tabela 17 - Quantidade do nitrogênio na planta (palha, grãos e palha + grãos - total), proveniente do fertilizante (QNppf) e aproveitamento do N do fertilizante, aplicado no estádio quatro ou oito folhas, no milho cultivado em sucessão à crotalária, ao milheto e ao solo em pousio, anos agrícolas 2001/02 e 2002/03.

	QNppf			Aproveitamento		
	Grãos	Palha	Total	Grãos	Palha	Total
	-----kg ha ⁻¹ -----			-----%-----		
Sistema de cobertura	Ano agrícola 2001/02					
Crotalária	26,07 a	15,26 a	41,33 a	33,45 a	20,65 a	54,10 a
Pousio	25,13 ab	14,52 a	39,65 a	32,44 a	19,01 a	51,45 a
Milheto	23,56 b	12,20 b	35,76 b	28,01 b	15,66 b	43,67 b
Época aplicação do N						
Quatro folhas	25,34 a	14,50 a	39,84 a	31,01 a	18,80 a	49,81 a
Oito folhas	24,51 b	13,50 b	38,01 a	31,59 a	18,08 a	49,67 a
Sistema de cobertura	Ano agrícola 2001/02					
Crotalária	27,47 a	14,13 a	41,60 a	34,43 a	18,95 a	53,38 a
Pousio	23,52 b	13,13 ab	36,65 b	30,55 b	17,06 a	47,61 b
Milheto	22,77 b	11,98 b	34,75 b	29,31 b	16,53 a	45,84 b
Época aplicação do N						
Quatro folhas	25,32 a	13,55 a	38,87 a	30,79 a	17,42 a	48,21 a
Oito folhas	23,86 a	12,61 a	36,47 a	32,07 a	17,60 a	49,67 a

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

Embora as épocas de aplicação do N tenham influenciado na produtividade de grãos (Tabela 11), principalmente na sucessão milheto-milho (Tabela 12), essas não influenciaram

significativamente na QNppf e no aproveitamento do N do fertilizante pelo milho (Tabela 17). Deste modo, possivelmente, a maior resposta em produtividade de grãos de milho com a aplicação do N no estágio quatro folhas foi em razão do N do fertilizante ter promovido, indiretamente, maior aproveitamento do N do solo e dos adubos verdes pelo milho, como já comentado anteriormente, que foi de aproximadamente 76% do total de N acumulado na parte aérea do milho. Tal fato pode ter ocorrido tanto pela maior mineralização dos resíduos das plantas de cobertura e/ou do N orgânico do solo ou pelo maior desenvolvimento do sistema radicular (Jenkinson et al., 1985; Rao et al., 1992; Marschner, 1995). Apesar da QNppf não ter sido muito diferente quanto às épocas de aplicação do N, a disponibilidade de N em formas absorvíveis pela planta e conseqüente acúmulo pode ter ocorrido fora da época de maior exigência do nutriente pela planta, assim, comprometendo o seu crescimento e desenvolvimento e a produtividade. Isto provavelmente foi em razão do N ter sido imobilizado, remineralizado e absorvido pela planta, porém não mais proporcionando o incremento na produtividade que teria proporcionado se fosse absorvido na fase inicial.

Verifica-se ainda na Tabela 17, que, em ambas as épocas de aplicação do N, a média de aproveitamento do N do fertilizante foi de 49%. A maioria dos estudos demonstra que existe uma grande variação no aproveitamento do N de fertilizantes inorgânicos pelo milho, raramente ultrapassando 50% (Scivittaro et al., 2000). Essas diferenças são em virtude de diversos fatores, principalmente as condições edafoclimáticas, a qualidade, o tipo de fertilizante e o sistema de cultivo (Meisinger et al., 1985; Tobert et al., 1992; Lara Cabezas et al., 2000). Para os sistemas de cobertura do solo, em média, o aproveitamento do N no primeiro ano agrícola foi de 54,10; 51,45 e 43,67% e no segundo de 53,38; 47,61 e 45,84% para o milho cultivado em sucessão à crotalária, pousio e milheto, respectivamente.

A distribuição do N acumulado nas diferentes partes da palha do milho foi semelhante em todos os tratamentos. Em média, 64% do N alocou-se nos grãos e 36% no restante da parte aérea da planta (palha) de milho, evidenciando que o maior dreno de N na planta são os grãos, e que grande quantidade de N das partes vegetativas foi translocado para os mesmos, passando a fazer parte de aminoácidos e proteínas (Ta & Weiland, 1992). Distribuição semelhante a essas, entre o grão e o restante da parte aérea da planta, foram também observadas em outros estudos, tanto em SD como no PC, demonstrando a mesma partição de N independente do sistema de manejo (Kitur et al., 1984; Meisinger et al., 1985; Timmons & Cruse, 1990; Timmons & Baker, 1992; Lara Cabezas et al., 2000). Esses dados demonstram que grande parte do N do fertilizante (36%) absorvido e assimilado pela planta foi retornada ao solo pelos resíduos culturais, parte dela sendo remineralizada e o

restante interagindo com a MOS mais estável do solo, o que é governado pela qualidade do resíduo, principalmente sua relação C/N (Palm & Sanchez, 1991). No caso dos resíduos de milho, que tem relação alta (Sousa & Lobato, 2004), a sua mineralização é lenta, podendo imobilizar N mineral presente na solução do solo. Ressalta-se ainda, que a porção de N que retorna ao solo pelos resíduos vegetais do milho é superior à observada, por não estar sendo considerado o N presente na matéria seca do seu sistema radicular.

O aproveitamento do N do fertilizante, Figura 9a e 9b, em ambos os anos agrícolas, decresceu de forma linear com o incremento da dose de N aplicada, nos três sistemas de cobertura do solo estudados, exceto somente para a sucessão milheto-milho no primeiro ano agrícola, em que o aproveitamento foi um pouco menor nas doses de 30 e 50 kg ha⁻¹ de N, em relação à dose de 100 kg ha⁻¹ de N. Porém, foi também menor na dose de 150 kg ha⁻¹ de N. Comportamento semelhante, observando-se menor aproveitamento do N do fertilizante à medida que se elevou a dose aplicada também foram observados por outros estudos com ¹⁵N em SD (Legg et al., 1979; Timmons & Baker, 1992; Gava, 2003) e também em PC (Coelho et al., 1991; Jokela & Randall, 1997; Duete, 2000).

Figura 9. Médias do aproveitamento do nitrogênio do fertilizante pelo milho (palha + grãos), em função de doses de N aplicadas no estágio quatro ou oito folhas e sistemas de cobertura do solo crotalária, milheto e pousio, anos agrícolas 2001/02 (a) e 2002/03 (b). (Obs. * e **: significativo a 5 e 1% pelo teste F, respectivamente).

4.5 Aproveitamento do nitrogênio dos adubos verdes milho e crotalária pelo milho

Verifica-se na Figura 10, que a quantidade de N na planta de milho (palha + grãos) proveniente da parte aérea da crotalária e do milho (QNppav), assim como o aproveitamento do N (Figura 11), em ambos os anos agrícola, aumentou com o incremento da dose de N (N não marcado) aplicada, apresentando para o milho cultivado em sucessão à crotalária um comportamento linear.

Figura 10. Quantidade de nitrogênio no milho (palha + grãos) proveniente do milho e da crotalária (QNppav), em função das doses de N (não marcado) aplicadas no estágio quatro ou oito folhas, anos agrícolas 2001/02 (a) e 2002/03 (b). (Obs. *: significativo a 5% pelo teste F, respectivamente).

O aproveitamento do N da crotalária pelo milho cultivado em sucessão variou de 12,90 a 17,22% no primeiro ano agrícola (Figura 11a) e no segundo de 12,02 a 20,60% (Figura 11b). Para o milho em sucessão ao milho, variou de 3,42 a 5,46% e de 7,19 a 11,53% no primeiro e segundo ano agrícola, respectivamente. No entanto, apesar da tendência a um maior aproveitamento do N do milho com o incremento da dose de N, no primeiro ano agrícola, os dados não se ajustaram a nenhum modelo testado, e no segundo ano aumentou de forma quadrática.

Em todos os tratamentos, independente da dose de N aplicada, a quantidade de N na planta (Figura 10) e o aproveitamento do N do milho (Figura 11) foram inferiores ao milho

cultivado em sucessão à crotalária, certamente em função da menor mineralização dos resíduos desta gramínea durante a fase de maior absorção e acúmulo de N pelo milho. Isto, em virtude da sua alta relação C/N, provavelmente ter promovido reimmobilização do próprio N mineralizado dos seus resíduos, indisponibilizando temporariamente o N para as plantas (Sá, 1996; Salet et al., 1997; Lara Cabezas et al., 2000; Amado et al., 2002), conduzindo a uma menor absorção de N e, conseqüentemente menor produtividade de matéria seca pelo milho. Entretanto, deve se considerar também, a menor quantidade de N acumulada na matéria seca do milheto (Tabela 5), a qual foi por volta de um terço em relação à da crotalária, o que certamente influenciou na quantidade de N mineralizado e no seu conseqüente aproveitamento pelo milho.

Figura 11. Aproveitamento pelo milho (palha + 'grãos) do nitrogênio do milheto e da crotalária, em função das doses de N (não marcado) aplicadas no estágio quatro ou oito folhas, anos agrícolas 2001/02 (a) e 2002/03 (b). (Obs. *: significativo a 5% pelo teste F, respectivamente).

Por outro lado, a menor relação C/N da crotalária certamente proporcionou maior mineralização e menor reimmobilização do próprio N contido nos seus resíduos, comparado ao milheto, favorecendo sua absorção pelo milho. Isto, provavelmente refletiu na produtividade de grãos, a qual foi maior no milho em sucessão à crotalária quando comparado em sucessão ao milheto (Figura 7a e Tabelas 11 e 12). De maneira geral, a maior produtividade de grãos e

aproveitamento do N pelo milho cultivado em sucessão à crotalária, indicam que as condições intrínsecas do solo foram mais favoráveis a absorção de N pela planta, provavelmente devido ao maior desenvolvimento radicular (Scivittaro et al., 2000), e também à maior oferta de outros nutrientes, que certamente foram mineralizados juntos com o N, podendo ter promovido uma interação sinérgica com entre os mesmos (Guimarães et al., 2003).

Verifica-se na Tabela 18 que, assim como para o N proveniente do fertilizante, a porcentagem de N proveniente do milho ou da crotalária, comparando a mesma sucessão, foram praticamente semelhantes nos grãos e na palha do milho, demonstrando que a dinâmica do N na planta independe da fonte utilizada, seja mineral ou orgânica. Em todos os tratamentos, as quantidades e aproveitamento do N pelo milho foram superiores quando a crotalária foi utilizada como cobertura do solo. A partição média do N proveniente do milho e da crotalária foi também semelhante à observada para o N proveniente do fertilizante uréia, em média, 36% na palha e 64% nos grãos, demonstrando que essa característica é mais dependente do genótipo do que das condições externa do meio e assim como verificada para a %Nppf da fonte utilizada, mineral ou orgânica.

Tabela 18 - Porcentagem (%Nppav) e quantidade (QNppav) de nitrogênio no milho (palha, grãos e palha + grãos) proveniente do milho e da crotalária marcados e aproveitamento do nitrogênio da crotalária e do milho, em função das doses de N aplicadas no estágio quatro folhas, anos agrícolas 2001/02 e 2002/03.

	Nppav		QNppav		Aproveitamento	
	Crotalária	Milheto	Crotalária	Milheto	Crotalária	Milheto
	-----	% -----	-----	kg ha ⁻¹ -----	-----	% -----
	Ano Agrícola 2001/02					
Grãos	14,70 a	2,57 b	17,24 a	2,29 b	10,20 a	3,34 b
Palha	14,05 a	2,35 b	9,13 a	1,06 b	5,40 a	1,55 b
Grãos + palha	-	-	26,37 a	3,35 b	15,60 a	4,89 b
	Ano Agrícola 2002/03					
Grãos	13,67 a	5,34 b	17,59 a	3,98 b	9,31 a	6,22 b
Palha	13,28 a	4,48 b	12,20 a	2,67 b	6,46 a	4,17 b
Grãos + palha	-	-	29,79 a	6,65 b	15,77 a	10,39 b

Obs. Médias seguidas por letras distintas na linha, para a mesma avaliação, diferem entre si pelo teste de Tukey (p ≤ 0,05).

Pelos dados de QNppav e de aproveitamento do N verifica-se que, mais de 80% do N acumulado na parte aérea da crotalária e mais de 85% na do N milho não foi aproveitado pelo milho cultivado em sucessão, o que é indicativo da sua decomposição incompleta durante o período de absorção pela planta. Por outro lado, podem ter ocorrido perdas por lixiviação ou desnitrificação, mas isto, certamente não foi muito acentuado, em virtude do padrão de mineralização dos resíduos ser relativamente lento, e também pela grande interação que o N mineralizado de resíduos vegetais sofre com o N do solo (Azam et al., 1985; Muraoka et al., 2002). Deste modo, provavelmente a maior porção do N desses resíduos deve ter permanecido no solo dentro da zona explorada pelas raízes das plantas. A maior recuperação no solo de N oriundo de fontes orgânicas é bastante citado na literatura, onde os valores variam de 44 a 89% do N de adubos verdes, e de 12 a 53% para fertilizantes inorgânicos (Azam et al., 1985; Harris & Hesterman, 1990; Janzen et al., 1990; Corak et al., 1992; Diekmann et al., 1993; Harris et al., 1994; Ambrosano 1995; Scivittaro et al., 2003), o que se deve, em partes, à maior absorção do N de fontes inorgânicas pela planta em curto prazo. Ambrosano (1995) em um estudo da dinâmica do N da crotalária e mucuna preta marcada com ^{15}N no sistema solo-planta, observando que 60 a 80% do N das leguminosas permaneceu no solo, de 20 a 30% foi absorvido por plantas de milho e 5 a 15% deixou o sistema.

O relativo pequeno aproveitamento do N da crotalária e do milho pelo milho cultivado em sucessão, sugere que o efeito residual do N destas plantas deva ser maior do que o do fertilizante inorgânico aplicado. No entanto, alguns estudos com adubos verdes marcados com ^{15}N indicam que a maior proporção do N da matéria seca dessas plantas tem como destino o solo (Azam et al., 1985; Ladd et al., 1981; Harris & Hesterman, 1990; Ambrosano et al., 2003; Scivittaro et al., 2003).

4.6 Nitrogênio proveniente do solo no milho

Em qualquer sistema de manejo ocorre interação do N aplicado com o N orgânico do solo (Hart et al., 1994; Polson & Barraclough, 1993) que, na maioria das vezes, caracteriza-se como a principal fonte de N para a cultura do milho. A quantidade de N na planta de milho (palha + grãos) proveniente do solo (QNpps) e outras fontes (resíduos de culturas anteriores e de plantas daninha, fixação biológica, precipitação pluviométrica e outros) (Tabela 19), exceto para os grãos no ano agrícola 2001/02, quanto aos sistemas de cobertura do solo e para

a palha, quanto às doses de N no ano agrícola 2002/03, foi influenciada significativamente pelas doses e pelos sistemas de cobertura do solo. Houve também, em ambos os anos agrícolas, interação significativa entre doses e sistemas de cobertura para a QNpps, indicando a influência de uma fonte externa de N na dinâmica, absorção e acúmulo do N dessa fonte pela planta, o que se deve, em partes, como já citado anteriormente, ao estímulo na atividade metabólica da planta (Marschner et al., 1995; Magalhães, 1996), pelas influências que exerce no desenvolvimento do sistema radicular (Jenkinson et al., 1985; Sá et al., 2004), e também na mineralização do N orgânico do solo (Rao et al., 1992) e dos resíduos vegetais de culturas antecessoras.

Tabela 19 – Valores de F da análise de variância e coeficientes de variação para a quantidade de N na planta de milho (palha e grãos) proveniente do solo (QNpps), em função de doses de N e sistemas de cobertura do solo, anos agrícolas 2001/02 e 2002/03.

	QNpps			
	Palha	Grãos	Palha	Grãos
	-----2001/02-----		-----2002/03-----	
Dose (D)	8,14**	9,37**	0,67ns	41,82**
Sistemas de cobertura (C)	3,38*	1,17ns	4,40*	56,41**
DxC	6,34**	4,73**	3,90**	6,18**
Coeficiente de variação (%)	15,29	13,60	20,34	7,75

Obs. ns, * e **: não significativo e significativo a 5 e 1% pelo teste F, respectivamente.

Verifica-se na Tabela 20 que, de maneira geral, a QNpps (palha + grãos) foi mais que o dobro da quantidade proveniente do fertilizante inorgânico (QNppf -Tabela 17), e muito superior àquela suprida pelos adubos verdes (QNppav - Tabela 18), principalmente pelo milheto, sendo esta, na maioria dos tratamentos, superior a 100 kg ha⁻¹ de N. No primeiro ano agrícola, não houve diferença significativa na QNpps entre os três sistemas de cobertura do solo utilizados. Já, no segundo ano agrícola foi menor para o milho cultivado em sucessão ao milheto, mas em média a diferença foi inferior a 15 kg ha⁻¹ de N. No entanto, considerando-se a quantidade total de N acumulada no milho (QNppf + Qnppav + QNpps) 183, 158 e 150 kg ha⁻¹ de N, respectivamente, para o milho em sucessão à crotalária, pousio e milheto no ano

agrícola 2001/02, e de 202, 164 e 148 kg ha⁻¹ de N, respectivamente, para o milho cultivado em sucessão à crotalária, pousio e milheto no ano agrícola 2002/03, verifica-se que o milho cultivado em sucessão ao milheto acumulou, respectivamente, nos anos agrícolas 2001/02 e 2002/03, 33 e 52 kg ha⁻¹ de N a menos do que o milho cultivado em sucessão à crotalária. Isto demonstra que proporcionalmente o milho cultivado em sucessão ao milheto acumulou maior quantidade de N proveniente do solo do que o milho em sucessão à crotalária.

Contudo, apesar da maior a percentagem de N proveniente do solo acumulado pelo milho cultivado em sucessão ao milheto (QNpps/NA x 10²) comparado ao milho em sucessão à crotalária, essa fonte não contrabalançou o N suprido pelo fertilizante, em termos de produtividade de grãos, a qual foi menor nessa sucessão. Tal fato pode estar relacionado à absorção do N proveniente dessa fonte ter ocorrido numa época em que a planta já tivesse definido sua produção potencial, que ocorre no estágio de quatro a seis folhas expandidas (Fancelli & Dourado Neto, 2000), evidenciando a necessidade de um manejo correto do N quanto a doses e épocas de aplicação do N.

Tabela 20 - Quantidade de nitrogênio no milho (palha, grãos e palha + grãos) proveniente do solo e outras fontes (QNpps) no milho cultivado em sucessão à crotalária, ao milheto e ao solo em pousio, em função doses de N aplicadas no estágio quatro ou oito folhas, anos agrícolas 2001/02 e 2002/03.

Sistema de cobertura	QNpps		
	Grãos	Palha	Palha + grãos
	----- kg ha ⁻¹ -----		
	Ano agrícola 2001/02		
Crotalária	70,24 a	32,68 b	102,92 a
Pousio	70,93 a	36,00 ab	106,93 a
Milheto	66,88 a	37,76 a	103,84 a
	Ano agrícola 2002/03		
Crotalária	77,02 a	42,38 a	119,40 a
Pousio	74,84 a	41,65 a	116,49 a
Milheto	66,80 b	39,41 a	106,21 b

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

A quantidade de N no milho (palha + grãos) proveniente do solo (QNpps) quando cultivado em sucessão ao milheto aumentou de forma quadrática nos dois anos agrícolas, em relação às doses de N aplicadas (Figura 12). Nas demais sucessões, apesar de não terem se ajustado a nenhum modelo testado, houve uma tendência à deflexão com o incremento e menor dose de N comparado ao milho em sucessão ao milheto.

Figura 12. Quantidade de N na planta de milho (palha e grãos) proveniente do solo (QNpps), em função de doses de N aplicadas no estágio quatro ou oito folhas e sistemas de cobertura do solo, anos agrícolas 2001/02 (a) e 2002/03 (b).

O fato de proporcionalmente haver menor QNpps quando do seu cultivo em sucessão à crotalária, considerando-se sua maior produtividade de grãos e conseqüentemente maior quantidade de N acumulado, além da sua redução com o incremento da dose de N, é um indicativo de que N inorgânico aplicado pode ter promovido o maior desenvolvimento do sistema radicular do milho e/ou maior mineralização dos resíduos da parte aérea da crotalária e certamente do seu sistema radicular, efeito relatado na literatura como “*priming*” (Jenkinson et al., 1985). Assim, favorecendo além da maior absorção de N, de todos os nutrientes mineralizados concomitantemente dos seus resíduos e os presentes no solo, com destaque para aqueles que apresentam baixa mobilidade como, por exemplo, o fósforo, devido ao maior desenvolvimento do sistema radicular que pode ter ocorrido. Por outro lado, a

menor QNppf e o aumento da QNpps mesmo com o incremento da dose de fertilizante nitrogenado no milho cultivado em sucessão ao milho comparado ao cultivado em sucessão à crotalária, sugere que nessa sucessão possa ter predominado o efeito “pool substitution”, ou seja, o N inorgânico marcado aplicado pode ter tomado o lugar do N inorgânico mineral proveniente do solo que seria imobilizado, deixando, assim, maior quantidade deste propício para ser absorvido para as plantas (Rao et al., 1992; Polson & Barraclough, 1993). No entanto, ressalta-se que os processos de interações do nitrogênio aplicado ao solo com o N do solo ocorrem simultaneamente no campo e, na maioria das vezes, são difíceis de serem quantificados nessas condições.

Como para sucessão pousio-milho não foi considerado o N proveniente da vegetação espontânea presente na área por ocasião do manejo, em virtude da mesma não ter sido marcada com ^{15}N , os dados da QNpps nessa sucessão estão superestimados. Todavia, provavelmente, o aproveitamento pelo milho do N dessas plantas não deve ter sido alto, certamente inferior ao do N do milho, devido à sua menor produtividade de matéria seca de parte aérea comparado à dos adubos verdes, e também à sua relativa alta relação C/N. Além disso, o baixo teor de N e alto teor de lignina e fenóis totais (Tabelas 6), certamente condicionaram a uma pequena mineralização do N dessas plantas durante o ciclo do milho.

Com relação à utilização pelo milho do N das fontes orgânicas e inorgânicas estudadas, é importante ressaltar que os valores obtidos nesse estudo desconsideram o N contido no sistema radicular do milho, representando, portanto, uma subestimativa do total aproveitado. Possivelmente, esse fato assume maior relevância para o aproveitamento do N dos adubos verdes, uma vez que existem relatos de que grande parte do N do adubo verde absorvido pelas plantas de milho fica retida nas raízes (Azam et al., 1985). Pesquisa realizada por Coelho et al. (1991) demonstrou que o sistema radicular do milho representou 5% da matéria seca total da planta e 4% do N total acumulado na planta. Já, Lara Cabezas et al. (2000) observaram 10 e 6% respectivamente, para a matéria seca e N total. Porém, Gava (2003) observou que o sistema radicular correspondeu a 6% da matéria seca e do N total acumulado pelo milho.

O desenvolvimento do sistema radicular é afetado pelas condições edafoclimáticas e em menor escala pelo genótipo. Assim, Sá et al. (2004b) verificaram que quanto maior presença de palha na SD, maior foi o desenvolvimento do sistema radicular do milho. Tal fato foi atribuído a maior retenção de umidade, menor oscilação de temperatura e a reciclagem de nutrientes que favorece a maior absorção de cálcio e o seu acúmulo na coifa, conduzindo à um ganho relativo na extração de alguns nutrientes, em ordem decrescente $\text{P} < \text{N} < \text{K}$. No entanto,

além da enorme importância para a absorção de N que se encontra em maior profundidade e nutrientes que possuem baixa mobilidade no solo, como o P por exemplo, o sistema radicular, sobretudo em locais passíveis de veranicos, assume grande importância na absorção de água, em virtude de poucas raízes em profundidade poderem suprir a demanda da planta. Normalmente 60 a 80% do sistema radicular do milho encontra-se na camada de 0 a 0,30 m (Rosolem, 1995). Klepper (1990) demonstrou que quando a planta de milho tinha apenas 3% do sistema radicular abaixo de 1 m, 19% da água foi absorvida dessa profundidade. Em solos susceptíveis à compactação ou ao adensamento, que é a reacomodação natural das partículas do solo que normalmente ocorre na SD, conduzindo a maior densidade do solo e normalmente na redução da macroporosidade (Bertol et al., 2001; Bertol et al., 2004), é fundamental a manutenção da umidade no perfil, pois, especula-se que a mesma exerça um efeito compensatório à resistência a penetração das raízes. A presença de palha na superfície do solo tem um efeito importante nesse sentido, por causa da redução da evaporação de água (Rosolem, 1995; Sá et al., 2004). Isto sugere práticas de manejo como, por exemplo, calagem para aumentar o teor de cálcio e neutralizar o alumínio, gessagem, quando em subsuperfície os teores de Ca^{2+} forem inferiores a $4 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e/ou saturação por alumínio acima de 40% (Raij et al., 1996) e principalmente medidas que aumente a MOS e mitiguem a sua mineralização como o não revolvimento do solo, cultivo de adubos verdes e a rotação de culturas.

4.7 Análise econômica da produtividade de grãos em função das doses e épocas de aplicação do N

As produtividades de grãos aumentaram de forma quadrática (Figura 13) em função das doses de N aplicadas, em ambos os anos agrícolas. No primeiro ano agrícola (2001/02), a máxima produtividade física, com a aplicação do N no estágio quatro folhas (Figura 13a), seria alcançada com as doses de 133, 142 e 170 kg ha^{-1} de N, no milho cultivado em sucessão à crotalária (8599 kg ha^{-1}), pousio (7642 kg ha^{-1}) e milheto (7569 kg ha^{-1}), respectivamente. Para o estágio de oito folhas (Figura 13b), seria alcançada com a dose de 166, 163 e 148 kg ha^{-1} de N, no milho cultivado em sucessão à crotalária (8652 kg ha^{-1}), pousio (7991 kg ha^{-1}) e milheto (8016 kg ha^{-1}), respectivamente. No segundo ano agrícola as produtividades também se ajustaram a um modelo quadrático e a máxima eficiência técnica, com a aplicação do N no estágio quatro folhas (Figura 13c), seria alcançada com as doses de 160, 173 e 172 kg ha^{-1} de N, no milho cultivado em sucessão à crotalária (8966 kg ha^{-1}), pousio (7991 kg ha^{-1}) e milheto

(8016 kg ha⁻¹), respectivamente. Para o estágio de oito folhas (Figura 13d), seria alcançada com a dose de 169, 172 e 177 kg ha⁻¹ de N, no milho em sucessão crotalária (9201 kg ha⁻¹), pousio (7759 kg ha⁻¹) e milho (7194 kg ha⁻¹), respectivamente.

Figura 13. Produtividade de grãos de milho em função de doses de N aplicadas no estágio quatro folhas (a e c) ou oito folhas (b e d) e sistemas de cobertura do solo, anos agrícolas 2001/02 e 2002/03. (Obs. * e **: significativo a 5 e 1% pelo teste F, respectivamente).

A máxima produtividade econômica de grão de milho, considerando a relação preço do milho e o preço do N de 8/1 (preço da tonelada do fertilizante uréia igual à R\$ 981,70 e o preço de mercado do milho R\$ 16,74 a saca de 60 kg) Agrianual (2005), para o primeiro ano agrícola com o N aplicado no estágio quatro folhas, seria obtida com a dose de 101, 119 e 139 kg ha⁻¹ de N, no milho cultivado em sucessão à crotalária (8.478 kg ha⁻¹), pousio (7.552 kg ha⁻¹) e milheto (7.453 kg ha⁻¹), respectivamente. Para o estágio de oito folhas, seria alcançada com a dose de 117, 131 e 116 kg ha⁻¹ de N, no milho em sucessão à crotalária (8.459 kg ha⁻¹), pousio (7.442 kg ha⁻¹) e milheto (6.508 kg ha⁻¹), respectivamente. No segundo ano agrícola, para a aplicação do N no estágio quatro folhas, seria alcançada com as dose de 130, 143 e 144 kg ha⁻¹ de N, no milho cultivado em sucessão à crotalária (8.849 kg ha⁻¹), pousio (7.878 kg ha⁻¹) e milheto (7.910 kg ha⁻¹), respectivamente. Para o estágio de oito folhas, seria alcançada com a dose de 136, 141 e 139 kg ha⁻¹ de N, no milho em sucessão à crotalária (9.075 kg ha⁻¹), pousio (7.639 kg ha⁻¹) e milheto (7.049 kg ha⁻¹), respectivamente.

Verifica-se de uma maneira geral, que, em ambos os anos agrícolas, a máxima produtividade econômica de grãos seria superior para o milho cultivado em sucessão à crotalária, além da necessidade de uma menor dose de N, sendo a produtividade de grãos praticamente indiferente quanto à época de aplicação do N. Para o milho em sucessão ao milheto, a máxima produtividade econômica de grãos com uma menor dose de N, seria obtida com a aplicação no estágio quatro folhas, sendo o mesmo observado, no primeiro ano agrícola, também para o milho cultivado sobre o solo em pousio na entressafra. Porém, essa diferença seria menor em favor do estágio quatro folhas no segundo ano agrícola comparado ao primeiro, considerando que as doses máximas econômicas para as duas épocas de aplicação do N seriam quase semelhantes.

Dentre todos os nutrientes de plantas, o N é que proporciona maior resposta em produtividade de grãos por unidade aplicada, conforme Raij et al. (1981) para situações em que 1 kg de N equivalem a 7 kg de milho, as doses de N a serem aplicadas seriam de zero, 85 e 147 kg ha⁻¹ de N, respectivamente, para áreas com produtividade de grãos menores que 3.000 kg ha⁻¹, de 3.000 a 7.000 e de 7.000 a 8.500 kg ha⁻¹ de grãos. Fernandes et al. (1998), trabalhando em três sistemas de preparo e quatro doses de N em cobertura (0, 60, 120 e 240 kg ha⁻¹), verificaram que os dados de produtividade de grãos se ajustaram a funções quadráticas, sendo que 71 kg ha⁻¹ de N seriam suficientes para a obtenção de 90% da produtividade máxima de grãos. No presente trabalho, as doses de N para a obtenção da máxima produtividade econômica, exceto para o milho em sucessão à crotalária no primeiro ano agrícola, ficaram dentro da faixa recomendada por Raij et al. (1996) para produtividade

esperada de 8000 a 10000 kg ha⁻¹ de grãos, considerando a classe de alta resposta esperada a N, embora com produtividade de grãos menor. Da mesma forma, foram superiores às doses recomendadas por Sousa & Lobato (2004), podendo isto ser devido ao híbrido utilizado, condições climáticas vigentes e/ou ao histórico de uso e manejo do solo com cultivo predominantemente com gramíneas.

Embora a QNppav crotalária nos tratamentos sem a aplicação de N tenha sido, em média, para os dois anos agrícolas de 20 kg ha⁻¹ de N (Figura 10), a produtividade de grãos de milho (Figura 13) no primeiro ano agrícola nessa sucessão (6.410 kg ha⁻¹) equivaleria à mesma produtividade com a aplicação de 60,50 kg ha⁻¹ de N para o milho cultivado no solo em pousio e de 89,00 kg de N para o milho em sucessão ao milheto. Já, no segundo ano agrícola (5.923 kg ha⁻¹) equivaleria à aplicação de 51 e de 57 kg ha⁻¹ de N, respectivamente para o milho cultivado no solo em pousio e em sucessão ao milheto. Em ambos os anos agrícolas, tanto para o milho em sucessão ao solo em pousio quanto ao milheto, a maior quantidade de N para equipar a produtividade do milho em sucessão à crotalária sem a aplicação de N, seria quando o N fosse aplicado no estágio oito folhas, sendo que a necessidade seria em média superior a 10% da aplicada no estágio quatro folhas. Verifica-se ainda, que mesmo com a aplicação de 30 kg ha⁻¹ de N na semeadura a produtividade do milho em sucessão ao solo em pousio e ao milheto, foi relativamente baixa quando comparada à da crotalária, indicando que essa dose foi insuficiente para suprir a demanda pela planta e o processo de imobilização do N mineral da solução do solo pelos microrganismos.

Apesar disso, deve-se considerar que cada propriedade apresenta particularidades quanto à fertilidade e manejo do solo, tipos de máquinas, nível tecnológico, aspectos administrativos e outros, que tornam as mesmas diferenciadas quanto à estrutura do custo de produção (Melo Filho, 2000). Portanto, os custos podem variar, sendo que as diferenças podem recair tanto sobre o custo fixo quanto sobre o custo variável e o ponto de equilíbrio pode variar em função das alterações no custo de produção ou no preço de venda do produto, resultando em maior ou menor rentabilidade econômica para o produtor. Ressalta-se ainda que, as diferenças nas quantidades de N a serem utilizadas dependem, além da produtividade esperada, do histórico da área, características do solo, principalmente o teor de MOS, das condições climáticas, do sistema de manejo utilizado, da cultura antecessora e do preço de mercado do fertilizante e do milho.

4.8 Efeito residual do fertilizante e das plantas de cobertura do solo no milho cultivado no ano subsequente

Observa-se na Tabela 21 que, em ambos os anos agrícolas (2002/03 e 2003/04), houve efeito significativo dos sistemas de cobertura do solo utilizado no ano agrícola anterior sobre a produtividade de grãos de milho cultivado no ano agrícola subsequente. Porém, as doses de N não influenciaram significativamente, provavelmente em razão da grande interação que o N residual do fertilizante sofreu com o N do solo e, também, devido aos processos de perdas por volatilização, lixiviação e denitrificação que podem ter ocorrido na área. A maior produtividade de grãos de milho no ano agrícola 2002/03, foi obtida nos tratamentos em que a crotalária foi usada como cobertura do solo no ano agrícola anterior (2001/02), diferindo estatisticamente dos tratamentos onde se utilizou milheto e pousio, os quais não diferiram entre si. Entretanto, na área onde se realizou o cultivo 2002/03, não se observou diferença significativa na produtividade de grãos no ano agrícola subsequente (2003/04), em função do uso de crotalária ou de milheto no ano agrícola anterior, sendo que a área que permaneceu em pousio proporcionou a menor produtividade de grãos.

Tabela 21 – Valores de F da análise de variância, coeficientes de variação e médias para a produtividade de grãos em função de doses de N e sistemas de cobertura do solo utilizados no ano agrícola anterior, 2001/02 e 2002/03, observados no respectivo ano agrícola subsequente, 2002/03 e 2003/04 (efeito residual).

	Valor de F	
	2002/03	2003/04
Dose (D)	1,79 ns	0,28 ns
Sistema de cobertura (C)	13,46 **	9,70**
DxC	0,48 ns	0,33 ns
Coeficiente de variação (%)	8,02	10,20
Sistema de cobertura	Produtividade de grãos	
	----- kg ha ⁻¹ -----	
Crotalária	6129 a ⁽¹⁾	5012 a
Pousio	5666 b	4799 a
Milheto	5539 b	4531 b

Obs. ns e **: não significativo e significativo a 1% pelo teste F, respectivamente.

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

A produtividade de grãos semelhante e superior, respectivamente, para o ano agrícola 2002/03 e 2003/04, na área onde o milho foi utilizado como adubo verde no respectivo ano agrícola anterior, em relação à produtividade da área que permaneceu em pousio, é o contrário do observado quando se cultivou o milho imediatamente subsequente ao seu cultivo, que proporcionou menor produtividade de grãos, principalmente quando o N foi aplicado no estádio oito folhas (Figura 7a e Tabelas 11 e 12). Esse resultado sugere que, provavelmente, a decomposição/mineralização dos resíduos dessa gramínea foi incompleta durante o período de cultivo do milho, e que a maior parte dos nutrientes contidos na sua matéria seca permaneceu no solo.

Quanto à maior produtividade de grãos, na área onde foi cultivada crotalária no primeiro ano, isto demonstra que parte do N e de outros nutrientes contidos na sua matéria seca, podem favorecer aos cultivos subsequentes. Conforme observado por Scivittaro et al. (2003) e Ambrosano (1995) a eficiência de utilização do N de adubos verdes, raramente ultrapassa 20% no primeiro cultivo após o cultivo do mesmo, o que provavelmente deve ter favorecido os tratamentos sobre a área de crotalária, devido ter fornecido mais N e outros macro e micronutrientes que se encontravam em formas orgânicas lábeis, tornando disponíveis. Essa premissa também é válida para o milho, pois como ficou demonstrada na Figura 10, pequena quantidade do N acumulado na sua matéria seca foi encontrada no milho cultivado logo em sucessão.

Outro aspecto a ser considerado é que, muitas vezes, são difíceis de serem quantificados, diretamente, os benefícios que os resíduos de adubos verdes condicionam ao solo, como por exemplo, alelopatia à plantas daninhas, controle de fitoparasistas e fitopatógenos, interação entre nutrientes, melhoria da estrutura do solo, liberação de exsudados pelo sistema radicular e outros. Além disso, proporcionam menor oscilação de temperatura do solo e maior retenção de umidade, promovendo condições mais favoráveis ao desenvolvimento da planta. Em síntese, os vários fatores agem conjuntamente e, freqüentemente, algumas análises não são tão “refinadas” para discriminar tais efeitos.

Observa-se na Tabela 22 que o aproveitamento do N dos resíduos da crotalária pelo milho cultivado no respectivo ano agrícola subsequente foi inferior a 3% do total contido nos seus resíduos, por ocasião do manejo no ano agrícola anterior, que era de 169 e 189 kg ha⁻¹, respectivamente, para o primeiro e segundo ano agrícola (Tabela 5). Para o N remanescente do milho, o aproveitamento pelo milho foi pouco superior, porém, a QNppav no milho foi menor, em virtude da menor quantidade de N acumulada na matéria seca na época do manejo, que era de 68,5 e 64 kg ha⁻¹, respectivamente, para o primeiro e segundo ano agrícola

(Tabela 5). Esse relativo baixo aproveitamento do N pelo milho no ano agrícola subsequente, provavelmente foi em razão da maior parte do N remanescente ter interagido com o N do solo, passando para formas mais estáveis da MOS.

Geralmente o N remanescente dos adubos verdes e fertilizantes inorgânicos é encontrado, predominantemente, sob a forma de compostos orgânicos. Por essa razão o aproveitamento por cultivos subsequentes é, em geral, bastante pequeno, da ordem de 1 a 6% do montante aplicado (Hesterman et al., 1987; Harris & Hesterman, 1990; Rekhi & Bajwa, 1993). A velocidade de mineralização tem alta dependência do sistema de cultivo e, no caso da SD, onde não se promove o revolvimento do solo e a incorporação dos resíduos vegetais, a mineralização é mais lenta do que no PC (Amado et al., 2002). No entanto, a contribuição desses materiais para o “pool” de N orgânico do solo é fundamental para a manutenção da sua produtividade em longo prazo (Azam et al., 1985; Janzen et al., 1990; Lopes et al., 2004), principalmente pelos efeitos benéficos sobre a CTC (Igue, 1984; Raij, 1991).

Tabela 22 – Quantidade de nitrogênio na planta de milho (palha, grãos e palha + grãos), proveniente da crotalária e do milheto (QNppav) e aproveitamento do N da crotalária e do milheto, utilizados como cobertura do solo no ano agrícola anterior, 2001/02 e 2002/03, observada no respectivo ano agrícola subsequente, 2002/03 e 2003/04 (efeito residual).

Sistema de cobertura	QNppav			Aproveitamento		
	Grãos	Palha	Palha + grãos	Grãos	Palha	Palha + grãos
	-----g ha ⁻¹ -----			-----%-----		
	Ano agrícola 2002/03					
Crotalária	2630 a	1200 a	3830 a	1,56 b	0,71 b	2,27 b
Milheto	1760 b	950 b	2710 b	2,59 a	1,39 a	3,98 a
	Ano agrícola 2003/04					
Crotalária	3260 a	1720 a	4980 a	1,73 a	0,91 b	2,64 b
Milheto	1030 b	820 b	1850 b	1,62 a	1,29 a	2,91 a

Obs. Médias seguidas por letras distintas na coluna diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Verifica-se na Figura 14 que, independente da dose de N aplicada no agrícola anterior, foi relativamente pequena a absorção de N pelo milho, residual no solo e na palha do milho, em média, inferior a 4 kg ha⁻¹, tendo os dados ajustado a um modelo quadrático, em

relação às doses de N aplicadas no milho cultivado no ano agrícola anterior. Isto, certamente foi em função da grande interação que o N residual sofreu com o N do solo, e também aos resíduos do milho (palha) que acumularam, em média, 34% do N absorvido no ano anterior, possuírem alta relação C/N e, somente lentamente serem mineralizados. Em adição, deve ser considerado que o trabalho foi realizado no campo em microparcelas não confinadas, podendo ter ocorrido perda lateral de N (Villas Bôas et al., 1999; Coelho et al., 1991; Lara Cabezas et al., 2000; Gava, 2003). Além disso, o milho cultivado no ano anterior, considerando a média dos três sistemas de cobertura do solo, aproveitou em torno de 49% do N aplicado (Tabela 17) e parte do aplicado pode ter sido perdida por lixiviação, volatilização, desnitrificação ou erosão naquele ano agrícola, ou no ano agrícola em que foi avaliado o efeito residual. Ressalta-se ainda que a área permaneceu em pousio na entressafra antecedente à avaliação do efeito residual, podendo grande parte do N remanescente do fertilizante ter sido absorvido por plantas daninhas que desenvolveram naquele local e somente lentamente com sua decomposição/mineralização tornar-se disponível.

Figura 14. Quantidade de nitrogênio no milho (palha, grãos e palha + grãos) proveniente do fertilizante (QNppf), aplicado em diferentes doses e épocas no milho cultivado no ano agrícola anterior, 2001/02 e 2002/03, observada no respectivo ano agrícola subsequente, 2002/03 (a) e 2003/04 (b) (Efeito residual). (Obs. *: significativo a 5% pelo teste F).

O aproveitamento do N remanescente do fertilizante referente à área do segundo ensaio (Figura 15b) foi bem menor do que o do primeiro, provavelmente devido às condições climáticas dos diferentes anos agrícolas. Além disso, tanto a produtividade de grãos quanto a de palha foram, em média, 20% superior no primeiro ano de avaliação do efeito residual (Tabela 21), o que certamente condicionou a uma maior proporção de N residual do fertilizante acumulado. No entanto, tanto o aproveitamento do N remanescente dos adubos verdes quanto o do fertilizante inorgânico estão subestimados por não estar sendo contabilizado o N acumulado no sistema radicular do milho.

Figura 15. Aproveitamento pelo milho (palha, grãos e palha + grãos), do nitrogênio remanescente do fertilizante aplicado em diferentes doses e épocas no milho cultivado no ano agrícola anterior, 2001/02 e 2002/03, observado no respectivo ano agrícola subsequente, 2002/03 (a) e 2003/04 (b) (efeito residual). (Obs. *: significativo a 5% pelo teste F).

Durante o ciclo da cultura do milho, dezembro a abril dos anos agrícolas de 2001/02 (Apêndice A1) e 2002/03 (Apêndice A2) e 2003/04 (Apêndice A3), exceto no último ano agrícola, não houve períodos de estiagem (veranicos), comuns na região de cerrado, que limitassem o desenvolvimento da cultura e a produtividade de grãos. As temperaturas máxima e mínima na área experimental durante o ciclo da cultura, estiveram dentro da média local. Porém, a temperatura na região é bastante elevada, principalmente a noturna, o que tem influência direta no acúmulo de matéria seca pela planta. Segundo Fancelli & Dourado Neto

(2000) a temperatura é um dos fatores de produção mais importante e decisivo para o desenvolvimento e rendimento do milho devido à redução da taxa fotossintética líquida e do ciclo vegetativo, diminuição da atividade da redutase do nitrato e, conseqüentemente, interferindo no processo de transformação e assimilação do N. Deste modo, temperaturas elevadas prevalentes no período noturno ($>24^{\circ}\text{C}$) promovem um consumo energético elevado, em função do incremento da respiração celular, ocasionando menor saldo de fotoassimilados, com conseqüente queda de rendimento da cultura.

4.9 Considerações finais

A grande demanda de informações sobre as transformações do N no sistema solo-planta, aliada às sazonalidades climáticas anuais e as condições edafoclimáticas das deferentes regiões, implica na necessidade de estudos procurando elucidar a influência de diferentes sistemas de cobertura na produtividade e no aproveitamento do N pelo milho e culturas utilizadas na rotação/sucessão em semeadura direta. Apesar de ser mais difícil, os novos estudos deverão avaliar também o efeito do sistema radicular e da interação do N com outros nutrientes provenientes do próprio adubo verde e do solo. Os resultados do presente estudo indicam que existe provavelmente uma grande interação desses fatores e somente o N da parte aérea dos adubos verdes, principalmente no caso da crotalária, não explica a resposta em produtividade de grãos do milho obtida. Possivelmente, em partes deve-se ao fornecimento de N pelo sistema radicular dos adubos verde, e principalmente pelo condicionamento sinérgico que esses resíduos proporcionam à planta com relação à absorção do N de distintas fontes e demais nutrientes. A crotalária demonstrou ser uma excelente opção como fonte de N para produtor que trabalha com média tecnologia, podendo substituir integralmente o uso de uma fonte inorgânica de N para o milho. No caso do milho cultivado em sucessão ao milheto, ao solo em pousio ou à plantas de cobertura que apresentem relativa alta relação C/N, em condições edafoclimáticas parecidas com a do presente estudo, existe grande probabilidade de respostas à doses de N superiores a 30 kg ha^{-1} na semeadura.

Em síntese, na recomendação e no manejo da adubação nitrogenada para o milho torna-se importante considerar os estágios de definição da produção potencial e a marcha de absorção de N da cultura, as condições climáticas, o tipo de solo, a rotação/sucessão de culturas, o sistema de cultivo e o genótipo utilizado, objetivando-se reduzir as perdas, aumentar a eficiência de utilização do N, a produtividade e a qualidade de grãos, conseqüentemente a lucratividade do produtor com menor risco para o meio ambiente, imprescindível no conceito de “Agricultura sustentável”.

5 CONCLUSÕES

A produtividade de grãos foi superior no milho em sucessão à crotalária, nos dois anos agrícolas, em relação às sucessões pousio-milho e milheto-milho, as quais diferiram entre si, com menor produtividade na sucessão milheto-milho no primeiro ano agrícola, e apenas no estágio oito folhas no segundo.

A aplicação do N no estágio quatro folhas proporcionou maior produtividade de grãos de milho nos três sistemas de cobertura do solo no primeiro ano agrícola e, somente na sucessão milheto-milho no segundo, sendo indiferente nas demais.

As épocas de aplicação do N não influenciaram no seu aproveitamento pelo milho, mas, a aplicação no estágio quatro folhas demonstrou ser mais viável economicamente quando o milho foi cultivado em sucessão ao milheto e ao solo em pousio.

O incremento na dose de fertilizante nitrogenado proporcionou aumento na quantidade de N na planta proveniente do fertilizante e diminuiu o seu aproveitamento, que foi em média, considerando-se os dois anos agrícolas, de 53%, 49% e 44% para o milho cultivado em sucessão à crotalária, pousio e milheto, respectivamente.

O incremento na dose de fertilizante nitrogenado proporcionou aumento linear no aproveitamento pelo milho do N da crotalária, e quadrático para o N do milheto no segundo ano agrícola, que foi em média de 15,60% 7,60%, respectivamente.

A crotalária promoveu maior aproveitamento do N da uréia pelo milho em sucessão comparada ao milheto, no qual a proporção de N proveniente do solo foi maior comparado à da crotalária.

O solo forneceu maior quantidade de N para o milho comparado ao fertilizante inorgânico e os adubos verdes conjuntamente.

O aproveitamento médio do N remanescente da parte aérea do milheto e da crotalária, pelo milho cultivado no ano agrícola subsequente, foi inferior a 3,5% e 3%, respectivamente, da quantidade inicial, e o do N remanescente do fertilizante uréia foi inferior a 3% do aplicado inicialmente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADDISCOTT, T. M. Tillage, mineralization and leaching. *Soil & Tillage Research*, Amsterdam, v. 53, p. 163-165, 2000.

AITA, C.; BASSO, C. J.; CERETA, C. J.; GONÇALVES, C. N.; ROS, C. O. Plantas de cobertura do solo como fonte de nitrogênio ao milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 25, p. 157-165, 2001.

ALVES, V. M. C.; VASCONCELLUS, C. A.; FREIRE, F. M.; PITTA, G. V. E. ; FRANÇA, G. E.; RODRIGUES FILHO, A.; ARAÚJO, J. M.; VIEIRA, J. R.; LOURENÇO, J. E. Milho. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V, V. H. (Ed). *Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais*. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. 359 p.

AMABILE, R. F.; FANCELLI, L. A.; CARVALHO, A. M. Comportamento de espécies de adubos verdes em diferentes épocas de semeadura e espaçamentos na região dos cerrados. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 35, p. 47-54, 2000.

AMADO, T. J. C.; MILNICZUK, J. Estimativa da adubação nitrogenada para o milho em sistema de manejo e cultura de coberturas do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 24, p. 553-560, 2000.

AMADO, T. J. C.; MILNICZUK, J.; AITA, C. Recomendação de adubação nitrogenada para o milho no RS e SC adaptada ao uso de culturas de cobertura do solo, sob sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 26, p. 241-248, 2002.

AMADO, T. J. C.; MILNICZUK, J.; FERNANDES, S. B. V. Leguminosas e adubação mineral como fonte de nitrogênio para o milho em sistemas de reparo do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 24, p. 179-189, 2002.

AMBROSANO, E. J. *Dinâmica do nitrogênio dos adubos verde, crotalária juncea (crotalária juncea) e mucuna-preta (Mucuna aterrima) em dois solos cultivados com milho*. 1995. 83 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

AMBROSANO, E. J.; MURAOKA, T.; TRIVELIN, P. C. O. Técnica para marcação dos adubos verdes crotalária júncea e mucuna-preta com ^{15}N para estudos da dinâmica do nitrogênio. *Bragantia*, Campinas, v. 56, p. 219-224, 1997.

AMBROSANO, E. J.; TRIVELIN, P. C. O.; CANTARELLA, H.; AMBROSANO, G. M. B.; MURAOKA, T. Nitrogen materialization in soils amended with summhemp, valvet bean and common bean residues. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 60, p. 133-137, 2003.

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 macromutrientes. *Anais da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”*, Piracicaba, v. 32, p. 11-149, 1975.

ANGHINONI, I.; NICOLODI, M. Estratégias de calagem no sistema plantio direto. In: REUNIÃO BRASSLEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS - Fertbio 2004, 26., 2004, Lages. *Palestra...* Lages, 2004. 1 CD-ROM.

AQUINO, A. R. L. *Níveis e modos de aplicação da uréia ^{15}N no arroz (*Oriza sativa* L.) submetidos a veranicos*. 1984. 134 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1984.

ARGENTA, G.; SILVA, P. R. F. Adubação nitrogenada em milho implantado em semeadura direta após aveia preta. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 29, p. 745-754, 1999.

ARGENTA, G.; SILVA, P. R. F.; FOSTHOFER, E. L.; STRIEDER, M. L.; SUHRE, E. TEICHMANN, L. L. Adubação nitrogenada em milho pelo monitoramento do nível de nitrogênio na planta por meio do clorofilômetro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 27, p. 108-119, 2003.

AZAM, F.; MALIK, K. A.; SAJJAD, M. I. Transformations in soil and availability to plants of ^{15}N Applied as inorganic fertilizer and legume residues. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 86, p. 3-13, 1985.

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*, Madison, v. 23, p. 305-310, 1994.

BARBER, S. A. *Soil nutrient bioavailability: a mechanistic approach*. New York: J. Wiley, 1984. p. 179-200.

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

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

BAYER, C. *Dinâmica da matéria orgânica em sistemas de manejo de solos*. 1996. 240 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; SAAB, S. C. Diminuição da humificação da matéria orgânica de um cambissolo húmico em plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 27, p. 537-544, 2003.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Conteúdo de nitrogênio total num solo submetido a diferentes métodos de preparo e sistemas de cultura. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 21, p. 235-239, 1997.

BELOW, F. E. *Fisiologia, nutrição e adubação nitrogenada do milho*. Piracicaba: POTAFOS, 2002. p. 7-12. (Informações Agronômicas, 99).

BERTOL, L.; ALBUQUERQUE, J. A.; LEITE, D.; AMARAL, A. J.; ZOLDAN JUNIOR, W. A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas a do campo nativo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.28, p.155-163, 2004.

BERTOL, L.; BEUTLERR, J. F.; LEITE, D.; BATISTELA, O. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 58, p. 555-560, 2001.

BHATIA, C. R.; RABSON, R. Relationship of grain yield and nutritional quality. In: OLSON R. A.; FREY, K. I. (Ed.). *Nutritional quality of cereal grains*: Genetics and agronomic management. Madison: ASA, 1987. p. 11-44.

BOQUET, D. J.; COCO, A. B.; JOHNSON, C. C. *Response of corn to plant density and nitrogen rate*. St. Joseph Northeast Research Station; Macon Ridge Research Station, 1988. p. 63-65. (Annual Progress Report).

BREMNER, J. M. Nitrogen-total. In: KLUTE, A.; WEAVER, R. W.; MICKELSON, S. H.; SPARKS, D. L.; BARTELS, J. M. *Methods of soil analysis*. Part 3 - Chemical methods. Madison: SSSA, 1996. p. 1085-1121. (Book Series, 5).

BÜLL, L. T. Nutrição mineral do milho. In: BÜLL, L. T.; CANTARELLA, H. *Cultura do milho*: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba: POTAFOS, 1993. p. 63-146.

BURLE, M. L.; BOWEN, W. T.; PEREIRA, J.; SUHET, A. R.; RESCK, D. V. S. *Identificação de leguminosas adubo verde tolerantes à seca nos cerrados*. Planaltina: EMBRAPA, CPAC, 1988. 4 p.

CALEGARI, A. Alternativa de rotação de culturas para plantio direto. *Revista Plantio Direto*, Passo Fundo, n. 80; p. 62-70, 2004.

CAMARGO, F. A. O.; SÁ, E. L. S. Nitrogênio e adubos nitrogenados. In: BISSANI, C. A.; GIANELO, C.; TEDESCO, MARINO, J.; CAMARGO, F. A. O. *Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas*. Porto Alegre: Gênese, 2004. p. 93-116.

CAMPOS, A. X. *Fertilização com sulfato de amônio na cultura do milho em um solo do cerrado de Brasília sob pastagem de Brachiaria decumbens*. 2005. 119 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

CANTARELLA, H. Calagem e adubação do milho. In: BÜLL, L. T.; CANTARELLA, H. (Ed.) *Cultura do milho*: fatores que afetam a produtividade. Piracicaba: POTAFOS, 1993. p.

148-196.

CANTARELLA, H.; DUARTE, A. P. Manejo da fertilidade do solo para a cultura do milho. In: GALVÃO, J. C. C.; MIRANDA, G. V. *Tecnologia de produção de milho*. Viçosa: UFV, 2004, p. 139-182.

CANTARELLA, H.; GALLO, P. B.; BOLONHEZI, D.; QUAGGIO, J. A. Inibidor de urease para a produção de milho em plantio direto. REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS - Fertbio 2004, 26., 2004, Lages. *Resumos...* Lages: 2004. 1 CD-ROM.

CANTARELLA, H.; LERA, F. L.; BOLONHEZI, D.; LARA CABEZAS, W. A. R.; TRIVELIN, P. C. O. Antecipação de N em milho em sistema de plantio direto usando ¹⁵N-uréia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003. Ribeirão Preto. *Resumos...* Ribeirão Preto: SBCS, 2003. 1 CD-ROM.

CARVALHO, A. M.; CORREIA, J. C.; BLANCANEUX, P.; FREITAS, L. R.; MENEZES, H. A.; PEREIRA, J.; AMABILE, R. F. Caracterização de espécies de adubos verdes para o cultivo de milho em Latossolo Vermelho Escuro originalmente sob cerrado. In: SIMPÓSIO SOBRE O CERRADO, VIII, INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON TROPICAL SAVANNAS, Brasília, 1996. *Anais...* Goiânia: EMBRAPA-CPAC, p. 384-388, 1996.

CARVALHO, M. A. C.; SORATTO, R. P.; ATHAYDES, M. L. F.; ARF, O.; SÁ, M. E. Produção do milho em sucessão a adubos verde no sistema de plantio direto e convencional. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 39, p. 47-53, 2004.

CASSIOLATO, M. E.; MEDA, A. R.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; OLIVEIRA, J. C. Evaluation of oat extracts on the efficiency of lime in soil. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, Curitiba, v. 43; p. 533-536, 2000.

CERETTA, C. A. Manejo da adubação nitrogenada na sucessão aveia/milho no sistema plantio direto. In: FRIES, M. R.; DALMOLIN, R. S. D. (Coord.) *Atualização em recomendação de adubação e calagem: ênfase em plantio direto*. Santa Maria: UFSM, Departamento de Solos, 1997. p. 112-124.

CERETTA, C. A.; FRIES, M. R. Adubação nitrogenada no sistema plantio direto. In:

NUERNBERG, N. J. (Ed.) *Conceitos e fundamentos do sistema plantio direto*. Lages: SBCS, 1998. p. 111-120.

COELHO, A. M.; CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A. Rendimento de milho no Brasil: Chegamos ao máximo. In: SIMPÓSIO DE ROTAÇÃO SOJA/MILHO NO PLANTIO DIRETO, 3., 2002, Piracicaba. *Resumos...* Piracicaba, 2002. p. 32.

COELHO, A. M.; CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A. *Rendimento do milho no Brasil: chegamos ao máximo?* Piracicaba: POTAFOS, 2003. p. 1-12. (Informações Agronômicas, 101).

COELHO, A. M.; FRANÇA, G. C.; BAHIA, A. F. C.; GUEDES, G. A. Balanço de nitrogênio ¹⁵N em Latossolo Vermelho-Escuro, sob vegetação de cerrado, cultivado com milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 95, p. 187-193, 1991.

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

COELHO, M. A. *Balanço de nitrogênio (¹⁵N) na cultura do milho (Zea mays L.) em um latossolo vermelho escuro fase cerrado*. 1987. 123 f. Dissertação (M.S.) – Escola Superior de Agricultura de Lavras, Lavras, 1987.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL E SANTA CATARINA (CFS-RS/SC, 1995). *Recomendação de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina*. 3. ed. Passo Fundo: SBCS; EMBRAPA, CNPT, 1995. 223 p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. *Comparativo da área, produção e produtividade safra 2001/2002 e safra 2002/2003*. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 18 jan. 2005.

CORAK, S. J.; SMITH, M. S.; MacKOWN, C. T. Fate of ¹⁵N labeled legume and ammonium nitrogen sources in a soil-plant system. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, New York, v. 23, p. 631-642, 1992.

DAY, P. R. Particle fractionation and particle-size analysis. In: BLACK, C. A.; EVANS, D.

D.; WHITE, J. L. (Ed.) *Methods of soil analysis*. Madison: ASA, 1965. p. 545-567. (Part. I).

DE-POLLI, H.; CHADA, S. S. Adubação verde incorporada ou em cobertura na produção de milho em solo de baixo potencial de produtividade. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 13, p. 287-293, 1989.

DICK, W. A. Organic carbon, nitrogen, and phosphorus concentrations and pH in soil profiles as affected by tillage intensity. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 47, p. 102-107, 1983.

DIEKMANN, K. H.; DE DATTA, S. K.; OTTOW, J. C. G. Nitrogen uptake and recovery from urea green manure in lowland rice measured by ^{15}N and non-isotope techniques. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 148, p. 91-99, 1993.

DIEKOW, J.; CERETTA, C. A.; PAVIMATTO, P. É possível antecipar toda adubação toda adubação nitrogenada do milho no sistema plantio direto? In: REUNIÃO BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO, 2., 1998, Santa Maria. *Resumos...* Santa Maria: SBCS, 1998. p. 163-166.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. *Efeito da água no rendimento das culturas*. Campina Grande: UFPB, 1994. 306 p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 33).

DORAN, J. W. Microbial biomass and mineralizable nitrogen distributions in no-tillage and plowed soils. *Biology and Fertility of Soils*, Berlin, v. 5, p. 68-75, 1987.

DUARTE, A, P. *Resposta da cultura do milho ao nitrogênio no sistema plantio direto e sua influência na qualidade dos grãos*. 2003. 174 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

DUETE, R. R. C. *Estudo de doses, parcelamentos e formas de aplicação de nitrogênio na adubação de milho usando ^{15}N* . 2000. 152 f. Tese (Doutorado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

ECHEVERRIA, H. E.; ROZAS, H. S. Fertilización nitrogenada bajo siembra directa. In : REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS - Fertbio 2004, 26., 2004, Lages. *Palestra...* Lages, 2004. 1 CD-ROM.

ELABBADI, K.; SMAILI, M.; MATERON, L. A. Competition between *Medicago truncatula* and wheat for ^{15}N labeled soil nitrogen and influence of phosphorus. *Soil Biology and Biochemistry*, Oxford, v. 28, p. 83-88, 1996.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa do Solo. *Manual de métodos de análise de solo*. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, CNPS, 1997. 212 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. *Alternativas para plantio direto e adubação verde na região do cerrado*. Planaltina: Embrapa Cerrados, 1999b. 2 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Brasília: Embrapa Produção de Informações, 1999a. 412 p.

FAHL, J. I.; CAMARGO, M. B. P.; PIZZINATO, M. A.; BETTI, J. A.; MELO, A. M. T.; DeMARIA, I. C.; FURLANI, A. M. C. *Instruções agrícolas para as principais culturas econômicas*. 6. ed. Campinas: Instituto Agrônomo, 1998. 306 p. (Boletim, 200).

FANCELLI, A. L.; DOURADO NETO, D. *Produção de milho*. Guaíba: Agropecuária, 2000. 360 p.

FANCELLI, A. L.; FAVARIN, J. L. Realidade e perspectivas para o sistema de plantio direto no Estado de São Paulo. In: FANCELLI, A. L. *Plantio direto*. Piracicaba: FEALQ; ESALQ/USP, 1989. p. 15-34.

FAVERO, C.; JUCKSCH, I.; COSTA, L. M.; ALVARENGA, R. C.; NEVES, J. C. L. Crescimento e acúmulo de nutriente por plantas espontâneas e leguminosas utilizadas para adubação verde. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 24, p. 171-177, 2000.

FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO NA PALHA. *Evolução da área de plantio direto no Brasil*. Disponível em: <<http://www.agri.com.br/febrapdp>>. Acesso em: 20 jan. 2005.

FERNANDES, L. A.; FURTINI NETO, A. E.; VASCONCELLOS, C. A.; GUEDES, G. A. A. Preparo do solo e adubação nitrogenada na produtividade do milho em latossolo sob vegetação de cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 22, p. 247-254, 1998.

FNP COMÉRCIO E CONSULTORIA. *Agrianual*. São Paulo, 2005. 520 p.

FOX, R. H.; ROTH, G. W.; IVERSEN, K. V.; PIEKIELEK, W. P. Soil and tissue nitrate tests compared for predicting soil nitrogen availability to corn. *Agronomy Journal*; Madison, v. 81, p. 971-974, 1989.

FRANÇA, G. E. et al. Acumulação de massa seca e de nitrogênio na cultura de milho irrigado. In: RELATÓRIO TÉCNICO ANUAL DO CENTRO NACIONAL DE PESQUISA DE MILHO E SORGO, 1992-1993. Sete Lagoas: EMBRAPA/CNPMS, 1994. p. 29-30.

FRANCHINI, J. C.; GONZALEZ-VILA, F. J.; CABRERA, F.; MIUAZAWA, M.; PAVAN, M. A. Rapid transformations of plant water-soluble organic compounds in relation to cation mobilization in an acid Oxisol. *Plant and Soil*, Dordrecht, v. 231, p. 55-63, 2001

FRANCHINI, J. C.; MALAVOLTA, E.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A. Alterações químicas de solos ácidos após a aplicação de resíduos vegetais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 23, p. 533-542, 1999.

FRANCHINI, J. C.; MYAZAWA, M.; PAVAN, M. A. Influência de resíduos vegetais na toxidez de alumínio e na mobilidade de íons no solo. In: REUNIÃO BRASSLEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS - Fertbio 2004, 26., 2004, Lajes. *Palestra...* Lages, 2004. 1 CD-ROM.

FRANCIS, D. D.; SCHEPERS, J. S.; VIGIL, M. S. Post-anthesis nitrogen loss from corn. *Agronomy Journal*, Madison, v. 85, p. 659-653, 1993.

GADIOLI, J. L. *Estimativa de rendimento de grãos e caracterização fitotécnica da cultura de milho (Zea mays L)*. 1999. 86 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

GAVA, G. J. C. *Compartimentalização do nitrogênio no sistema solo-planta na implantação da semeadura direta no ciclo da cultura do milho*. 2003. 125 f. Tese (Doutorado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

GAVA, G. J. C.; TRIVELIN, P. C. O.; VITTI, A. C.; TEIXEIRA, G. M. Efeito da umidade do solo na taxa bruta de mineração do nitrogênio. In: INTERNATIONAL NUCLEAR

ATLANTIC CONFERENCE, 6, Rio de Janeiro, 2002. *Anais...* Rio de Janeiro, 2002. 1 CD-ROM.

GONÇALVES, C. N.; CERETTA, C. A.; BASSO, C. J. Sucessões de culturas com plantas de cobertura e milho em plantio direto e sua influência sobre o nitrogênio do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 24, p. 153-159, 2000.

GUIMARÃES, G. L.; BUZETTI, S.; SILVA, E. C.; LAZARINI, E.; SÁ, M. E. Culturas de inverno e pousio na sucessão da cultura da soja em plantio direto. *Acta Scientiarum. Agronomy*, Maringá, v. 2, p. 339-344, 2003.

HARRIS, G. H.; HESTERMAN, O. B. Quantifying the nitrogen contribution from alfafa to soil and two succeeding crops using nitrogen-15. *Agronomy Journal*, Madison, v. 82, p. 129-134, 1990.

HARRIS, G. H.; HESTERMAN, O. B.; PAUL, E. A.; PETERS, S. E. JANKE, R. R. Fate of legume and fertilizer nitrogen-15 in a long term cropping systems experiment. *Agronomy Journal*, Madison, v. 86, p. 910-915, 1994.

HART, S. C.; MYROLD, D. D. ^{15}N trace studies of soil nitrogen transformation. In: BOUTTON, W.T.; YAMASAKI, S. (Ed.) *Mass spectrometry of soils*. New York: Marcel Decker, 1996. p. 225-245.

HART, S. C.; STARK, J. M.; DAVIDSON, E. A.; FIRESTONE, M. K. Nitrogen mineralization immobilization and nitrification. In: BIGHAM, J. M. (Ed) *Methods of analysis: Part 2 Microbiological and biochemical properties*. Madison: SSSA, 1994a. p. 985-1017.

HAUCK, R. D.; BREMNER, J. M. Use of tracers for soil, and fertilizer nitrogen research. *Advance Agronomy*, New York, v. 28, p. 219-266, 1976.

HEATH, R. L. Table of isotopes. In: WEAST, R. C. (Ed.) *Handbook of chemistry and physics*. 53. ed. Cleveland: The Chemical Rubber, 1973. p. 270-354.

HEIRINCHS, 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, p. 27-31, 1999.

HERNANDEZ, F. B. T.; LEMOS FILHO, M. A. F.; BUZETTI, S. **Software HIDRISA e o Balanço Hídrico de Ilha Solteira**. Ilha Solteira: UNESP/FEIS - Área de Hidráulica e Irrigação, 1995. 45 p. (Série Irrigação, 1).

HESTERMAN, O. B.; RUSSELLE, M. P.; SHEAFFER, C. C.; HEICHEL, G. H. Nitrogen utilization from fertilizer and legume residues in legume-corn rotations. *Agronomy Journal*, Madison, v. 79, p. 726-731, 1987.

IGUE, K. Dinâmica da matéria orgânica e seus efeitos nas propriedades do solo. In: ADUBAÇÃO Verde no Brasil. Campinas: Fundação Cargil, 1984. p. 232-267.

JANSSON, S. L.; PERSSON, J. Mineralization and immobilization of soil nitrogen. In: STEVENSON, F. J. (Ed.) *Nitrogen in agricultural soils*. Madison: ASA, 1982. p. 229-252. (Agronomy Monograph, 22).

JANZEN, H. H.; BOLE, J. B.; BIEDERBECK, O.; SLINKARD, A. E. Fate of N applied as green manure or ammonium fertilizer to soil subsequently cropped with spring wheat at three sites in western Canada. *Canadian Journal of Soil Science*, Ottawa, v. 70, p. 313-323, 1990.

JENKINSON, D. S.; FOX, R. H.; RAINER, J. H. Interactions between fertilizer nitrogen and soil nitrogen - the so-called priming effect. *Journal of Soil Science*, Oxford, v. 36, p. 425-444, 1985.

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

KARLEN, D. L.; FLANNERY, R. L.; SADLER, E. J. Aerial accumulation and partitioning of nutrients by corn. *Agronomy Journal*, Madison, v. 80, p. 232-242, 1988.

KEENEY, D. R. Nitrogen availability indices. In: PAGE, A. L.; MILLER, R. H.; KEENEY, D. R. (Ed.). *Methods of soil analysis*. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. 2. ed. Madison: ASA, 1982.

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

KLEPPER, B. Root growth and water uptake. In: STERWART, B. A.; NIELSEN, D. R., Co-ed, Irrigation of Agricultural Crops. *American Society of Agronomy*, Madison. 1990. p. 281-322.

LADD, J. N.; OADES, J. M.; AMATO, M. Distribution and recovery of nitrogen from legume residues decomposing in soils sows to wreath in the field. *Soil Biology and Biochemistry*, Oxford, v. 11, p. 251-256, 1981.

LARA CABEZAS, W. A. R.; KORNODÔRF, G. H.; MOTTA, S. A. Volatilização de N-NH₃ na cultura de 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. 481-487, 1997.

LARA CABEZAS, W. A. R.; TRIVELIN, P. C. O.; KORNODÔRF, G. H.; PEREIRA, S. Balanço da adubação nitrogenada sólida e fluida de cobertura na cultura do milho em sistema plantio direto no Triângulo Mineiro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 14, p. 363-376, 2000.

LARA CABEZAS, W. R. L.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S. C.; SANTANA, D. G. Influência da cultura antecessora e da adubação nitrogenada na produtividade de milho em sistema plantio direto e solo preparado. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 34, p. 1005-1013, 2004.

LEGG, J. O.; STANFORD, G.; BENNET, O. L. Utilization of labeled-N fertilizer by silage corn under conventional and no-till culture. *Agronomy Journal*, Madison, v. 71, p. 1009-1015, 1979.

LERA, F. L.; CANTARELLA, H.; BOLNHEZI, D. Absorção pelo milho do nitrogênio aplicado antecipado ou em cobertura em sistema de plantio direto. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS - Fertbio 2000, 24., 2000, Santa Maria. *Resumos...* Santa Maria: SBCS, 2000. 1 CD ROM.

LIANG, B. C.; MACKENZIE, A. F. Corn yield, nitrogen uptake and nitrogen use efficiency as influenced by nitrogen fertilization. *Canadian Journal of Soil Science*, Ottawa, v. 74, p. 235-240, 1994.

LIMA, M. G. *Calibração e validação do modelo cerez-maize em condições tropicais do Brasil*. 1995. 119 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1995.

LOPES, S. A.; WIETHÖLTER, S.; GUILHERME, L. R. G.; SILVA, C. A. *Sistema plantio direto: bases para o manejo da fertilidade do solo*. São Paulo: ANDA, 2004. 110 p.

MAGALHÃES, J. V. *Absorção e translocação de nitrogênio por plantas de milho (Zea mays, L.) submetidos a períodos crescentes de omissão de fósforo em solução nutritiva*. 1996. 76 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1996.

MAKKAR, H. P. S. Chemical, protein precipitation and bioassays for tannins, effects and fate of tannins, and strategies to overcome detrimental effects of feeding tannin-rich feeds. In: SEMINAR OF THE FAO-CIHEAM SUB-NETWORK ON SHEEP AND GOAT NUTRITION, 9., 2001, Hammamet, Tunisia. Vienna: FAO; IAEA, 2001.

MALAVOLTA, E. *Elementos de nutrição mineral de plantas*. São Paulo: Agronômica Ceres, 1980. 251 p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. *Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações*. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.

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

MASCARENHAS, H. A. A.; HIROCE, R.; BRAGA, N. R.; MIRANDA, M. A. C.; BULISANI, E. A.; POMMER, C. V.; SAWAZAKI, E.; GALLO, P. B.; PEREIRA, J. C. V. N. A. *Efeito residual do nitrogênio de soja na produção de milho*. 2. ed. Campinas: IAC, 1983. 24 p. (Boletim Técnico, 58).

MEISINGER, J. J.; BANDEL, V. A.; STANFORD, G.; LEGG, J. O. Nitrogen utilization of maize under minimal tillage and moldboard plow tillage: I four-year results using labeled N fertilizer an Atlantic coastal plain soil. *Agronomy Journal*, Madison, v. 77, p. 602-611, 1985.

MELO FILHO, G.A. Custos: Plantio direto x plantio convencional. *Direto no Cerrado*, Brasília, v. 5, n. 18, p. 10, 2000.

MENDONÇA, E. S.; OLIVEIRA, F. H. T. Fornecimento de nutrientes pela matéria orgânica do solo. In: SIMPÓSIO SOBRE FERTILIDADE DO SOLO NUTRIÇÃO DE PLANTAS NO SISTEMA PLANTIO DIRETO, *Anais...* Ponta Grossa: Associação dos Engenheiros Agrônomos dos Campos Gerais, 2000. p. 70-81.

MENGEL, D. B.; BARBER, S. A. Rate of nutrient uptake per unit of corn root under field conditions. *Agronomy Journal*, Madison, v. 66, p. 399-402, 1974.

MEURER, E. J. *Fundamentos em química do solo*. 2. ed. Porto Alegre: Gênese, 2004.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; CALEGARI, A. Efeito do material vegetal na acidez do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 17, p. 411-416, 1993.

MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A.; FRANCHINI, J. C. *Neutralização da acidez do solo por resíduos vegetais*. Piracicaba, 2000. p. 1-8 (Informações Agronômicas, 92).

MOHAMED, I.; JAMAL, I.; KARIMA, E. The use of ^{15}N and ^{32}P isotopes in investigation of soil fertility under different cropping systems. *Applied Radiation Isotopes*, Oxford, v. 46, p. 611-612, 1995.

MULVANEY, R. L. Nitrogen - Inorganic forms. In: KLUTE, A.; WEAVER, R. W.; MICKELSON, S. H.; SPARKS, D. L.; BARTELS, J. M. *Methods of soil analysis*. Part 3 - Chemical methods. Madison: SSSA, 1996. p. 1123 -1184. (Book Series, 5).

MURAOKA, T.; AMBROSANO, E. J.; ZAPATA, F.; BORTOLETTO, N.; MARTINS, A. L. M.; TRIVELIN, P. C. O.; BOARETTO, A. E.; SCIVITTARO, W. B. Eficiência de abonos verdes (crotalaria y mucuna) y urea, aplicadas solos o juntamente, como fuentes de N para el cultivo de arroz. *Terra*, Chapingo, v. 20, p. 17-23, 2002.

MUZILLI, O. Influência do sistema de plantio direto, comparado ao convencional, sobre a fertilidade da camada arável do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 7, p. 95-102, 1983.

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

NEPTUNE, A. M. L. Efeito de diferentes épocas e modos de aplicação do N na produção de milho, na quantidade de proteína, na eficiência do fertilizante e na diagnose foliar, utilizando o sulfato de amônio ^{15}N . *Anais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"*, Piracicaba, v. 34, p. 515-539, 1977.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. *Fósforo em solo e planta em condições tropicais*. Viçosa: UFV, 1999. 399 p.

OLIVEIRA, F. H. T.; NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V., V. H.; CANTARUTTI, V. R. B.; BARROS, N. F. Fertilidade do solo no sistema plantio direto. In: ALVAREZ V., V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R.; BARROS, N. F.; de MELLO, J. W. V.; COSTA, L. M. (Ed) *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa: SBCS, 2002. v. 2, p. 393-486.

PALM, C. A.; SANCHEZ, P. A. Nitrogen release from the leaves of some tropical legumes as affected by their lignin and polyphenolic contents. *Soil Biology and Biochemistry*, Oxford, v. 23, p. 38-88, 1991.

PEREIRA, J.; BURLE, M. L.; RESCK, D. V. S. Adubos verdes e sua utilização no cerrado. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO NO CERRADO, 1990, Goiânia. *Anais...* Campinas: Fundação Cargill, 1992. p. 140-154.

PERIN, A.; SANTOS, R. H. S.; URQUIAGA, S.; GUERRA, J. G. M.; CECON, P. R. Produção de fitomassa, acúmulo de nutrientes e fixação biológica de nitrogênio por adubos verdes em cultivo isolado e consorciado. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v. 39, p. 35-40, 2004.

PHILLIPS, R. E.; THOMAS, G. W.; FRYE, W. W.; PHILLIPS, S. H. No tillage agriculture, *Science*, Washington, v. 208, p. 1108-1113, 1980.

PIMENTEL-GOMES, F.; GARCIA, C. H. *Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais: exposição com exemplos e orientação para uso de aplicativos*. Piracicaba: FEALQ, 2002. 309 p.

POWER, J. F.; DORAN, J. W.; WILHELM, W. W. Uptake of nitrogen from soil, fertilizer and crop residues by no till corn and soybean. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v.50, p.137-142, 1986.

POWLSON, D. S.; BARRACLOUGH, D. Mineralization and assimilation in soil-plant system. In: KNOWLES, R.; BLACKBURN, T. H. (Ed.) *Nitrogen isotope techniques*. San Diego: Academic Press, 1993. p. 209-242.

POWSON, D. S.; BARRACLOUGH, D. mineralization and assimilation in soil plant system. In: KNOWLES, R.; BLACBURN, T. H. (Eds.) *Nitrogen Isotope Techniques*, San Diego, Academic Press, 1993. p. 209-242.

RAIJ, B. van. *Fertilidade do solo e adubação*. Piracicaba: POTAFOS, 1991. 343 p.

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

RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; FURLANI, A. M. C. *Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo*. 2. ed. Campinas: Instituto Agrônômico, 1996. 285 p. (Boletim Técnico, 100).

RAIJ, B. van; FEITOSA, C. T.; CANTARELLA, H.; CAMARGO, A. P.; DECHEN, A. R.; ALVES, S.; SARDI, G.; VEIGA, A. A.; CAMPANA, M. P.; PETINELLI, A.; NERY, C. A. análise de solo para discriminar resposta á adubação para a cultura do milho. *Bragantia*, Campinas, v. 40, p. 57-75, 1981.

RAMOS, M. G.; VILLATORO, M. A. A.; URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M. Quantification of the contribution of biological nitrogen fixation to tropical green manure crops and the residual benefit to a subsequent maize crop using ¹⁵N-isotope techniques: *Journal of Biotechnology*, Amsterdam, v. 91, p. 105-115, 2001.

RANDALL, G. W.; IRAGAVARAPU, T. K. Impact of long term tillage systems for continuous corn on nitrate leaching to tile drainage. *Journal of Environmental Quality*, Madison, v. 24, p. 360-366, 1995.

RAO, A. C. S.; SMITH, J. L.; PARR, J. F.; PAPENDICK, R. I. Considerations in estimating nitrogen recovery efficiency by the difference and isotopic dilution methods. *Fertilizer Research*, The Hague, v. 33, p. 209-217, 1992.

REKHI, R. S.; BAJWA, M. S. Effect of green manure on the yield, n uptake and floodwater

properties of a flooded rice, wheat rotation receiving ^{15}N urea on a highly permeable soil. *Fertilizer Research*, The Hague, v. 34, p. 15-22, 1993.

RICE, C. W.; SMITH, M. S.; BLEVINS, R. L. Soil nitrogen availability after long-term continuous no-tillage and conventional tillage corn production. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 48, p. 295-297, 1996.

ROSOLEM, C. A. **Relações solo-planta na cultura do milho**. Jaboticabal: Funep, 1995. 53 p.

SÁ, J. C. M. *Manejo da fertilidade do solo no plantio direto*. Castro: Fundação ABC, 1993. 96 p.

SÁ, J. C. M. Manejo da fertilidade do solo no plantio direto. In: SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S.; LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G.; FAQUIN, V.; FURTINI NETO, A. E.; CARVALHO, J. G. (Ed.) *Inter-relação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas*. Viçosa: SBCS; Lavras: UFLA, 1999. p. 267-319.

SÁ, J. C. M. *Manejo de nitrogênio na cultura de milho no sistema plantio direto*. Passo Fundo: Aldeia Norte, 1996. 23 p.

SÁ, J. C. M.; CERRI, C. C.; DICK, A. W.; LAL, R.; VENZKE FILHO, S. P.; PICCOLO, M. C.; FEIGL, B. E. Soil organic matter dynamics and sequestration rates for a tillage chronosquence in a Brazilian Oxisol. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, v. 65, p. 1476-1499, 2001.

SÁ, J. C. M.; CERRI, C. C.; VENZKE FILHO, S. P.; PICCOLO, M. C.; FEIGL, B. E.; FELLER, C. Palha: a base de sustentação do plantio direto. *Revista Plantio Direto*, Passo Fundo, n. 80, p. 29-32, 2004a.

SÁ, J. C. M.; VIEIRA, A. M.; BOZZA, D. L.; AHRAUS, S.; FERREIRA, A. O.; BUENO, L.; SÁ, M. F. M.; FIGUEIREDO, A. G.; SCHON, M.; NISHIKAWA, M.; OLIVEIRA, J. A.; GONÇALVES, J. G. Avaliação do desenvolvimento radicular e atributos de genótipos de milho submetidos a níveis de palha no sistema plantio direto. *Revista Plantio Direto*, Passo Fundo, n. 80, p. 46-60, 2004b.

SÁ, J., C. M. Nitrogênio: influência da rotação de culturas e resposta da cultura do milho em

solos sob plantio direto. In: CURSO SOBRE MANEJO DO SOLO NO SISTEMA PLANTIO DIRETO. Castro, 1995. *Anais...* Castro: Fundação ABC, p. 213-227.

SALET, R. L. *Dinâmica de íons na solução de um solo submetido ao sistema plantio direto*. 1994. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

SALET, R. L.; VARGAS, L. K.; ANGHINONI, I.; KOCHANN, R. A.; DENARDIN, J. E.; CONTI, E. Por que a disponibilidade de nitrogênio é menor no sistema plantio direto? In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DO SISTEMA PLANTIO DIRETO, 2., 1997, Passo Fundo. *Anais...* Passo Fundo, 1997. p. 297.

SALTON, J. C.; KICHEL, A. N. Milheto uma alternativa para cobertura do solo e alimentação animal. *Revista Plantio Direto*, Passo Fundo, n. 45, p. 41-43, 1998.

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

SANGOI, L.; ERNANI, P. R.; ALMEDA, M. L.; GRACIETTI, M. A.; BIANCHET, P. O método de preparo do solo altera a época preferencial de aplicação de nitrogênio na cultura do milho? In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 24., 2002, Florianópolis. *Resumos...* Sete Lagoas: ABMS; Embrapa Milho e Sorgo; Epagri, 2002. 1 CD-ROM.

SANTOS, H. P.; PEREIRA, L. R. Efeito de sistemas de sucessão de cultura de inverno sobre algumas características agronômicas de milho em plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 29, p. 1691-1694, 1994.

SAS INSTITUTE. *The SAS-System for Windows release 6.11* (software). Cary: SAS Institute Inc., 1996.

SCHARADER, L. E.; DOMSKA, D.; JUNG, P. V.; PETERSON, L. A. Uptake and assimilation of ammonium-N and nitrate-N and their influence on the growth of corn (*Zea mays*, L). *Agronomy Journal*, Madison, v. 65, p. 690-695, 1972.

SCHLEGEL, A. J.; DHUYVETTER, K. C.; HAVLIN, J. L. Economic and environmental impacts of long-term nitrogen and phosphorous fertilization. *Journal of Production*

Agriculture, Madison, v. 9, p. 114-118, 1996.

SCHREIBER, H.A.; STANBERRY, C.O.; TUCKER, H. Irrigation and nitrogen effects on sweet corn row number at various growth stages. **Science**, Washington, v.135, p.135-136, 1988.

SCIVITTARO, W. B.; MURAOKA, T.; BOARETTO, A. E.; TRIVELIN, P. C. O. Utilização de nitrogênio de adubos verdes e mineral pelo milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 917-926, 2000.

SCIVITTARO, W. B.; MURAOKA, T.; BOARETTO, A. E.; TRIVELIN, P. C. O. Transformações do nitrogênio proveniente de mucuna-preta e uréia utilizados como adubo na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, p. 1427-1433, 2003.

SILVA, E. C.; BUZETTI, S.; GUIMARÃES, G. L.; LAZARINI, E.; DIAS, N. S. Formas de nitrogênio no solo e manejo da adubação nitrogenada no milho em plantio direto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32., 2003, Goiânia. **Resumos...** Goiânia: SBEA, 2003. 1 CD ROM.

SILVA, E. C.; FERREIRA, S. M.; SILVA, G. P.; ASSIS, R. L. Efeito da época e forma de aplicação da adubação nitrogenada na cultura do milho no sistema de plantio direto no cerrado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., 1997, Rio de Janeiro. **Resumos...** Rio de Janeiro: SBSCS, 1997.

SILVA, E. C.; SILVA, S. C.; BUZETTI, S.; TARSITANO, M. A. A.; LAZARINI, E. Análise econômica do estudo de níveis e épocas de aplicação de nitrogênio na cultura de milho no sistema plantio direto em solo de cerrados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ADMINISTRAÇÃO RURAL, 4., 2001, Goiânia. **Resumos...** Goiânia: ABDR, 2001. 1 CD-ROM.

SIMS, A. L.; SCHEPERS, J. S.; OLSON, R. A.; POWER, J. F. Irrigated corn yield and nitrogen accumulation response in a comparison of no-till and conventional till: tillage and surface-residue variables. **Agronomy Journal**, Madison, v. 90, p. 630-637, 1998.

SIMS, J. T.; VASILAS, B. L.; GARTLEY, K. L.; MILLIKEN, B.; GREEN, V. Evaluation of soil and plant nitrogen tests for maize on manured soils of the Atlantic Coastal-Plain.

Agronomy Journal, Madison, v. 87; p. 213-222, 1995.

SIX, J.; FELLER, C.; DENEFF, K.; OGLE, S. M.; SÁ, J. C. M.; ALBRECHT, A. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils, effect no-tillage. *Agronomie*, Paris, v. 22, p. 755-775, 2002

SMITH, C. J.; CHALK, P. M.; CRAWFORD, D. M.; WOOD, J. T. Estimating gross nitrogen mineralization and immobilization rates in anaerobic and aerobic soil suspensions. *Soil Science Society America Journal*, Madison, v. 8, p. 1652-1660, 1994.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. *Cerrado: correção do solo e adubação*. 2. ed. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2004. 416 p.

SOUZA, P. M.; BRAGA, M. J. Aspectos econômicos da produção e comercialização do milho no Brasil. In: GALVÃO, J. C. C.; MIRANDA, G. V. *Tecnologia de produção de milho*. Viçosa: UFV, 2004, p. 13-53.

STEVENSON, F. J. Origin and distribution of nitrogen in soil. In: STEVENSON, F. J. Ed. *Nitrogen in agricultural soil*. Madison: ASA, 1982. p. 1-42 (Agronomy Monograph, 22).

TA, C. T.; WEILAND, R. T. Nitrogen partitioning in maize during ear development. *Crop Science*, Madison, v. 32, p. 443-451, 1992.

TEIXEIRA, L. A. J.; TESTA, V. M.; MIELNICZUCK, J. Nitrogênio do solo, nutrição e rendimento do milho afetado por sistema de culturas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 18, p. 207-214, 1994.

TIMMONS, D. R.; BAKER, J. K. Fertilizer management effect on recovery of labeled nitrogen by continuous no-till. *Agronomy Journal*, Madison, v. 84, p. 490-496, 1992.

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

TOBERT, H. A.; MULVANEY, R. M.; HEUVEL, V.; HOEFT, R. G. Soil type and moisture regime effects on fertilizer efficiency calculation methods in a nitrogen-15 tracer study, *Agronomy Journal*, Madison, v. 84, p. 66-70, 1992.

TSAI, C. Y.; DWEIKAT, I.; HUBER, D. M.; WARREN, H. L. Interrelationship of nitrogen nutrition with maize (*Zea mays*) grain yield, nitrogen use efficiency and grain quality. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, London, v. 58, p. 1-8, 1992.

TUNDISI, J. G. *Água no Século XXI: Enfrentando a Escassez*. São Carlos: RiMa IIE, 2003. 248p.

UHART, S. A.; ANDRADE, F. H. Deficiency in maize: I. Effects on crop growth, development, dry matter partitioning, and kernel set. *Crop Science*, Madison, v. 35, p. 1376-1383, 1995.

ULGER, A. C.; BECKER, A. C.; KANT, G. Response of various maize inbreed line and hybrids to increasing rates of nitrogen fertilizer. *Journal of Agronomy and Crop Science*, v. 159, p. 157-163, 1995.

ULHOA, A. M. C.; LIMBARDI, L. P.; REICHARDT, K. *Utilização do nitrogênio por dois híbridos de milho*. Campinas: Fundação Cargill, 1982. 66 p.

URQUIAGA, S. C. **Dinâmica do nitrogênio no sistema solo-planta na cultura do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), cultivar carioca**. 1982. 118 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1982.

VARVEL, G. E.; SCHPERS, J. S.; FRANCIS, D. D. Ability for in-season correction of nitrogen deficiency in corn using chlorophyll meters. *Soil Science Society of America Journal*, v. 61, p. 1233-1239, 1997.

VICTÓRIA, R. L.; PICCOLO, M. C.; VARGAS, A. A. T. O ciclo do nitrogênio. In: CARDOSO, E. J. B. N; TSAI, S. M.; NEVES, M. C. P. *Microbiologia do solo*. Campinas: SBSCS, 1992. p. 105-119.

VILLAS BÔAS, R. L. *Alternativas para aumento da recuperação do nitrogênio da uréia pelo milho (*Zea mays* L.)*. 1990. 78 f. Dissertação de (Mestrado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.

VILLAS BÔAS, R. L.; BOARETTO, A. E.; BÜLL, L. T.; GUERRINI, I. A. Parcelamento e largura da faixa de aplicação da uréia na recuperação do nitrogênio pela planta de milho. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 56, p. 1177-1184, 1999.

VITTI, G. C.; FAVARIN, J. L.; REZENDE, L. O.; TREVISAN, N. *Manejo do nitrogênio em diversos sistemas de produção*. Piracicaba: SERRANA, 1999. 36 p.

WIETHÖLTER, S. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto: Experiência nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, Fertbio - 2000, 24., 2000, Santa Maria. Santa Maria: SBCS, 2000. p. 35. 1 CD-ROM.

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, p. 1191-1197, 1997.

YAMADA, T. *Adubação nitrogenada do milho*: como melhorar a eficiência? Piracicaba: POTAFOS, 1995. 3 p. (Informações Agronômicas, 71).

YAMADA, T. *Adubação nitrogenada do milho*: quanto, como e quando aplicar. Piracicaba: POTAFOS, 1996. 5 p. (Informações Agronômicas, 74).

YAMADA, T. *Nitrogênio e potássio na cultura do milho*. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 16p. (Informações Agronômicas, 78).

APÊNDICE

APÊNDICE A – Dados de precipitação pluviométrica e de temperatura média ocorridos durante a condução do experimento, anos agrícolas 2002/03(1), 2003/04 (2) e 2003/04 (3).