

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JULIO DE MESQUISTA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**MANEJO DA ADUBAÇÃO NITROGENADA E UTILIZAÇÃO DO
NITROGÊNIO (^{15}N) PELO MILHO SOB PLANTIO DIRETO COM
DIFERENTES PLANTAS DE ENTRESSAFRA**

André Mendes Coutinho Neto

Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Corá

Prof. Dr. Takashi Muraoka

Dissertação apresentada à Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, Câmpus de Jaboticabal, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre em Agronomia (Ciência do Solo).

JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL

JULHO DE 2011

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

ANDRÉ MENDES COUTINHO NETO – Nascido em 09 de Janeiro de 1982, na cidade de Ribeirão Preto – SP, formado Engenheiro Agrônomo em 2008, na Faculdade de Agronomia “Francisco Maeda” de Ituverava – SP. No ano seguinte, em março de 2009, iniciou o curso de Mestrado em Agronomia, no Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo na Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal – SP. Foi bolsista CAPES no período compreendido entre março e julho de 2009 e bolsista do CNPq (Edital MCT/CNPq número 70/2008) durante o período de outubro de 2009 até a presente data. No dia 28 de julho de 2011 obteve o título de Mestre em Agronomia.

“Ser feliz é encontrar força no perdão,
esperanças nas batalhas, segurança no
palco do medo, amor nos desencontros.
É agradecer a Deus a cada minuto pelo
milagre da vida”.

Fernando Pessoa

Agradeço aos meus pais Edson Luiz Mendes Coutinho e Ana Maria Piccolo Mendes Coutinho, pelos ensinamentos, amor e incentivo.

Dedico

AGRADECIMENTOS

- A Deus, pela fé, amor, proteção, saúde e sabedoria para que pudesse alcançar mais um objetivo.
- Ao meu orientador Prof. Dr. José Eduardo Corá, pela orientação, pelo apoio e confiança, mas, sobretudo pela distinta amizade.
- Ao meu co-orientador Prof. Dr. Takashi Muraoka, pela orientação e facilidades oferecidas no CENA/USP – Piracicaba - SP.
- A minha mãe Ana Maria Piccolo Mendes Coutinho, pela vida, ensinamentos, educação e incentivo.
- Ao meu pai e Professor Edson Luiz Mendes Coutinho pelos ensinamentos de vida.
- A minha irmã Erika Mendes Coutinho, pelo apoio, principalmente nas horas difíceis.
- A minha avó Diva Piccolo, pelas orações e torcida pelo meu êxito.
- A minha namorada Mariza Plácido por ser minha companheira inseparável, pela força nos momentos difíceis, por compartilhar as minhas vitórias, pelo amor e carinho e pela compreensão da minha ausência nos últimos meses.
- A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro ao Projeto.
- A CAPES e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão de bolsa de estudo.
- Aos funcionários do Departamento Solos e Adubos Cláudia Campos Dela Marta e Dejair Lúcio da Silva, pelo auxílio na realização deste trabalho.
- Ao Prof. Dr. José Carlos Barbosa, pela ajuda nas análises estatísticas.
- A área de Agrometeorologia do Departamento de Ciências Exatas por ter cedido os dados meteorológicos.
- Ao Doutorando Valdeci Orioli Júnior, pela colaboração na condução do experimento.
- A Profa. Dra. Carolina Fernandes, ao Prof. Dr. Domingos Fornasieri Filho, ao Prof. Dr. Francisco Maximino Fernandes e ao Prof. Dr. José Carlos Barbosa, pelas sugestões apresentadas no Exame Geral de Qualificação e na Defesa da Dissertação.

- Ao Marcelo Scatolin e aos funcionários da Fazenda de Ensino, Pesquisa e Produção, pelo auxílio durante a condução do experimento.
- A UNESP - Campus de Jaboticabal pela acolhida.

SUMÁRIO

	Página
RESUMO.....	ix
SUMMARY	x
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
3. MATERIAL E MÉTODOS	8
3.1. Breve Histórico da área experimental	8
3.2. Experimento 1: Avaliação da produção de grãos, matéria seca e concentração de nitrogênio na planta e eficiência de utilização do N da uréia (^{15}N) pelo milho.....	9
3.3. Experimento 2: Avaliação do aproveitamento do nitrogênio (^{15}N) do milho e da soja pelo milho cultivado em sucessão.....	13
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	17
4.1. Produção de milho, matéria seca das raízes e concentrações de nitrogênio na planta.....	17
4.2. Recuperação do nitrogênio da uréia no solo, na parte aérea e raiz do milho....	29
4.3. Aproveitamento pelo milho do nitrogênio das plantas de entressafra.....	34
5. CONCLUSÕES.....	40
6. REFERÊNCIAS.....	41

MANEJO DA ADUBAÇÃO NITROGENADA E UTILIZAÇÃO DO NITROGÊNIO (^{15}N) PELO MILHO SOB PLANTIO DIRETO COM DIFERENTES PLANTAS DE ENTRESSAFRA

RESUMO - O aproveitamento do N pelo milho cultivado em sistema de plantio direto (SPD) é dependente da qualidade dos resíduos da cultura antecessora, que por sua vez podem promover diferenças na eficiência da adubação nitrogenada em função da época em que esta é realizada. Assim, objetivou-se avaliar as estratégias de aplicação do N e das plantas de entressafra na eficiência de utilização do N, no aproveitamento pelo milho do N das plantas de entressafra, previamente marcadas com ^{15}N e na produção de milho cultivado em um solo argiloso, sob SPD (18 anos). O delineamento experimental utilizado foi em parcelas subdivididas com cinco tratamentos principais (estratégias de aplicação de N), dois tratamentos secundários (culturas de entressafra) e seis repetições dispostas em blocos casualizados. As estratégias de adubação (dose: 150 kg ha^{-1} de N - uréia) foram: 0 - 0 - 0; 20 - 80 - 50; 50 - 80 - 20; 150 - 0 - 0 e 0 - 80 - 70, sendo o primeiro número correspondente à dose de N (kg ha^{-1}) aplicada em pré-semeadura e o segundo e terceiro números corresponderam às doses aplicadas quando as plantas de milho estavam nos estádios V4 e V8. As culturas de entressafra foram o milho e a soja. A aplicação de N aumentou a produtividade de grãos de milho, sendo esse efeito mais pronunciado quando a cultura de entressafra era a soja. Em termos de produção de grãos, as estratégias de aplicação de N foram equivalentes. O aproveitamento pelo milho, do N das plantas de entressafra, foi baixo, sendo que a maior parte desse nutriente permaneceu no solo. A maior eficiência de utilização do fertilizante nitrogenado pelo milho foi observada quando a dose total de N foi aplicada em pré-semeadura. O N não recuperado da uréia no sistema solo-planta foi, em média, de 46%.

Palavras-Chave: adubo verde, fertilizante ^{15}N , parcelamento de nitrogênio, solo tropical, uréia, *Zea mays*

NITROGEN FERTILIZATION MANAGEMENT AND NITROGEN (^{15}N) UTILIZATION BY MAIZE CROP UNDER NO-TILLAGE WITH DIFFERENT WINTER CROPS

ABSTRACT- The utilization of N by maize grown on a no-tillage system (NT) depends on the quality of the residue of the crop winter, which may cause differences on the nitrogen fertilizer efficiency due to the time in which it is performed. Thus, this study aimed the evaluation of N application strategies and winter crops on N fertilizer use efficiency (NFUE), and the maize utilization of N from soybean and maize, both with ^{15}N labeled, and the grain yield of maize grown in a clayey soil (Typic Acrustox), under NTS (18 years). The experimental design was a split-plot, with six replications in randomized complete blocks, where the main plot was the N application strategies and the split-plots was the winter crops (soybean and maize). The N application strategies (rate: 150 kg ha^{-1} of N - urea) were: (0 - 0 - 0), (20 - 80 - 50), (50 - 80 - 20), (150 - 0 - 0) and (0 - 80 - 70), where the first number corresponds to the N rate applied on preplanting and the second and third ones correspond to the rate applied on top dressing when the plant presented, respectively, 4-leaf stage and 8- leaf stage. The N application increased the productivity of maize grains; these effects were more expressive when the crop winter was soybean. With regard to the grain production, the N application strategies were equivalent, inexistent significant differences among them. The N utilization by maize of the crop winter was low, and great part of such nutrient remained in the soil. The greatest Nitrogen Fertilizer Use Efficiency (NFUE) by maize was verified when the total N rate was applied on preplanting (NFUE = 38%). Regardless the N application strategy and the winter crop, the non recovered N (NRN) from the applied urea on the soil-plant system, was on average of 46% (69 kg ha^{-1} of N).

Keywords: Green manure, ^{15}N fertilizer, N split-application, tropical soil, urea, *Zea mays*

1. INTRODUÇÃO

Existe a necessidade de pesquisas sobre o manejo da adubação nitrogenada no sistema de plantio direto (SPD) nas regiões Norte/Nordeste do estado de São Paulo, uma vez que não parece ser a melhor alternativa, importar os resultados de pesquisas obtidos em condições edafoclimáticas completamente diferentes.

De maneira análoga ao Centro-Oeste do País, essas regiões apresentam inverno seco e relativamente quente, condições bem diferentes do Sul do País, onde muitas pesquisas com o SPD foram desenvolvidas. Em função disto, a produção de fitomassa na entressafra é pequena, assim como a taxa de mineralização do N orgânico do solo e dos resíduos vegetais, gerando em algumas situações, desalento ao agricultor na adoção do sistema para culturas anuais. Na entressafra é comum o agricultor deixar o solo em pousio.

Outro fator que contribui para o desestímulo, é a recomendação de plantas de cobertura que não geram renda, principalmente naquelas áreas onde o agricultor é mais técnico e apresenta sistema de irrigação. Nos trabalhos realizados até o momento, para avaliar o desempenho agrônômico da cultura do milho em diferentes sistemas de manejo, foram utilizadas espécies de cobertura de solo no outono/inverno, para a produção exclusiva de palha. Nesse período, nessas áreas irrigadas, a introdução de espécies com dupla finalidade (produção de palha e grãos) pode ser uma estratégia interessante, para se aumentar a rentabilidade do sistema produtivo.

A introdução de uma leguminosa no sistema pode ajudar a reduzir o custo de produção, através do fornecimento de N para o milho cultivado em sucessão.

Um sistema agrícola sustentável requer que as reservas de nutrientes e matéria orgânica do solo sejam preservadas ao longo dos anos (URQUIAGA et al., 2005), sendo que a manutenção desses estoques nessa região, dependerá das culturas utilizadas na rotação e da eficiência do uso de fertilizantes nitrogenados pela cultura do milho, ou seja, do balanço de N no sistema solo-planta. Segundo ALVES et al. (2006), a introdução da soja na rotação de culturas pode resultar em balanços mais positivos de N, reduzindo a necessidade de fertilizantes nitrogenados para a cultura sucessora.

Por outro lado, apesar de serem pequenas as exigências nutricionais nos estádios iniciais do milho, altas concentrações de N, na zona radicular, podem ser benéficas na promoção de um maior desenvolvimento da planta (MENGEL & BARBER, 1974; VARVEL et al., 1997). Nessa fase inicial, ocorrem as diferenciações das partes da planta e a ocorrência de deficiência de N reduz o número de óvulos nos primórdios da espiga (SCHREIBER et al., 1988). Como no sistema irrigado ocorre uma maior produção de matéria seca (palhada), poderá ocorrer carência de N nos estádios iniciais da cultura de milho (primavera/verão), causada pela imobilização do N. Dessa maneira, justificam-se pesquisas sobre o manejo da adubação nitrogenada (aumento de doses de N na semeadura, antecipação da aplicação de N, época de parcelamento, etc). Acrescenta-se ainda, que a maioria das pesquisas fora da região Sul do Brasil, foi realizada em áreas em que o SPD não estava consolidado.

Adicionalmente, a aplicação antecipada de fertilizantes pode ser uma alternativa para tornar mais rápida a operação de semeadura do milho, flexibilizando o cronograma operacional da propriedade.

O uso de uma fonte marcada com ^{15}N constitui-se no método que permite quantificar com maior precisão a eficiência de utilização deste nutriente e a fonte originária, seja solo, fertilizantes orgânicos e inorgânicos, permitindo com maior segurança a tomada de decisão quanto ao seu manejo.

Os objetivos principais do experimento foram avaliar a influência de diferentes estratégias de aplicação do nitrogênio, na eficiência de utilização desse nutriente, empregando-se a uréia marcada com ^{15}N , e na produção de grãos de milho cultivado em sucessão à soja ou milho. Procurou-se ainda, avaliar aproveitamento do N do milho e da soja, marcados com ^{15}N , pelo milho cultivado em sucessão na primavera/verão.

2. REVISÃO DE LITERATURA

O nitrogênio (N) é constituinte de vários compostos nas plantas, destacando-se os aminoácidos, ácidos nucléicos e clorofila. Dessa maneira, as principais reações bioquímicas em plantas e microrganismos envolvem a presença de N, o que o torna um dos elementos absorvidos em maiores quantidades pelas plantas cultivadas (CANTARELLA, 2007).

Vários trabalhos têm demonstrado que para a cultura do milho, a adubação nitrogenada é um dos fatores de produção mais importante na busca de aumentos na produtividade de grãos, embora, constitua-se também, no fator que mais onera o custo de produção da cultura (AMADO et al., 2002). Para se obter altas produtividades, entretanto, é necessário o aporte de grandes quantidades de N, pois os solos, em geral, não atendem a demanda da cultura por esse nutriente nos diversos estádios de desenvolvimento. Destaca-se, entretanto, que devido à dinâmica do N no sistema solo-planta, o aproveitamento pelo milho do N fornecido na forma de fertilizante é baixa, conforme dados obtidos utilizando fertilizantes marcados com ^{15}N . Raramente a recuperação do N fertilizante excede 60% do N aplicado (SCIVITTARO et al., 2000; LARA CABEZAS et al., 2005; ALVES et al., 2006; GAVA et al., 2006; SILVA et al., 2006a; DUETE et al., 2008). Adicionalmente, entre outros fatores, a eficiência de utilização do N é variável com a dose empregada e o espaçamento, sendo menor na presença das doses mais elevadas e aumenta com a redução do espaçamento entre plantas (BARBIERI et al., 2008).

A semeadura direta ganhou nos últimos 15 anos espaço significativo no País, por apresentar, entre outros benefícios, uma redução nos custos pela diminuição das operações mecânicas do solo (DERPSCH & BENITES, 2003) e pelo grande potencial em reduzir a erosão (ALVES et al., 2006). O sistema fundamenta-se na produção de uma grande quantidade de massa vegetal para cobertura do solo, e nesse sentido, é muito importante para o sucesso da semeadura direta o sistema de rotação de culturas (SILVA et al., 2008b).

Em função das diferentes regiões brasileiras, são bastante variáveis as espécies que são utilizadas como cobertura de solo na entressafra ou inverno, em antecedência ao cultivo de milho.

A rápida degradação da palha em sistema plantio direto na região Sudeste e Centro-Oeste do Brasil, decorrente das altas temperaturas têm levado, preferencialmente, à utilização de gramíneas como plantas de cobertura. Acrescenta-se ainda, que as gramíneas apresentam uma maior resistência ao déficit hídrico, com maior produção de biomassa e menor custo de sementes (SILVA et al., 2006b). Com essa opção tem-se uma proteção física do solo por um período maior, mas por outro lado, pode ocorrer uma redução na absorção de N no início do ciclo da cultura de verão, em função da elevada relação carbono/nitrogênio (C:N) da palhada (STRIEDER et al., 2006). Isto ocorre em razão da imobilização temporária de N, em função da maior oferta de carbono ao sistema, o que pode contribuir para uma redução na produtividade de milho (CERETTA et al., 2002).

Numa tentativa de amenizar essa situação, outras culturas, especialmente leguminosas, são utilizadas, apesar de que, quando associadas a altas temperaturas e umidade, no verão, decompõem-se rapidamente principalmente em função da baixa relação C:N. Deve-se destacar, entretanto, que além de propiciarem alguma cobertura ao solo, apresentam, respectivamente, potencial de fixação biológica do N₂ atmosférico e alta capacidade de reciclagem de N de camadas mais profundas para a superfície do solo (STRIEDER et al, 2006).

Vários trabalhos têm demonstrado, que devido às características e a decomposição mais rápida dos resíduos dessas espécies, pode ocorrer um maior aproveitamento do N, contribuindo para uma redução no requerimento externo deste nutriente para o milho em sucessão (AITA et al., 2001; VARVEL & WILHELM, 2003; LARA CABEZAS et al., 2004; SILVA et al., 2006 b; ANDRIOLI et al., 2008; SILVA et al., 2008a; STANGER & LAUER, 2008; ZOTARELLI et al, 2009). É comum em diferentes regiões do País, observar-se incrementos significativos na produtividade do milho cultivado no SPD, após alguma leguminosa (SILVA et al., 2006a; ANDRIOLI et al., 2008; SILVA et al., 2008 b).

Várias tentativas têm sido realizadas para determinar a contribuição do N da leguminosa para o milho em sucessão.

Existe, entretanto, discrepâncias em função das diferentes técnicas empregadas. Os métodos mais utilizados são o VRF (“Valor de reposição fertilizante”) e da diluição isotópica (^{15}N). BULLOCK (1992) indicou que a metodologia do VRF tem provavelmente superestimado a quantidade de N suprida pela leguminosa. DING et al. (1998) verificaram que a soja supriu 30 kg ha^{-1} de N para o milho em sucessão, enquanto que, BUNDY et al. (1993) não observaram consistência na quantidade de N fornecida pela soja ao milho.

Outro problema com a técnica VRF no tocante a quantidade de N fornecida, é a cultura utilizada em sucessão à leguminosa. Assim, BLEVINS et al. (1990) relataram que as leguminosas forneceram 65 a 75 kg ha^{-1} de N para o milho e 125 a 135 kg ha^{-1} de N para o sorgo. VARVEL & WILHELM (2003) relataram que o VRF pode adquirir maior confiabilidade, quando se utilizam dados de experimentos de longa duração. Assim, os autores, com base em experimentos de 10 e 20 anos e empregando a técnica do VRF, observaram que o milho obteve aproximadamente da cultura da soja $65 \text{ kg de N ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

Vários pesquisadores, utilizando a metodologia do ^{15}N , verificaram que normalmente a eficiência das leguminosas como fonte de N para as culturas tem sido baixa, raramente ultrapassando 20-25% do N da leguminosa (HARRIS & HESTERMAN, 1990 e SCIVITTARO et al., 2003). SILVA et al. (2006 b), utilizando a mesma técnica, verificaram que a crotalária, na média de dois anos agrícolas, proporcionou ao milho cultivado sem a aplicação de N, um efeito equivalente à aplicação de 56 e 73 kg ha^{-1} de N-uréia comparado ao milho cultivado sobre solo em pousio e em sucessão ao milheto. Esta baixa recuperação do N, segundo SILVA et al. (2008a), é um indicativo da decomposição incompleta dos resíduos vegetais durante o ciclo da cultura em sucessão, ou pode ter ocorrido ainda, que parte do N mineralizado ter interagido com o N do solo, passando para formas orgânicas, como relatado por SCIVITTARO et al. (2000).

A época de aplicação de N para a cultura do milho pode variar, sendo a recomendação mais comum, a aplicação de uma pequena parte do N na semeadura e o restante em cobertura.

O parcelamento da adubação nitrogenada deve-se a preocupação com as perdas de N por lixiviação. Nesse sentido, CAMARGO (1989) e COELHO et al. (1991) quantificaram perdas ao redor de 80 kg ha^{-1} de N, embora, a maior parte do N lixiviado tenha provindo da mineralização da matéria orgânica do solo e não do fertilizante aplicado.

A época de aplicação do fertilizante nitrogenado pode ter grande influência no aproveitamento deste nutriente pelo milho. No entanto, não tem havido concordância sobre qual a melhor época de aplicação de N no SPD.

Pesquisas têm sido desenvolvidas, principalmente na região Sul do País, onde a produção de palha no SSD é elevada, propondo alterações drásticas no manejo da adubação nitrogenada. A antecipação da cobertura nitrogenada, destinada à cultura do milho, aplicada na semeadura da planta de cobertura (PAULETTI & COSTA, 2000) ou em pré-semeadura do milho (BASSO & CERETTA, 2000; MAI et al., 2003; LARA CABEZAS et al., 2004 e 2005; PÖTTKER & WIETHÖLTER, 2004) tem sido estudada, com o objetivo principal de reduzir a competição entre a cultura do milho e o solo (imobilização) pelo N aplicado no momento da semeadura.

Não foi observada diferença significativa na produtividade de grãos de milho entre a aplicação de N em pré-semeadura e cobertura (PÖTTKER & WIETHÖLTER, 2004; LARA CABEZAS et al., 2005; LARA CABEZAS & COUTO, 2007; BERTOLINI et al., 2008), porém em anos de elevada precipitação pluvial, no período logo após a aplicação do N em pré-semeadura, verificou-se redução na produtividade do milho (BASSO & CERETTA, 2000; PÖTTKER & WIETHÖLTER, 2004; CANTARELLA et al., 2005; SILVA et al., 2005 b).

LANGE et al. (2008) em experimento realizado num solo argiloso em Minas Gerais, com histórico de oito anos de SPD, avaliando a influência das épocas de parcelamento (pré-semeadura; poucos dias antes da semeadura e cobertura nos estádios de quatro a cinco folhas e/ou sete a oito folhas) do N suplementar à

semeadura, também não observaram alterações significativas na produtividade de grãos de milho. Utilizando a técnica da diluição isotópica (^{15}N), os autores verificaram que a recuperação do N pelo milho foi superior quando o N foi aplicado em cobertura, não havendo, porém, melhoria na recuperação do N do fertilizante com duas coberturas. Por outro lado, SILVA et al. (2005a), em experimento conduzido em área de SPD recém instalado, concluíram que a melhor estratégia de aplicação de N era metade da dose na semeadura e metade no estágio de 4 a 6 folhas.

A antecipação da adubação nitrogenada na cultura do milho é preocupante devido à impossibilidade de prever a precipitação pluvial futura. Questiona-se também, se o argumento utilizado no Sul do País (imobilização do N) é válido para a região Sudeste e Centro-Oeste do Brasil.

Neste sentido, LARA CABEZAS & COUTO (2007) conduziram experimento em Uberlândia - MG, num sistema sem cobertura de solo consolidada, com o objetivo de quantificar o N dos fertilizantes (uréia e sulfato de amônio) imobilizado no solo (^{15}N orgânico) e o N recuperado na planta nos estádios de 4-5 folhas, 11-12 folhas, florescimento e colheita. Os autores observaram que a escassa contribuição da aveia preta em produção de massa de matéria seca (cobertura morta) mostrou que a imobilização decresceu rapidamente logo após a aplicação das fontes de N. O restrito fornecimento de C como fonte energética para a biomassa de solo deve ter afetado a imobilização de N fertilizante. Os autores observaram ainda, que aos 40 dias após a aplicação dos fertilizantes, ambas as fontes apresentavam valores inferiores a 20 kg/ha de N imobilizado no solo proveniente do fertilizante (Nispf), inferior a 25% do N aplicado, mostrando que a falta de cobertura não beneficiou a retenção temporária de N fertilizante na subsuperfície de solo, para a sua posterior transferência à cultura instalada. Os autores relataram ainda que a melhoria na retenção do N aplicado passa por uma cobertura de solo mais adensada, para favorecer o processo de imobilização e consolidar o conceito de adubação de sistema, com posterior aproveitamento na cultura em sucessão.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Breve histórico da área experimental

O trabalho foi conduzido na Fazenda de Ensino, Pesquisa e Produção da UNESP - Campus de Jaboticabal – SP, localizada a 21° 14' 05" sul, na longitude de 48° 17' 09" oeste, a uma altitude de 613 m, com clima, segundo classificação de Köppen, Aw (clima megatérmico). O solo do local foi classificado, utilizando-se os critérios de EMBRAPA (2006), como Latossolo Vermelho eutroférico argiloso.

A área apresenta um histórico de plantio direto desde 1990, sendo utilizado o milho como cultura de verão, semeado normalmente na segunda quinzena de novembro de cada ano. Até 1998 as plantas de cobertura foram as de vegetação espontânea. A partir desse ano, empregaram-se como plantas de entressafra o milho e a soja, ambas sob irrigação suplementar por aspersão. A semeadura dessas culturas foi realizada em abril/maio de cada ano.

Os tratamentos referentes às estratégias de aplicação de N foram estabelecidos em 10/2003, sendo o nitrogênio na dose total de 150 kg ha⁻¹ de N, na forma de uréia, aplicado a lanço, superficialmente em área total.

Nos anos de 2003 e 2007, antes da semeadura e após o dessecamento das plantas de entressafra, respectivamente, foi aplicado superficialmente 2,0 e 1,5 Mg ha⁻¹ de calcário (PRNT = 90%; MgO = 9%; CaO = 45%).

Em setembro/2008 foi realizada amostragem de solo, estando os principais atributos químicos do solo, nas camadas de 0 - 0,05, 0,05 - 0,10, 0,10 - 0,20 e 0,20 - 0,40 m, apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Atributos químicos do solo até a profundidade de 0,40 m.

Profund.	pH	MO	P (resina)	K	Ca	Mg	H+Al	CTC	V
m	(CaCl ₂)	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	-----	mmmol _c dm ⁻³	-----	-----	-----	%
0 - 0,05	6,1	41	101	5,4	77	30	22	134,4	84
0,05 - 0,10	5,9	31	96	3,8	65	20	25	113,8	78
0,10 - 0,20	5,8	28	86	2,9	57	20	25	104,9	76
0,20 - 0,40	5,9	21	21	2,1	42	15	18	77,1	77

3.2. **Experimento 1: Avaliação da produção de grãos, matéria seca e concentração de nitrogênio na planta e eficiência de utilização do N da uréia (^{15}N) pelo milho**

O delineamento experimental utilizado foi em parcelas subdivididas com cinco tratamentos principais (estratégias de aplicação de N na cultura do milho cultivada na primavera/verão - Tabela 2), dois tratamentos secundários (culturas de entressafra: milho e a soja) e seis repetições dispostas em blocos casualizados.

Tabela 2. Estratégias de aplicação do nitrogênio na cultura do milho (cultura de primavera/verão).

Causa de variação	Pré-semeadura*	Cobertura	
		4 folhas (V4)	8 folhas (V8)
	----- Dose de nitrogênio (kg ha^{-1}) -----		
Testemunha	0	0	0
T ₁	20	80	50
T ₂	50	80	20
T ₃	150	0	0
T ₄	0	80	70

* da cultura do milho (primavera/verão)

As parcelas apresentavam uma área total de $86,4 \text{ m}^2$ ($14,4 \times 6,0 \text{ m}$) e estavam separadas por carreadores de $1,0 \text{ m}$; as subparcelas eram constituídas de uma área total de $43,2 \text{ m}^2$ ($7,2 \times 6,0 \text{ m}$), sendo utilizada para avaliações a área útil de 27 m^2 (seis linhas de milho espaçadas de $0,90 \text{ m}$, com comprimento de $5,0 \text{ m}$).

A semeadura das plantas de milho e soja de entressafra foi realizada em 14/4/2008, sendo o milho (híbrido Maximus) cultivado no espaçamento entrelinhas de $0,90 \text{ m}$, com população final de 55.000 plantas/ha; a soja (cultivar Conquista) foi cultivada no espaçamento entrelinhas de $0,45 \text{ m}$, visando uma população final de 500.000 plantas/ha. As culturas foram mantidas sob irrigação suplementar por aspersão.

Com a leguminosa no estágio de frutificação plena (R_4) e a gramínea no estágio R_2 (grão conhecido como “bolha d’água”) efetuou-se amostragem de 15 plantas de milho e 30 plantas de soja para avaliar a quantidade de matéria seca produzida. As plantas no campo, cortadas entre 3 a 5 cm do solo, foram trazidas para laboratório, picadas, lavadas e colocadas para secar em estufa de circulação forçada a 65 - 70°C, visando a determinação da massa seca e das concentrações de N. Após a pesagem, os dados foram transformados em kg ha^{-1} de massa seca, correspondendo às produções (parte aérea) de soja e de milho, respectivamente de 4.564 e 8.954 kg ha^{-1} . As concentrações de N na soja e no milho foram, respectivamente, 22 e 9 g kg^{-1} de N.

Em 23/8/2008 os restos culturais foram triturados com o equipamento triton, para distribuir e uniformizar a cobertura vegetal sobre o solo.

A aplicação em pré-semeadura da uréia (a lanço, superficialmente em área total) foi realizada em 4/11/2008. Aproximadamente uma semana antes da semeadura do milho, foram aplicados os herbicidas Glyphosate e 2,4 D, nas dosagens de 1100 e 650 g i.a. ha^{-1} , respectivamente. A semeadura do milho (cultura de primavera/verão) foi realizada em 14/11/2008, no espaçamento de 0,90 m entrelinhas, utilizando-se o híbrido simples 8480 Dow AgroSciences. Empregou-se uma quantidade de sementes em excesso visando garantir uma população final de 55.000 plantas/ha.

Todos os tratamentos receberam uma adubação básica com 40 kg ha^{-1} de K_2O , na forma de cloreto de potássio, aplicado em pré-semeadura, juntamente com a uréia, a lanço, em área total. Todos os tratamentos receberam também, uma adubação fosfatada constante, aplicando-se no sulco de semeadura 50 kg ha^{-1} de P_2O_5 (superfosfato simples).

As aplicações de N em cobertura (03/12/2008 e 12/12/2008) foram realizadas quando as plantas apresentavam quatro e oito folhas completamente desenroladas (estádio V4 e V8, respectivamente).

O controle das plantas daninhas em pós-emergência foi realizado com o milho no estágio de 5-6 folhas, utilizando-se os herbicidas Nicossulfuron e Atrazina nas dosagens de 60 e 960 g i.a. ha^{-1} . Para o controle da lagarta do cartucho (*Spodoptera frugiperda*) foi utilizado o inseticida Deltamethrin na dose de 75 mL ha^{-1} .

Para a avaliação da produtividade de grãos de milho, foram coletadas as espigas das quatro linhas centrais da área útil de cada subparcela. As espigas foram trilhadas mecanicamente, sendo posteriormente, pesados os grãos. Após a determinação da umidade dos grãos em estufa de circulação forçada a 65 - 70°C, os dados foram transformados em kg ha⁻¹ e padronizados a 13% de umidade. De cada subparcela, foi coletada, aleatoriamente, uma amostra de aproximadamente 200 g de grãos para a determinação das concentrações de N total.

Para a avaliação da eficiência de utilização do fertilizante nitrogenado (EUFN), em cada subparcela (de três blocos) foi instalada **microparcela** que recebeu a uréia marcada com ¹⁵N. Cada microparcela era constituída de uma linha de 1,5 m de comprimento, sendo a área útil de amostragens de plantas (parte aérea e raízes) e solo restrita a 1,0 m central, deixando-se 0,25 m nas extremidades como bordadura. A uréia enriquecida com 5,366% de átomos de ¹⁵N foi aplicada a lanço, superficialmente em área total nas microparcelsas conforme os tratamentos. A exceção, entretanto, foi a estratégia de aplicação do N - 150-0-0 -, no qual foi usada uréia com enriquecimento de 2,366% de átomos ¹⁵N.

Para a avaliação do enriquecimento isotópico em átomos de ¹⁵N, todas as amostragens foram realizadas na parte central das microparcelsas.

No estágio de maturação fisiológica dos grãos (aparecimento da camada preta) foi colhida a parte aérea de três plantas na parte central das microparcelsas. Após a debulha manual das espigas, os grãos e a palha (colmos, pendões, folhas, sabugos e palha da espiga) foram lavados e colocados para secar em estufa a 65-70° C. Após a secagem, a parte aérea foi fragmentada e, retirou-se uma amostra para futuras análises do enriquecimento isotópico em átomos de ¹⁵N e N total.

Nesta mesma época, as raízes foram coletadas em camadas de 0,10 m, até a profundidade de 0,40 m, empregando-se o método do trado modificado, conforme descrito por CAIRES et al. (2008). As amostras foram coletadas em dois locais, em relação às plantas: na linha de semeadura e na entrelinha de semeadura, a uma distância de 0,25 a 0,30 m das plantas. As raízes foram separadas do solo pela dispersão em água através das seguintes peneiras sobrepostas: ABNT nº 10 (abertura

de malha de 2,0 mm), ABNT nº 18 (abertura de malha de 1,0 mm) e ABNT nº 50 (abertura de malha de 0,3 mm). As amostras de raízes foram posteriormente lavadas, obedecendo a seguinte sequência de operações: solução diluída de detergente; água corrente; solução de HCl 0,1 mol L⁻¹; água corrente; água destilada) e secadas em estufa a 65-70°C, determinando-se a massa de material seco. A cada profundidade, foi obtida a soma da massa seca de raízes contidas na linha e na entrelinha de semeadura, sendo os resultados expressos em massa seca de raiz por volume amostrado (densidade de massa seca de raiz - DMSR).

Foram coletadas ainda amostras de solo, em intervalos de 0,10 m, até a profundidade de 0,40 m. A amostra composta era oriunda da mistura de três amostras coletadas na linha de semeadura e três amostras na entrelinha (a uma distância de cerca de 0,25 m das plantas). Após o quarteado e homogeneização do solo dessas diferentes camadas, as amostras foram secadas ao ar. Foram efetuadas análises, nas amostras de solo e raiz, para a determinação do enriquecimento isotópico em átomos de ¹⁵N e N total. No caso das raízes foram feitas amostras compostas, considerando-se todas as profundidades.

Com os resultados do enriquecimento isotópico em % de átomos de ¹⁵N das amostras da parte aérea e da raiz do milho, foram calculados o nitrogênio na planta proveniente do fertilizante (Nppf) e a eficiência de utilização do fertilizante nitrogenado (EUFN), por meio das expressões 1, 2 e 3 (GAVA et al., 2006):

$$Nppf (\%) = (a / b) 100 \quad (1)$$

$$Nppf (kg \text{ ha}^{-1}) = [Nppf (\%) / 100] Nt (kg \text{ ha}^{-1}) \quad (2)$$

$$EUFN (\%) = [Nppf (kg \text{ ha}^{-1}) / Nf (kg \text{ ha}^{-1})] 100 \quad (3)$$

onde: a e b são as abundâncias de ¹⁵N (% em átomos em excesso) na planta e no adubo, respectivamente; Nt é o nitrogênio total acumulado na planta de milho em kg ha⁻¹.

Também foi calculado, o nitrogênio do solo proveniente do fertilizante até a profundidade de 0,40 m, empregando-se as expressões 4, 5 e 6 (GAVA et al., 2006):

$$Nspf (\%) = (a / b) 100 \quad (4)$$

$$Nspf (kg \text{ ha}^{-1}) = f [Nspf (\%)] Nt . V . D \quad (5)$$

$$\text{RFNS (\%)} = [\text{N}_{\text{spf}} (\text{kg ha}^{-1}) / \text{NF} (\text{kg ha}^{-1})] 100 \quad (6)$$

onde: $\underline{a}$ e $\underline{b}$ são as abundâncias de ^{15}N (% em átomos em excesso) no solo e no fertilizante, respectivamente; $\underline{Nt}$ é a dose de N-fertilizante (kg ha^{-1}); $\underline{V}$ é o volume de solo até a profundidade de 0,40 m e $\underline{D}$ é a densidade global do solo; $\underline{f}$ é o fator de conversão em função do volume (profundidade e área a ser coletada) e RFNS é a porcentagem de recuperação do fertilizante nitrogenado no solo (%).

3.3. Experimento 2: Avaliação do aproveitamento do nitrogênio (^{15}N) do milho e da soja pelo milho cultivado em sucessão

Para avaliar o aproveitamento do nitrogênio (^{15}N) do milho e da soja (plantas de entressafra) pelo milho em sucessão foi utilizada metodologia similar à empregada por SILVA et al. (2006b).

O milho (híbrido Maximus) e a soja (sem inoculação das sementes com *Bradyrhizobium japonicum*), cultivar Conquista, foram semeados em 15/4/2008, em área próxima ao experimento. Esse solo não tinha sido cultivado anteriormente com soja. Na adubação de semeadura foram utilizados 30 kg ha^{-1} de P_2O_5 e 30 kg ha^{-1} de K_2O , tendo-se como fontes o superfosfato simples e o cloreto de potássio, respectivamente. A marcação isotópica foi realizada utilizando-se 30 kg ha^{-1} de N-uréia, enriquecida em 5 % de átomos de ^{15}N em excesso. O fertilizante ^{15}N -uréia foi aplicado parceladamente, sendo a primeira aplicação (via solo), de 25 kg ha^{-1} de N, realizada aos 10 dias após a emergência das plantas; a segunda e terceira aplicação ($2,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de N/aplicação), todas via foliar, foram realizadas nos estádios V_8 e V_{12} .

Durante todo o período as plantas foram mantidas sob irrigação por gotejo.

Em 15/9/2008 a soja foi colhida no estágio de frutificação plena (R_4) e o milho quando em estágio R_2 (grão conhecido como “bolha d’água”). Além da parte aérea, as raízes das plantas também foram coletadas, até a profundidade de 0,20 m. O material vegetal foi levado para laboratório e lavado, obedecendo a seguinte sequência de operações: solução diluída de detergente; água corrente; solução de HCl $0,1 \text{ mol L}^{-1}$; água corrente; água destilada.

Todo material vegetal após secagem em estufa a 65 - 70°C, pesagem para a determinação da massa seca, foi fragmentado (tentando simular o triturador de palha - triton) e colocado em microparcelsas com área total de 2,7 m² (três linhas de milho de 1,0 x 0,9 m). A parte aérea (palhada) das plantas não marcadas destas microparcelsas foi retirada e substituída pela parte aérea e raízes das plantas marcadas com ¹⁵N. É importante mencionar, que foi adicionada nas microparcelsas as mesmas quantidades de palha de milho e soja, mensuradas na área experimental, acrescidas de 548 e 278 kg ha⁻¹, respectivamente de raízes de milho e soja (avaliadas na área em que as plantas de entressafra foram marcadas com ¹⁵N - camada de 0 - 0,20 m).

Antes da palhada ser levada para o campo, efetuou-se uma amostragem desse material seco, com o objetivo de avaliar as concentrações de C, N total e ¹⁵N. As análises químicas foram realizadas em triplicata.

A semeadura do milho nas microparcelsas foi realizada no mesmo dia do experimento em que se avaliou a influência das épocas de aplicação de N. A seguinte adubação foi empregada na semeadura do milho: 30 kg ha⁻¹ de N (uréia comercial), 50 kg ha⁻¹ de P₂O₅ (superfosfato simples) e 40 kg ha⁻¹ de K₂O (cloreto de potássio); em cobertura foi aplicado 80 e 40 kg ha⁻¹ de N (uréia comercial), respectivamente quando as plantas de milho apresentavam quatro e oito folhas completamente desenroladas.

As amostragens de raiz e parte aérea do milho, foram realizadas nas microparcelsas obedecendo ao mesmo procedimento descrito anteriormente. Na mesma área, foram coletadas ainda amostras de solo, em intervalos de 0,10 m, até a profundidade de 0,40 m. A amostra composta era oriunda da mistura de três amostras coletadas na linha de semeadura e três amostras na entrelinha (a uma distância de cerca de 0,25 m das plantas). Após o quarteado e homogeneização do solo dessas diferentes camadas, as amostras foram secadas ao ar. As análises foram realizadas em triplicata.

Foram efetuadas análises químicas (em triplicata), nas amostras de solo, parte aérea e raiz, para a determinação do N total e ¹⁵N. No caso das raízes, entretanto, foram realizadas amostras compostas, considerando-se todas as profundidades.

Os cálculos para a determinação do aproveitamento do N do milho e da soja (plantas de cobertura) pelo milho em sucessão foram realizados conforme descrito em SILVA et al. (2006 b).

a) Nitrogênio acumulado (NA)

$$NA = N \times MS / 1.000$$

onde: NA é o nitrogênio acumulado (kg ha^{-1}); N é concentração de nitrogênio (g kg^{-1}); MS é a matéria seca do milho (kg ha^{-1}).

b) %Nmppe = % de nitrogênio no milho proveniente das plantas de entressafra (soja ou milho)

$$\%Nmppe = (\% \text{ átomos de } ^{15}\text{N} \text{ em excesso no milho} / \% \text{ átomos de } ^{15}\text{N} \text{ em excesso na planta de entressafra}) \times 100$$

c) Quantidade de nitrogênio no milho proveniente das plantas de entressafra (QNmppe em kg ha^{-1})

$$QNmppe = (\% Nmppe \times NA) / 100$$

d) Aproveitamento (%AP) do nitrogênio das plantas de entressafra

$$\% AP = (QNmppe / QNA) \times 100$$

onde: QNA é a quantidade de nitrogênio aplicado como planta de entressafra (kg ha^{-1}).

Também foi calculado o N na planta proveniente do solo (%Npps) empregando-se a expressão:

$$\%Npps = \%NA - \%Npppe, \text{ ou } 100 - \% Nppe$$

As amostras de tecido vegetal e solo foram enviadas ao CENA/USP para a determinação dos teores de N total e da abundância de ^{15}N . Essas análises foram realizadas em espectrômetro de massa, com analisador automático de N, conforme método de BARRIE & PROSSER (1996).

Os resultados foram submetidos à análise de variância, aplicando-se o teste F. Quando havia significância estatística ao nível de 5% ou 1% de probabilidade, efetuou-se a comparação das médias pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Para a análise estatística das raízes, os dados foram transformados em $\log(x+5)$. Para as variáveis relacionadas ao aproveitamento pelo milho do nitrogênio (^{15}N) das plantas

de entressafra, a análise foi realizada empregando-se o teste t ao nível de 5% de probabilidade. As análises foram realizadas empregando-se o programa estatístico AgroEstat (BARBOSA & MALDONADO JÚNIOR, 2011).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Produção de milho, matéria seca de raízes e concentrações de nitrogênio na planta

Durante o ciclo da cultura do milho (primavera/verão) ocorreu uma precipitação pluvial de 1.039,5 mm, não havendo a incidência de longos períodos de estiagem, que prejudicassem o desenvolvimento da cultura (Figura 1).

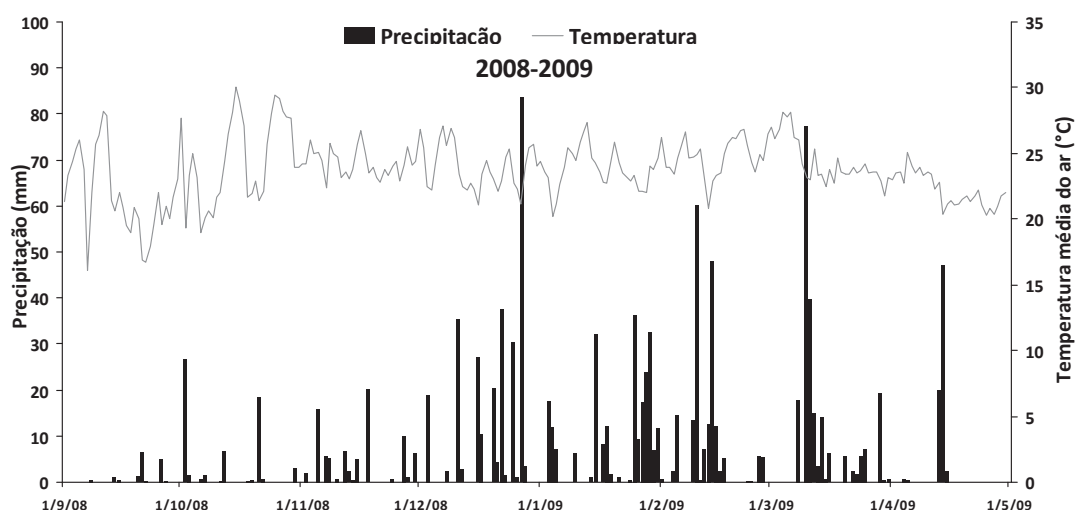


Figura 1 - Dados diários de precipitação pluvial e temperatura média do ar ocorrida no período de setembro/2008 a abril/2009.

Verificou-se que, tanto na ausência (0 - 0 - 0) como na presença da adubação nitrogenada, foram observadas menores valores de matéria seca da parte aérea (MSPA) e de grãos quando o milho foi cultivado em sucessão ao milho (Tabela 3).

Embora seja importante no sistema semeadura direta a utilização de espécies que produzam elevada quantidade de palha, com decomposição mais lenta, como é o caso das gramíneas (SILVA et al., 2008b), a monocultura de milho (M/M) iniciada em 1990, além de levar a maiores riscos fitossanitários, proporcionou a menor produtividade de grãos.

Tabela 3. Produtividade de grãos e massa seca da parte aérea (palha + grãos) de milho em função das estratégias de aplicação do nitrogênio e das plantas de entressafra.

Planta entress.(P)	Estratégia de aplicação do nitrogênio (E), kg ha ⁻¹					
	(¹)0 - 0 - 0	20 - 80 - 50	50 - 80 - 20	150 - 0 - 0	0 - 80 - 70	média
Produtividade de grãos, Mg ha ⁻¹						
Milho	3,40 Bb ⁽²⁾	9,68 Ab	9,57 Ab	9,46 Ab	10,08 Ab	8,44 b
Soja	6,03 Ba	10,86 Aa	10,79 Aa	10,62 Aa	10,70 Aa	9,80 a
média	4,71 B	10,27 A	10,18 A	10,04 A	10,39 A	
Teste F	E = 205,72**	P = 53,21**		E x P = 3,70*		
CV (parcela) = 6,50%				CV (subparcela) = 8,12%		
Massa seca da parte aérea (palha + grãos), Mg ha ⁻¹						média
Milho	6,49 Bb	17,09 Ab	17,63 Ab	17,07 Ab	18,08 Ab	15,27 b
Soja	13,50 Ba	20,85 Aa	19,67 Aa	19,44 Aa	19,95 Aa	18,68 a
média	9,99 B	18,97A	18,65 A	18,26 A	19,02 A	
Teste F	E = 72,69**	P = 169,53**		E x P = 13,38**		
CV (parcela) = 8,36%				CV (subparcela) = 5,98%		

⁽¹⁾ primeiro, segundo e terceiro número correspondem, respectivamente, a dose de N aplicada em pré-semeadura e quando as plantas apresentavam 4 e 8 folhas completamente desenroladas. ⁽²⁾ Médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha não diferem significativamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade; médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem significativamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Por outro lado, vários autores têm observado maior produtividade de milho quando cultivado em sucessão à leguminosas (SILVA et al., 2006b; SILVA et al., 2008b; STRANGER & LAUER, 2008). Por as leguminosas apresentarem baixa relação C:N e menores conteúdos de lignina e polifenóis (PALM & SANCHEZ, 1991; MARTENS, 2000b) isto pode ter contribuído para uma mais rápida decomposição e mineralização do N comparado aos resíduos do milho de entressafra (PERIN et al., 2004). O elevado potencial de fixação do N₂ atmosférico no processo de simbiose com o *Bradyrhizobium japonicum*, também proporciona maior aporte de N, além de melhor sincronia entre a liberação do N dos seus resíduos e as necessidades em diferentes estádios de desenvolvimento da planta de milho (STRIEDER et al., 2006).

A adição de nitrogênio, independentemente da estratégia de parcelamento ou da planta de entressafra, aumentou significativamente a produtividade de grãos de milho (Tabela 3). As plantas do tratamento testemunha (sem N), no sistema de monocultura apresentaram, a partir do estágio V4, sintomas de deficiência de N nas folhas mais velhas, colmos mais finos e menor altura. A importância da adubação nitrogenada para a cultura do milho também foi demonstrada em trabalhos conduzidos por LARA CABEZAS et al. (2005), SILVA et al. (2005a), DUETE et al. (2008), LEITE et al. (2009), SANTOS et al. (2010) e MELO et al. (2011).

Mesmo em milho cultivado em sucessão à soja, houve incremento na produtividade, contrariando resultados de LANGE et al. (2008), em área cultivada dois anos com soja, onde a aplicação de N não alterou significativamente as concentrações foliares de N e a produtividade de milho.

O incremento na produção com o uso do N pode ser atribuído ao fato do mesmo ser constituinte da molécula de clorofila e atuar nos processos de divisão e expansão celular (MENGEL & KIRKBY, 2001) o que pode ter contribuído para o incremento na área foliar, resultando numa maior síntese de fotossintatos em função da maior interceptação da radiação (LEMAIRE et al., 2007). Em muitas culturas, tem-se verificado que a relação entre índice de área foliar e absorção de N é diretamente proporcional (HIREL et al., 2007).

A carência de N durante o desenvolvimento do milho pode reduzir a produção final não somente como consequência de menor área foliar, mas também como resultado de um menor número de grãos ou fileiras por espiga (SILVA et al., 2005a). Ainda, o fornecimento insuficiente de N, pode afetar outro componente importante da produção de milho, que é a massa do grão, a qual além de ser controlada geneticamente, é dependente de fatores que influenciam no processo de enchimento do grão durante a maturação (MENGEL & KIRKBY, 2001). TAIZ & ZEIGER (2009) relataram que o enchimento do grão não é primariamente limitado pelo suprimento de fotossintatos para o desenvolvimento dos grãos, mas é bastante influenciado pela atividade de hormônios. A citocinina, cuja síntese e translocação são influenciadas pelo N, pode controlar a formação das células do endosperma do grão e assim ter uma

marcante influência sobre o tamanho do grão (MENGEL & KIRKBY, 2001). ZHANG et al. (2010) observaram que o enchimento e a massa do grão estão correlacionados com o conteúdo de citocinina nas espiguetas. Neste sentido, SILVA et al. (2005a) observaram que a adição de N promovia aumento na massa de 1.000 grãos.

É importante relatar, que nas plantas do tratamento testemunha (sem N), principalmente aquelas cultivadas na sequência M/M, além de apresentarem folhas pequenas, as mesmas morriam prematuramente, contribuindo para uma menor taxa de fotossíntese, o que se refletiu numa menor produtividade de massa seca da parte aérea e grãos (Tabela 3). De acordo com MENGEL & KIRKBY (2001), essa senescência precoce sob condições de carência de N, provavelmente está relacionada com a influência do N na síntese e translocação da citocinina, a qual é reduzida quando a nutrição nitrogenada é inadequada.

Essa questão ressalta a importância de adequada nutrição nitrogenada, uma vez que, o aumento da produção de milho nas últimas décadas foi conseguido principalmente pela seleção de genótipos com maior longevidade na fase de granação, em combinação com uma maior eficiência de utilização da luz em função da melhor arquitetura foliar (FORNASIERI FILHO, 2007).

Com relação às épocas de aplicação de N para a cultura do milho, a recomendação mais comum, consiste no fornecimento de uma pequena parte do N na semeadura e o restante (a maior dose) em cobertura (RAIJ et al., 1996). O parcelamento da adubação deve-se a preocupação com as perdas prováveis de N por lixiviação. A estratégia T₁ (20-80-50) apresentada na Tabela 2 representa essa filosofia no estado de São Paulo.

Em termos de produtividade (MSPA e grãos) - Tabela 3, concentrações e quantidades de N acumulado na parte aérea do milho (Tabela 4), verifica-se que a aplicação da dose total de N (150 - 0 - 0) em pré-semeadura não diferiu significativamente das diferentes estratégias de parcelamento desse nutriente. Vários autores, comparando a aplicação de N em pré-semeadura e em cobertura, também não verificaram diferença significativa na produtividade de grãos de milho (PÖTTKER & WIETHÖLTER, 2004; LARA CABEZAS et al., 2005; BERTOLINI et al., 2008). Esse

resultado é interessante, por a aplicação antecipada do fertilizante nitrogenado possibilitar uma mais rápida operação de semeadura do milho, por possibilitar maior flexibilidade no período de adubação, maior rendimento operacional de máquinas devido a maior facilidade de distribuição a lanço, e economia de tempo e de mão de obra (BERTOLINI et al., 2008).

Vários aspectos podem ter contribuído para esse resultado, destacando-se o fato do solo ser argiloso e intemperizado, apresentando apreciáveis concentrações de óxidos e hidróxidos de ferro e de alumínio. Esses minerais, que contribuem com carga positiva, podem ter adsorvido o nitrato (OLIVEIRA et al., 2000) principalmente em subsuperfície, retardando o movimento do ânion, em relação ao movimento da água, e assim, reduzindo as perdas por lixiviação (BOWEN et al., 1993). Vale ressaltar ainda, que o SPD ao longo do tempo, pode contribuir em quantidade e em qualidade com a matéria orgânica do solo (SÁ et al., 2001), a qual atua na formação de agregados e tem papel importante na distribuição e no tamanho dos poros, podendo influenciar no fluxo de água e de nitrato (BOLAN et al., 2011).

Por outro lado, os solos sob SPD podem apresentar uma maior capacidade de infiltração da água devido aos macroporos contínuos que podem ser abertos desde a superfície do solo (UNGER & McCALLA, 1980), possibilitando maiores perdas iniciais por lixiviação, quando da aplicação superficial de N, se ocorrer uma alta precipitação logo após a aplicação do fertilizante (ADDISCOTT, 2004). Sob condições de elevada precipitação pluvial nos estádios iniciais de desenvolvimento do milho, a aplicação de N, parte na semeadura e parte em cobertura, proporcionou rendimentos de grãos de milho superior à aplicação em pré-semeadura (BASSO & CERETTA, 2000; PÖTTEKER & WIETHÖLTER, 2004; SILVA et al., 2005b).

Dentro desse contexto, ADDISCOTT (2004) relatou que no interior dos agregados a água e o nitrato se movem lentamente por difusão. A velocidade de difusão do nitrato é menor em solos argilosos ou com agregados de maior tamanho (CANTARELLA, 2007), o que pode afetar a lixiviação desse ânion. Dessa maneira, se o fertilizante aplicado teve tempo para difundir para o interior do agregado, ele estará protegido temporariamente de lixiviação devido a maior proporção do fluxo de água e

solutos ocorrerem ao redor dos agregados (CAMERON & HAYNES, 1986). Essa possibilidade existe no presente experimento, pois como se verifica na Figura 1, a precipitação pluvial nos estádios iniciais da cultura do milho não foi elevada (98,7 mm, da aplicação em pré-semeadura até o estádio V4. Dessa maneira, a maior preocupação com a aplicação da dose total de N em pré-semeadura é a quantidade de chuva no período logo após a aplicação do fertilizante.

Apesar da preocupação universal com a lixiviação de N, geralmente quando se quantificou essas perdas no Brasil, elas foram pequenas (JAVIER GHIBERTO et al., 2011), sendo que a maior parte do N lixiviado era oriundo da mineralização da matéria orgânica do solo e não do fertilizante aplicado (COELHO et al., 1991). Não é surpreendente observar na literatura, dados demonstrativos de que a produtividade de milho não foi afetada significativamente pelas diferentes épocas de adubação com N, mesmo com a ocorrência de elevadas precipitações (WOLSCHICK et al., 2003). SÁ (1996) observou que a aplicação de N na cultura da aveia em pré-semeadura ao milho foi vantajosa mesmo com a ocorrência de precipitação pluvial de 330 mm no período.

Por outro lado, a proposta de retardar a primeira aplicação de N, fornecendo-o em estádios mais avançados, quando possivelmente o sistema radicular do milho estivesse mais desenvolvido, não gerou benefícios adicionais nas variáveis analisadas (Tabelas 3 e 5), não sendo significativamente diferente a dose total de N aplicada apenas em cobertura (0 - 80 - 70) das outras estratégias de manejo da adubação nitrogenada. Essa estratégia, entretanto, poderia ser dependente da cultura antecessora do milho, uma vez que STRIEDER et al. (2006) verificaram que era possível atrasar a época de aplicação da primeira dose de N em cobertura para o milho, quando o mesmo foi cultivado em sucessão à ervilhaca comum, uma leguminosa com alta liberação de N logo após seu manejo. Isto não foi observado no presente experimento, tanto para a produtividade (MSPA e grãos), como para as concentrações e quantidades de N absorvidas e acumuladas na parte aérea. Isto indica que o solo apresentou condições para suprir o N via mineralização da matéria orgânica, e assim atender as necessidades iniciais da cultura do milho.

A adição de dose maior de N em pré-semeadura (50 - 80 - 20) também não resultou em benefícios maiores quando comparado com as outras estratégias de aplicação de N. O objetivo da aplicação de uma dose maior era minimizar o problema da imobilização do N conforme mencionado por LARA CABEZAS et al. (2005). É importante destacar, que diferentemente das culturas de cobertura desenvolvidas em condições de sequeiro, que quase não produzem fitomasssa (LARA CABEZAS et al., 2005), no presente experimento a área foi irrigada, permitindo, deixar na superfície do solo grande quantidade de massa seca. Como na área experimental, o SPD foi adotado desde 1990, deve ter ocorrido grande aporte de material orgânico, sendo razoável admitir que o solo apresente considerável liberação de N (imobilização < mineralização), sendo desnecessária a aplicação inicial de doses maiores de N.

Verifica-se na Tabela 4 que a adição de N aumentou significativamente as concentrações e as quantidades de N na parte aérea do milho, sendo esse efeito mais pronunciado quando o milho foi cultivado após a soja.

Quando o N foi aplicado, nota-se nas Tabelas 4 e 6, que a quantidade de N extraída pela cultura do milho (N acumulado na parte aérea + raiz) foi superior a dose de N fornecida na adubação (150 kg ha^{-1} de N).

Com relação às concentrações e as quantidades de N absorvidas e acumuladas nos grãos de milho (Tabela 4), independentemente da estratégia de aplicação do N, valores mais elevados desse nutriente foram observados quando o milho foi cultivado após a leguminosa; tanto na sucessão milho/milho, como na sucessão soja /milho, a adição de N proporcionou quantidades mais elevadas de N nos grãos.

Chama a atenção nesses resultados, que os grãos representam o maior dreno de N na planta, representando entre 65 a 80% do N acumulado na parte aérea das plantas de milho. Resultados semelhantes foram observados por GAVA et al. (2006).

Tabela 4. Concentração e quantidade de N acumulada na parte aérea e nos grãos de milho em função das estratégias de aplicação do nitrogênio e das plantas de entressafra.

Planta de	Estratégia de aplicação do nitrogênio (E), kg ha ⁻¹					
entress.(P)	¹ (0-0-0)	(20-80-50)	(50-80-20)	(150-0-0)	(0-80-70)	
Concentração de N parte aérea (palha + grãos), g kg ⁻¹						média
Milho	6,1	9,5	9,2	8,8	9,6	8,6 b
Soja	7,7	11,5	10,5	11,0	12,0	10,6 a
Média	6,9 b⁽²⁾	10,5 a	9,9 a	9,9 a	10,8 a	
Teste F	E = 27,63**		P = 65,12**		P x E = 0,76 ^{NS}	
CV(parcela) =10,63%			CV (subparcela) = 9,6%			
Quantidade N acumulada parte aérea (palha+ grãos), kg ha ⁻¹						média
Milho	40	163	163	150	173	138 b
Soja	104	240	207	215	237	201 a
média	72 b	201 a	185 a	183 a	205 a	
Teste F	E = 57,47**		P = 138,75**		P x E = 0,98 ^{NS}	
CV (parcela) =14,92%			CV (subparcela) =12,27%			
Concentração de N nos grãos, g kg ⁻¹						média
Milho	9,0	12,3	12,1	11,0	12,0	11,3 b
Soja	12,1	15,3	15,2	15,9	14,7	14,6 a
média	10,6 b	13,8 a	13,7 a	13,5 a	13,4 a	
Teste F	E = 22,04**		P = 126,40**		P x E = 1,66 ^{NS}	
CV (parcela) = 7,67%			CV (subparcela) = 9,42%			
Quantidade N acumulada nos grãos, kg ha ⁻¹						média
Milho	31	119	116	104	121	98,2 b
Soja	73	166	164	169	157	145,8a
média	52 b	142,5 a	140 a	136,5 a	139,0 a	
Teste F	E = 67,04**		P = 168,02**		P x E = 1,16 ^{NS}	
CV (parcela) =13,53%			CV (subparcela) = 10,73%			

⁽¹⁾ primeiro, segundo e terceiro número correspondem, respectivamente, a dose de N aplicada em pré-semeadura e quando as plantas apresentavam 4 e 8 folhas completamente desenroladas. ⁽²⁾ Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem significativamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Um sistema agrícola sustentável exige que a reserva de nutrientes e matéria orgânica do solo sejam preservadas ou até aumentadas, ao longo dos anos. Neste sentido, chama a atenção o fato das quantidades de N exportada pelos grãos,

especialmente no caso da sucessão soja/milho, ser superior a dose de N fornecida na forma de uréia (150 kg ha^{-1} de N).

Essa questão é preocupante, uma vez que URQUIAGA et al. (2005) relataram que ocorrerá a perda de C do solo (matéria orgânica), sendo o sistema considerado insustentável ao longo do tempo, quando as perdas de N (exportação de N pelos órgãos colhidos) forem maiores que as entradas desse nutriente. ALVES et al. (2006) num solo argiloso da região de Dourados (MS), sob plantio direto recente, verificaram que a utilização de 70 kg ha^{-1} de N na cultura do milho, tornou o sistema deficiente (saída > entrada de N).

No presente experimento, quando se considerou o aporte de N das plantas de entressafra, o balanço foi positivo nas duas áreas: os restos culturais de milho e soja deixaram no solo, respectivamente, 80 e 100 kg ha^{-1} de N. Esse fato evidencia a importância da produção de elevada quantidade de fitomassa na entressafra, visando a sustentabilidade do sistema.

Devido as funções importantes exercidas pelo N na planta, deve-se considerar sua possível influência no desenvolvimento do sistema radicular, o que poderia proporcionar maior aproveitamento de água e de nutrientes pela planta. Estudos sobre a avaliação do sistema radicular não é tarefa fácil. Uma das principais dificuldades é remover inteiramente o sistema radicular do solo (KONDO et al., 2003). Encontram-se também grandes dificuldades em qualquer técnica de amostragem, algumas delas requerendo muito tempo e trabalho, mas com grande variabilidade dos resultados (FANTE JÚNIOR et al., 1994). No entanto, o método do trado utilizado na avaliação da densidade da massa seca de raízes (DMSR), foi considerado como eficiente e apropriado para a quantificação radicular rápida e simples, de acordo com resultados de FANTE JÚNIOR et al. (1994), ao compararem três metodologias (trado, cilindro volumétrico e o processamento por imagens).

As raízes de milho (camada de 0 a 0,40 m) representaram, em média, 7 a 8% da matéria seca da parte aérea da planta (Tabela 5). Resultados semelhantes foram observados por GAVA et al. (2006).

De acordo com as avaliações realizadas, as maiores quantidades de raiz encontravam-se nas camadas superficiais, até a profundidade de 0,20 m (Tabela 5). Resultados semelhantes foram observados por BASSOI et al. (1994) e BORDIN et al. (2008). VENZKE FILHO et al. (2004) observaram que 36% das raízes de milho estavam concentradas na camada de solo de 0-0,10 m. Os autores destacaram que aproximadamente 30% das raízes finas ($< 0,0012$ m) estavam nessa camada, sendo que as mesmas são importantes por proporcionarem um contato maior com a matriz do solo.

Verifica-se, ainda, na Tabela 5, em todas as profundidades, que a DMSR não foi influenciada significativamente pelas culturas antecessoras, diferentemente do observado por SAINJU et al. (2001) que verificaram um maior desenvolvimento das raízes quando a cultura anterior foi leguminosa.

Por sua vez, em relação ao tratamento em que se omitiu o N, o fornecimento desse nutriente aumentou significativamente a DMSR até a profundidade de 0,20 m, corroborando resultados de COSTA et al. (2002). O incremento na DMSR, apenas nas camadas superiores do solo, deve-se provavelmente, à aplicação do fertilizante nitrogenado ter sido realizada a lanço na superfície do solo (HOAD et al., 2001). COSTA et al. (2002), também verificaram que a influência positiva da adição de N, incrementando a superfície e o comprimento da raiz. Embora os procedimentos para a determinação da massa seca de raiz sejam relativamente simples, essa avaliação é importante devido relacionar-se linearmente com outras variáveis mais complexas do sistema radicular, como a superfície e o comprimento total de raiz (COSTA et al., 2002). De acordo com FAGERIA & MOREIRA (2011), a DMSR é uma variável importante, estando a mesma significativamente relacionada à produção de grãos. Nota-se nas Tabelas 3 a 6 que, na ausência da adubação nitrogenada, haver uma correspondência entre menor DMSR, menor concentração de N e menor produtividade de milho (massa seca parte aérea e grãos).

Dependendo da espécie e do estágio de desenvolvimento da planta, em média 25 a 50% dos fotossintatos produzidos na parte aérea são transportados para as raízes,

para seu crescimento, manutenção e outras funções, como por exemplo, a absorção iônica (MARSCHNER, 1995).

Tabela 5. Densidade de massa seca de raízes de milho em função das estratégias de aplicação do nitrogênio e das plantas de entressafra.

Planta de entress.(P)	Estratégia de aplicação do nitrogênio (E), kg ha ⁻¹					média
	¹ (0- 0- 0)	(20- 80-50)	(50-80 -20)	(150- 0-0)	(0- 80-70)	
Densidade de massa seca de raízes (0 - 0,10 m), mg cm ⁻³						
Milho	0,429	0,905	0,944	0,879	0,905	0,812 a
Soja	0,585	1,100	1,100	1,026	0,947	0,952 a
média	0,507b⁽²⁾	1,003 a	1,022 a	0,953 a	0,926 a	
Teste F	E = 4,70**		P = 1,80 ^{NS}		P x E = 0,05 ^{NS}	
CV (parcela) = 3,27%			CV (subparcela) = 5,14%			
Densidade massa seca de raízes (0,10 - 0,20 m), mg cm ⁻³						
Milho	0,126	0,420	0,308	0,403	0,338	0,319 a
Soja	0,113	0,317	0,303	0,403	0,416	0,310 a
média	0,119 b	0,369 a	0,306 a	0,403 a	0,377 a	
Teste F	E = 6,52**		P = 0,01 ^{NS}		P x E = 0,46 ^{NS}	
CV (parcela) = 2,05%			CV (subparcela) = 2,56%			
Densidade massa seca de raízes (0,20 - 0,30 m), mg cm ⁻³						
Milho	0,056	0,117	0,152	0,095	0,113	0,107 a
Soja	0,061	0,030	0,108	0,052	0,069	0,064 a
média	0,058 a	0,074 a	0,130 a	0,074 a	0,091 a	
Teste F	E = 0,31 ^{NS}		P = 0,96 ^{NS}		P x E = 0,29 ^{NS}	
CV (parcela) = 1,18%			CV (subparcela) = 1,32%			
Densidade massa seca de raízes (0,30 - 0,40 m), mg cm ⁻³						
Milho	0,030	0,043	0,078	0,082	0,039	0,054 a
Soja	0,030	0,000	0,035	0,000	0,056	0,093 a
média	0,030 a	0,022 a	0,056 a	0,041 a	0,048 a	
Teste F	E = 0,63 ^{NS}		P = 0,25 ^{NS}		P x E = 2,12 ^{NS}	
CV (parcela) = 0,52%			CV (subparcela) = 0,52%			
Massa seca de raiz (0 - 0,40 m), kg ha ⁻¹						
Milho	641	1.386	1.381	1.459	1.293	1.222 a
Soja	788	1.346	1.347	1.481	1.342	1.261 a
média	714 b	1.366 a	1.364 a	1.470 a	1.319 a	
Teste F	E = 7,98**		P = 0,97 ^{NS}		P x E = 0,69 ^{NS}	
CV (parcela) = 5,58%			CV (subparcela) = 7,69%			

⁽¹⁾ primeiro, segundo e terceiro número correspondem, respectivamente, a dose de N aplicada em pré-semeadura e quando as plantas apresentavam quatro e oito folhas completamente desenroladas. ⁽²⁾ Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Quando esse nutriente não é suprido adequadamente, como no tratamento sem N, pode ocorrer uma competição entre os dois drenos, representados pela raiz e parte aérea (HIREL et al., 2007), resultando em menor desenvolvimento do sistema radicular, representado por uma menor massa de raiz por área (kg ha^{-1}), como verificado na Tabela 5.

A época de aplicação do N pode também influenciar o crescimento das raízes (FAGERIA & MOREIRA, 2011). Segundo os mesmos, uma menor massa seca de raízes foi obtida quando a dose total de N foi aplicada na semeadura. Esse efeito, entretanto, não foi observado no presente experimento, não existindo diferenças significativas entre as estratégias de aplicação de N (Tabela 5).

Tabela 6. Concentração e quantidade de N acumulada nas raízes de milho (camada de 0 - 0,40 m) em função das estratégias de aplicação do nitrogênio e das plantas de entressafra.

Planta de entress.(P)	Estratégia de aplicação do nitrogênio (E), kg ha ⁻¹					média
	¹ (0-0-0)	(20-80-50)	(50-80-20)	(150-0-0)	(0-80-70)	
Concentração de N nas raízes, g kg ⁻¹						
Milho	9,1 ⁽²⁾	11,0	11,2	10,1	11,7	10,6 b
Soja	10,1	11,2	12,0	12,5	13,2	11,8 a
média	9,6 b	11,1 a	11,5 a	11,3 a	12,4 a	
Teste F	E = 2,93*		P = 11,33**		P x E = 0,48 ^{NS}	
CV (parcela) = 3,34%			CV (subparcela) = 3,73%			
Quantidade N acumulada nas raízes (0 - 0,40 m), kg ha ⁻¹						média
Milho	5,8	15,2	14,9	13,0	15,2	12,8 a
Soja	7,9	15,2	16,2	18,6	17,7	15,0 a
média	6,9 b	15,2 a	15,5 a	15,8 a	16,5 a	
Teste F	E = 7,00**		P = 3,12 ^{NS}		P x E = 0,22 ^{NS}	
CV (parcela) = 9,49%			CV (subparcela) = 12,09%			

⁽¹⁾ primeiro, segundo e terceiro número correspondem, respectivamente, a dose de N aplicada em pré-semeadura e quando as plantas apresentavam quatro e oito folhas completamente desenroladas.

⁽²⁾ Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

4.2. Recuperação do nitrogênio da uréia no solo, na parte aérea e raiz do milho

Na raiz do milho, a quantidade de N na planta proveniente do fertilizante (QNppf) não variou significativamente com as estratégias de aplicação desse nutriente ou com plantas de entressafra. Essas quantidades variaram de 1,9 a 3,6 kg ha⁻¹ de N (Tabela 7), correspondendo a uma eficiência de utilização do fertilizante nitrogenado (EUFN) menor do que 3% (Tabela 8). Esses valores de EUFN foram pouco superiores aos obtidos por GAVA et al. (2006).

A maior QNppf na planta (54,8 kg ha⁻¹) foi observada no milho cultivado em sucessão a soja (Tabela 7), representando uma EUFN de 36,6% (Tabela 8).

SILVA et al. (2006a) também verificaram maior aproveitamento do N fertilizante quando o milho foi cultivado após leguminosa. De acordo com os autores, isto pode ser atribuído à menor relação C:N e as menores quantidades de lignina e polifenóis na soja (PALM & SANCHEZ, 1991; MARTENS, 2000b), o que possivelmente, levou a uma menor imobilização de N do fertilizante pelos microrganismos do solo.

Pode ter contribuído, também, para o resultado observado, a maior produtividade de fitomassa do milho cultivado em sucessão a leguminosa, o que proporcionou um maior acúmulo de N.

Apesar das estratégias de aplicação do N não terem diferido significativamente em termos de produtividade (MSPA e grãos), as mesmas apresentaram comportamento distinto no tocante a QNppf e EUFN.

Verifica-se na Tabela 7, que a aplicação da dose total de N em pré-semeadura, proporcionou na parte aérea e na planta de milho, a maior QNppf (53,1 e 56,7 kg ha⁻¹ de N). Provavelmente, a maior disponibilidade de N nos estádios iniciais diminuiu a imobilização de N pelos microrganismos, além da possibilidade da aplicação do fertilizante, ter estimulado o desenvolvimento do sistema radicular, aumentando o volume do solo explorado, proporcionando maior absorção do nutriente (JENKINSON et al., 1985).

Tabela 7. Quantidade de nitrogênio no solo proveniente do fertilizante (QNsp) e quantidade de nitrogênio na planta proveniente do fertilizante (QNppf) na parte aérea (palha + grãos), na raiz e na planta (parte aérea + raiz) de milho, por ocasião da colheita dos grãos, em função das estratégias de aplicação do nitrogênio e das plantas de entressafra.

Planta	Estratégia de aplicação do nitrogênio (E), kg ha ⁻¹				
entress.(P)	⁽¹⁾ (20-80-50)	(50-80-20)	(150-0-0)	(0-80-70)	
----- QNppf (parte aérea), kg ha ⁻¹ -----					média
Milho	40,6	36,5	43,8	35,6	39,1 b
Soja	52,9	47,7	62,3	44,8	51,9 a
média	46,7 ab ⁽²⁾	42,1 ab	53,1 a	40,2 b	
Teste F	E = 5,48*		P = 31,11**		P x E = 0,78 ^{NS}
CV (parcela) = 13,14%			CV (subparcela) = 12,35%		
----- QNppf (raiz), kg ha ⁻¹ -----					média
Milho	1,8	2,1	2,5	2,4	2,2 a
Soja	2,1	2,2	4,7	2,7	2,9 a
média	1,9 a	2,1 a	3,6 a	2,6 a	
Teste F	E = 2,31 ^{NS}		P = 2,89 ^{NS}		P x E = 1,17 ^{NS}
CV (parcela) = 7,13%			CV (subparcela) = 6,46%		
----- QNppf (parte aérea + raiz), kg ha ⁻¹ -----					média
Milho	42,4	38,6	46,3	38,1	41,3 b
Soja	54,9	49,9	67,0	47,5	54,8 a
média	48,7 ab	44,3 ab	56,7 a	42,8 b	
Teste F	E = 5,34*		P = 40,85**		P x E = 1,37 ^{NS}
CV (parcela) = 13,75%			CV (subparcela) = 10,77%		
----- QNsp, kg ha ⁻¹ -----					média
Milho	34,0	35,6	26,3	44,0	35,0 a
Soja	31,3	27,9	28,4	36,6	31,0 a
média	32,6 ab	31,7 ab	27,3 b	40,3 a	
Teste F	E = 9,45**		P = 3,23 ^{NS}		P x E = 1,12 ^{NS}
CV (parcela) = 21,00%			CV (subparcela) = 17,18%		

⁽¹⁾ primeiro, segundo e terceiro número correspondem, respectivamente, a dose de N aplicada em pré-semeadura e quando as plantas apresentavam quatro e oito folhas completamente desenroladas. ⁽²⁾ Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela 8. Recuperação do nitrogênio no solo proveniente do fertilizante (RNspf) e eficiência de utilização do fertilizante nitrogenado (EUFN) na parte aérea (palha + grãos), na raiz e na planta (parte aérea + raiz) de milho, em função das estratégias de aplicação do nitrogênio e das plantas de entressafra.

Planta	Estratégia de aplicação do nitrogênio (E), kg ha ⁻¹				
entress.(P)	⁽¹⁾ (20-80-50)	(50-80-20)	(150-0-0)	(0-80-70)	
-----EUFN - parte aérea (palha + grãos), % -----					média
Milho	27,1	24,3	29,2	23,7	26,1 b
Soja	35,2	31,8	41,6	29,9	34,6 a
média	31,2 ab ⁽²⁾	28,1 ab	35,4 a	26,8 b	
Teste F	E = 5,47*		P = 31,12**	P x E = 0,78 ^{NS}	
CV (parcela) = 13,16%			CV (subparcela) = 12,35%		
----- EUFN - raiz, % -----					média
Milho	1,2	1,4	1,7	1,6	1,4 b
Soja	1,7	1,5	3,1	1,8	2,0 a
média	1,5 a	1,4 a	2,4 a	1,7 a	
Teste F	E = 1,68 ^{NS}		P = 5,81*	P x E = 1,26 ^{NS}	
CV (parcela) = 6,11%			CV (subparcela) = 4,51%		
----- EUFN - planta (parte aérea + raiz), % -----					média
Milho	28,3	25,7	30,9	25,4	27,5 b
Soja	36,6	33,3	44,7	31,7	36,6 a
média	32,4 ab	29,5 ab	37,8 a	28,5 b	
Teste F	E = 5,35*		P = 41,12**	P x E = 1,38 ^{NS}	
CV (parcela) = 13,74%			CV (subparcela) = 10,75%		
----- RNspf, % -----					média
Milho	22,7	23,7	17,5	29,3	23,3 a
Soja	20,9	18,6	18,9	24,4	20,7 a
média	21,7 ab	21,1 ab	18,2 b	26,9 a	
Teste F	E = 5,74*		P = 1,69 ^{NS}	P x E = 0,78 ^{NS}	
CV (parcela) = 18,71			CV (subparcela) = 15,60		

⁽¹⁾ primeiro, segundo e terceiro número correspondem, respectivamente, a dose de N aplicada em pré-semeadura e quando as plantas apresentavam quatro e oito folhas completamente desenroladas. ⁽²⁾ Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

A QNppf foi menor quando todo o N foi aplicado em cobertura (0-80-70). Possivelmente, a disponibilidade do N em forma prontamente assimilável pela planta pode ter ocorrido fora da época de maior exigência do nutriente pelo milho, levando a menor acúmulo na planta.

SILVA et al. (2005 b) numa área com cinco anos de plantio direto no estado de Goiás, verificaram que aplicações tardias de N (35 dias após a emergência - DAE) em superfície, prejudicaram a produção de milho, certamente devido ao menor aproveitamento do N aplicado. Dentro desse contexto, destaca-se que aproximadamente 50% da dose total de N foi aplicada no estágio V8 (aproximadamente 30 DAE), talvez, comprometendo maior aproveitamento desse nutriente pelo milho.

Apesar disto, o desenvolvimento e a produtividade do milho não foram afetados, talvez devido o solo apresentar condições de fornecer o N nos estádios iniciais da cultura, uma vez que o SPD foi iniciado em 1990, estando já consolidado (mineralização > imobilização).

A eficiência de utilização do fertilizante nitrogenado (EUFN) pela planta de milho (parte aérea e raiz) foi, em média, de 32,4; 29,5; 37,8 e 28,5%, respectivamente para as estratégias de aplicação do N: 20-80-50; 50-80-20; 150-0-0 e 0-80-70 (Tabela 8)

Na literatura, o aproveitamento pelas plantas de milho do N do fertilizante aplicado é bastante variável. As diferenças observadas na EUFN podem ser atribuídas, principalmente, as condições edafoclimáticas, a dose e fonte de nitrogênio, ao sistema de cultivo, ao genótipo de milho e do espaçamento entre plantas (GAVA et al., 2006; BARBIERI et al., 2008). Os valores de EUFN determinados estão dentro da variação observada na maioria dos estudos, confirmando, que normalmente a EUFN é baixa e raramente excede 60% (SCIVITTARO et al., 2000; LARA CABEZAS et al., 2005; ALVES et al., 2006; GAVA et al., 2006; SILVA et al., 2006 a; DUETE et al., 2008).

Dessa maneira, é possível verificar que a maior parte do N na planta (> 60%) proveio do solo e de outras fontes, como as plantas de entressafra. Valores próximos foram verificados por SILVA et al. (2006 a), GAVA et al. (2006) e DUETE et al. (2008).

Devido a EUFN ser baixa, associada ao fato da maior parte do N absorvido pelas plantas de milho ter origem no N do solo, isto sugere o efeito chamado “pool

substitution”, ou seja, o N aplicado (^{15}N - uréia) substitui o N mineral nativo do solo, deixando, assim, maior quantidade deste para absorção pelas plantas (RAO et al., 1992; DUETE et al., 2008).

Nota-se na Tabela 7 que a quantidade de N no solo proveniente do fertilizante (QNspf) foi afetada significativamente apenas pela estratégia de aplicação do N. De maneira inversa ao aproveitamento do N do fertilizante pelas plantas de milho, a maior e a menor QNspf foram observadas quando todo o N foi aplicado em cobertura (0-80-70) e pré-semeadura (150-0-0), respectivamente.

Parte do N do fertilizante não utilizado pode permanecer no solo e estar disponível para culturas subsequente (ALVES et al., 2006).

Na Tabela 9 é apresentado o balanço do N do fertilizante no sistema solo-planta. Verifica-se nessa Tabela que a recuperação no sistema solo-planta do N do fertilizante aplicado, em função das estratégias de aplicação do N, variou de 51 a 56%, correspondendo aproximadamente a 76 e 84 kg ha⁻¹ de N. Quando o milho foi cultivado em sucessão à soja e ao milho, foram recuperados no sistema, respectivamente, 57 e 51% do N aplicado, correspondendo a aproximadamente 86 e 77 kg ha⁻¹ de N.

Tabela 9. Distribuição do N da uréia (balanço) no sistema solo-planta após o cultivo do milho em sucessão às plantas de entressafra soja e milho.

Balanço	Estratégia de aplicação do nitrogênio, kg ha ⁻¹			
	(20-80-50)	(50-80-20)	(150-0-0)	(0-80-70)
	----- % -----			
planta	32,4	29,5	37,8	28,5
solo	21,7	21,1	18,2	26,9
planta + solo	54,1	50,6	56,0	55,4
NNR*	45,9	49,4	44,0	44,6

*NNR - nitrogênio não recuperado no sistema.

⁽¹⁾ primeiro, segundo e terceiro número correspondem, respectivamente, a dose de N aplicada em pré-semeadura e quando as plantas apresentavam quatro e oito folhas completamente desenroladas.

O N da uréia não recuperado (NNR) foi superior ao determinado por Gava et al. (2006), os quais também quantificaram o N no sistema solo-planta.

Nota-se na Tabela 9 que as perdas de N foram expressivas. O NNR inclui as perdas de N do solo por lixiviação, desnitrificação e volatilização de amônia (LARA CABEZAS et al., 2000). Perdas de amônia da parte aérea das plantas durante o desenvolvimento vegetativo da planta de milho ou na senescência foliar (HARPER & SHARPE, 1995) podem também ter contribuído com NNR.

4. 3. Aproveitamento pelo milho do nitrogênio das plantas de entressafra

Na sequência de culturas comumente utilizada nas regiões produtoras de grãos no Brasil, é importante levar em consideração na adubação nitrogenada para o milho, o N suprido pela soja.

Verifica-se na Tabela 10 que o milho apresentou uma maior produtividade de massa seca que a leguminosa. Embora estudando plantas de inverno que produzem fitomassa e grãos, o que pode gerar renda ao agricultor, essa observação, principalmente para a região norte do estado de São Paulo e região dos Cerrados, vem de encontro com a tendência geral de utilização de plantas de cobertura, dando-se preferência às gramíneas, principalmente devido a maior produção de biomassa com elevada relação C:N, o que confere uma maior proteção do solo (SILVA et al., 2006b). Em função da fixação simbiótica do N₂ atmosférico, a palhada de soja apresentou uma menor relação C:N e maior concentração do nutriente, disponibilizando para a planta de milho em sucessão maior quantidade de N relativamente à proporcionada pela palhada do milho (Tabela 10).

Além da relação C:N, que é uma variável importante no processo de mineralização/imobilização, outras diferenças qualitativas entre os compostos orgânicos devem ser considerados. Uma parte dos resíduos é constituída de polímeros mais complexos, como a lignina e os fenóis, sendo que, materiais com grandes quantidades de desses compostos orgânicos são mais recalcitrantes, apresentando uma decomposição mais lenta (PALM & SANCHEZ, 1991). Em relação a soja, o milho apresenta uma quantidade significativamente maior, principalmente de ácidos fenólicos (MARTENS, 2000b); se por um lado, isto diminui a velocidade de liberação do N, por

outro lado, essa composição torna-se importante na formação das substâncias húmicas e precursores (MARTENS, 2000a).

Tabela 10. Produtividade de matéria seca das plantas (parte aérea + raiz), concentração de N total, % de átomos de ^{15}N em excesso, quantidade de N acumulado e relação C/N das plantas de entressafra.

Planta de entressafra	Matéria seca	N total	Átomos de ^{15}N em excesso	Nitrogênio acumulado	Relação C/N
	Mg ha^{-1}	g kg^{-1}	%	kg ha^{-1}	
Milho	9,50 a	14,7 b	0,998	139 b	28,2 a
Soja	5,56 b	26,9 a	0,909	149 a	15,7 b
LSD (5%)	0,86	2,5	-	5	2,3

⁽¹⁾ Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem significativamente entre si pelo teste t a 5% de probabilidade.

Várias tentativas têm sido realizadas para determinar a contribuição do N das plantas de entressafra para o milho em sucessão, o que pode ser importante na recomendação de fertilizantes, principalmente quando a cultura de inverno é uma leguminosa.

Na maioria dos trabalhos dessa natureza, a avaliação do sistema radicular não é realizada, sendo os valores de aproveitamento do N considerados como subestimados (SILVA et al., 2008a). Observa-se na Tabela 11, entretanto, que as quantidades de N na raiz de milho, provenientes das plantas de inverno, são reduzidas (1,4 e 2,1 kg ha^{-1} de N, respectivamente do milho e da soja) e muito inferiores aos da parte aérea. O aproveitamento (AP) do N da soja pela planta de milho foi de aproximadamente 13%, correspondendo a quantidade de 19,6 kg ha^{-1} de N. Este valor é inferior aos 30 e 65 kg ha^{-1} de N determinados pelo método do Valor de Reposição Fertilizante (VRF) por DING et al. (1998) e VARVEL & WILHELM (2003), respectivamente. Deve-se mencionar também, que BUNDY et al. (1993) não observaram consistência na quantidade de N fornecida pela soja ao milho.

Tabela 11. Produção de matéria seca (MS), concentração de N, N acumulado e teor de ^{15}N na parte aérea e raiz do milho cultivado após a aplicação (parte aérea e raiz) de soja ou milho como fonte de N.

Planta de entressafra	Matéria Seca Mg ha ⁻¹	N total		QNpppe kg ha ⁻¹	AP %
		Concentração g kg ⁻¹	Acumulado kg ha ⁻¹		
Parte Aérea					
Milho	13,12 b	10,7 a	140,1 b	9,5 b	-
Soja	18,62 a	11,3 a	211,3 a	17,4 a	-
LSD (5 %)	3,64	2,6	70,8	6,4	-
Raiz					
Milho	1,14 a	12,4 b	14,1 b	1,4 b	-
Soja	1,21 a	13,9 a	16,8 a	2,1 a	-
LSD (5%)	0,21	0,3	2,5	0,3	-
Planta (parte aérea + raiz)					
Milho	14,26 b	-	-	10,9 b	7,8 b
Soja	19,83 a	-	-	19,6 a	13,1 a
LSD (5%)	3.22	-	-	2,5	2,1

⁽¹⁾ Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem significativamente entre si pelo teste t a 5% de probabilidade.

Essas divergências observadas podem ser função das diferentes técnicas empregadas.

Os métodos mais utilizados para essa avaliação são o VRF e o do traçador ^{15}N .

Neste sentido, BULLOCK (1992) relatou que a metodologia do VRF tem provavelmente superestimado a quantidade de N fornecida pela leguminosa, uma vez que o método avalia o processo total, ou seja, o efeito de todo o N adicionado (doses de N) mais o efeito da rotação, enquanto o método do ^{15}N quantifica somente a contribuição do N incorporado no material vegetal (HARRIS & HESTERMEN, 1990). Adicionalmente, o método VRF não leva em consideração que a eficiência de utilização do N é substancialmente menor do que 100% (DUETE et al., 2008). Dessa maneira, ao se comparar o valor determinado do aproveitamento do N da leguminosa (soja) pelo milho com trabalhos que também utilizaram o método da diluição isotópica do ^{15}N , verifica-se que o valor determinado de AP (13,1%) é próximo aos obtidos por HARRIS &

HESTERMEN (1990), SCIVITTARO et al. (2003) e SILVA et al. (2006b) utilizando respectivamente a alfafa, mucuna-preta e crotalária. Chama a atenção no aproveitamento do N dessas leguminosas, os baixos valores e consistentemente próximos.

Para o milho em sucessão ao milho (monocultura de milho) o aproveitamento do N (7,8%) foi inferior ao do N da soja. SILVA et al. (2008a), também verificaram baixa absorção pelo milho do N mineralizado da palha dessa gramínea (4,1% da quantidade inicial) em experimento conduzido em condições de campo.

Conforme mencionado anteriormente, esses resultados podem ser atribuídos à relação C:N, associada a presença de compostos solúveis na palhada (lignina e polifenóis), o que pode afetar a velocidade de decomposição e mineralização dos resíduos da gramínea e da leguminosa (MARTENS, 2000b; LARA CABEZAS et al., 2004; PERIN et al., 2004).

Verifica-se na Tabela 12 que os teores de N no solo e a quantidade de N total do solo, até a profundidade de 0,40 m, foram significativamente maiores no sistema de monocultura. SIQUEIRA NETO et al. (2010) também verificaram um maior estoque de N no solo para uma sucessão gramínea/gramínea (milho/trigo) em áreas de 12 e 22 anos em SPD. Segundo os autores isso pode ter ocorrido devido a maior quantificação de C e N nos resíduos culturais de milho particulado, que passam a fazer parte do solo, sem o processo de decomposição e humificação. A adubação nitrogenada realizada anualmente na cultura do milho, desde 1990 no SPD, pode também ter contribuído para a estabilização da matéria orgânica do solo com o acúmulo tanto de C como de N no solo (DIEKOW et al., 2005).

No tocante a participação das leguminosas na sucessão de culturas, deve-se mencionar que elas apresentam grandes quantidades de compostos mais lábeis, solúveis em água (aminoácidos, ácidos orgânicos, açúcares) que são facilmente decompostos pela maioria dos microrganismos do solo com rápida taxa de crescimento (WOLF & WAGNER, 2005), liberando o N para o solo; se não existir sincronismo entre a oferta de nitrato e a demanda de N pelo milho, esse nutriente pode ter sido perdido por lixiviação, contribuindo para o resultado observado na Tabela 12.

Tabela 12. Teor e quantidade de N total no solo, quantidade de nitrogênio no solo proveniente das plantas de entressafra (QNsppe), recuperação do nitrogênio no solo proveniente da planta de entressafra (RNsppe) e balanço no sistema solo-planta.

Planta entressafra	N total no solo		QNsppe	RNsppe	Balanço	
	Teor	Quantidade			planta + solo	perdas
	g kg ⁻¹	kg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹		%	
Milho	1,3 a	7.093 a	100,7 a	72,2 a	79,8 a	20,2 a
Soja	1,1 b	6.207 b	99,3 a	66,5 b	79,5 a	20,5 a
LSD (5%)	0,1	696	20,8	8,4	6,3	4,8

⁽¹⁾ Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem significativamente entre si pelo teste t a 5% de probabilidade.

Chama a atenção, que a maior quantidade do N das plantas de entressafra permaneceu no solo após o cultivo do milho (aproximadamente 100 kg ha⁻¹ de N), correspondendo a uma recuperação de 72% e 66%, respectivamente para as sucessões M/M e S/M (Tabela 12). Outros trabalhos conduzidos em condições edafoclimáticas distintas, também verificaram que o N da matéria seca de adubos verdes teve como destino principal o solo (HARRIS & HESTERMAN, 1990; SCIVITTARO et al., 2003).

Esse N do milho e da soja remanescente no solo encontra-se predominantemente sob a forma de compostos orgânicos, estando assim, menos susceptíveis a perdas, principalmente por lixiviação, podendo ser aproveitado nos próximos cultivos. A contribuição desses resíduos para as formas orgânicas de N é fundamental para sustentabilidade da fertilidade do solo (SCIVITTARO et al., 2003).

A recuperação total (planta + solo) do ¹⁵N do milho e da soja foi de aproximadamente 80% da quantidade inicial adicionada (Tabela 12). Dessa maneira, houve perda de 20% do N do sistema solo-planta, valor este inferior aos determinados por HARRIS & HESTERMAN (1990) e SCIVITTARO et al. (2003). Essas perdas de N podem ter sido devido a desnitrificação, lixiviação e também pela volatilização de

amônia do material vegetal (HARRIS & HESTERMAN, 1990; BREMER & KESSEL, 1992; SCIVITTARO et al., 2003).

5. CONCLUSÕES

A aplicação de N aumentou as concentrações de N na planta, a densidade de massa seca de raízes e a produtividade de matéria seca e grãos de milho. Esses efeitos foram mais pronunciados quando a cultura de entressafra era a soja.

Em termos de produção de grãos, as estratégias de aplicação de N foram equivalentes.

O aproveitamento pelo milho, do N das plantas de entressafra, foi baixo, sendo que a maior parte desse nutriente permaneceu no solo.

A maior EUFN pelo milho foi observada quando a dose total de N foi aplicada em pré-semeadura.

6. REFERÊNCIAS

ADDISCOTT, T.M. **Nitrate, agriculture and the environment**. CABI Publishing, Wallingford. 2004. 279p.

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

ALVES, B.J.R.; ZOTARELLI, L.; FERNANDES, F.M.; HECKLER, J.C.; MACEDO, R.A.T.; BODDEY, R.M.; JANTALIA, C.P.; URQUIAGA, S. Fixação simbiótica de nitrogênio e fertilizantes nitrogenados no balanço de nitrogênio em soja, milho e algodão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, p.449-456, 2006.

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

ANDRIOLI, I.; BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; ANDRIOLI, F.F.; COUTINHO, E.L.M. Produção de milho em plantio direto com adubação nitrogenada e cobertura do solo na pré-safra. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1691-1698, 2008.

BARBIERI, P.A.; ECHEVERRIA, H.E.; ROZAS, H.R.S.; ANDRADE, F. H. Nitrogen use efficiency in maize as affected by nitrogen availability and row spacing. **Agronomy Journal**, v.100, p.1094-1100, 2008.

BARBOSA, J.C.; MALDONADO JÚNIOR, W. **AgroEstat - Sistema para Análises Estatísticas de Ensaios Agronômicos**, Versão 1.0. 2011.

BARRIE, A.; PROSSER, S.J. Automated analysis of light-element stable isotopes by isotope ratio mass spectrometry. p.1-46. In: Boutton, T.W.; Yamasaki, S., eds. **Mass spectrometry of soils**. Marcel Dekker, New York, NY, USA. 1996. p.1-46.

BASSO, C.J.; CERETTA, C.A. Manejo do nitrogênio em sucessão a plantas de cobertura de solo, sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.905-915, 2000.

BASSOI, L.H.; FANTE JÚNIOR, L.; JORGE, L.A.C.; CRESTANA, S.; REICHARDT, K. Distribuição do sistema radicular do milho em Terra Roxa Estruturada Latossólica: II. Comparação entre cultura irrigada e fertirrigada. **Scientia Agricola**, v.51, p.541-548, 1994.

BERTOLINI, E.V.; GAMERO, C.A.; SALATA, A.C.; PIFFER, C.R. Antecipação da adubação de semeadura do milho em dois sistemas de manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.2355-2366, 2008.

BLEVINS, R.L.; HERBEK, R.L.; FRYE, W.W. Legume cover crops a nitrogen source for no till corn and grain sorghum. **Agronomy Journal**, v.82, p.769-772, 1990.

BOLAN, N.S.; ADRIANO, D.C; KUNHIKRISHNAN, A.; JAMES, T.; MCDOWELL, R.; SENESI, N. Dissolved organic matter: biogeochemistry, dynamics, and environmental significance in soils. **Advances in Agronomy**, v.110, p.1-75, 2011.

BORDIN, I.; NEVES, C.S.V.J.; MEDINA, C.C.; SANTOS, J.C.F.; TORRES, H.; URQUIAGA, S. Matéria seca, carbono e nitrogênio de raízes de soja e milho em plantio direto e convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, p.1785-1792, 2008.

BOWEN, W.T.; JONES, R.J.; CARSKY, R.J.; QUINTANA, J.O. Evaluation of the nitrogen submodel of CERES-maize following legume Green manure incorporation. **Agronomy Journal**, v.85, p.153-158, 1993.

BREMER, E.; KESSEL, C. van. Plant available nitrogen from lentil and wheat residues during a subsequent growing season. **Soil Science society of America Journal**, v.56, p.1155-1160, 1992.

BULLOCK, D.G. Crop rotation. **Critical Reviews in Plant Sciences**, v.11, p.309-326, 1992.

BUNDY, L.G.; ANDRASKI, T.W.; WOLKOWSKI, R.P. Nitrogen credits in soybean-corn crop sequences on three soils. **Agronomy Journal**, v.85, p.1061-1067, 1993.

CAIRES, E..F.; GARBUIO, F.J.; CHURKA, S.; BARTH, G.; CORRÊA, J.C.L. Effects of soil acidity amelioration by surface liming on no-till corn, soybean, and wheat root growth and yield. **European Journal of Agronomy**, v.28, p.57-64, 2008.

CAMARGO, P.B. Dinâmica do nitrogênio dos fertilizantes: uréia (^{15}N) e aquamônia (^{15}N) incorporados ao solo na cultura da cana-de-açúcar. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 1989. 104p. (Dissertação de Mestrado).

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. (Eds.) **Fertilidade do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.375-470.

CANTARELLA, H.; DUARTE, A.P.; ANDRADE, C.A. Manejo de nitrogênio e de matéria orgânica em milho no sistema plantio direto. In: FANCELLI A.L.; DOURADO NETO, D. (eds.) Milho: **Tecnologia & Produção**. Piracicaba, USP/ESALQ/DPV, 2005. p.59-82.

CERETTA, C.A.; BASSO, C.J.; FLECHA, A.M.T.; PAVINATO, P.S.; VIEIRA, F.C.B.; MAI, M.E.M. Manejo da adubação nitrogenada na sucessão aveia-preta/milho, no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.41, p.163-171, 2002.

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

COSTA, C.; DWYER, L.M.; ZHOU, X.; DUTILLUL, P.; HAMEL, C.; REID, L.M.; SMITH, D.L. Root morphology of contrasting maize genotypes. **Agronomy Journal**, v.94, p.96-101, 2002.

CAMERON, K.C.; HAYNES, R.J. Retention and movement of nitrogen in soils. In: HAYNES, R.J., ed. **Mineral nitrogen in the plant-soil system**. Academic Press, Orlando, FL, USA, 1986. p.166-241.

DERPESCH, R.; BENITES, J.R. Situation of conservation agriculture in world. In: WORLD CONGRESS ON CONSERVATION AGRICULTURE, 2., 2003, Foz do Iguaçu. Anais Ponta Grossa: FEBRAPDP, 2003. p.67-70.

DIEKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D.P.; KÖGEL-KNABNER, I. Soil C and N stocks as affected by cropping systems and nitrogen fertilization in a southern Brazil Acrisol managed under no-tillage for 17 years. **Soil & Tillage Research**, v.81, p.87-95, 2005.

DING, W.; HUME, D.J.; VYN, T.J.; BEAUCHAMP, E.G. Nitrogen credit soybean to a following corn crop in central Ontario. **Canadian Journal Plant Science**, v.78, p.29-34, 1998.

DUETE, R.R.C.; MURAOKA, T.; SILVA, E.C.; TRIVELIN, P.C.O.; AMBROSANO, E.J. Manejo da adubação nitrogenada e utilização do nitrogênio (^{15}N) pelo milho em latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.161-171, 2008.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2006, 306p.

FAGERIA, N.K.; MOREIRA, A. The role of mineral nutrition on root growth of crop plants. **Advances in Agronomy**, v.110, p.251-331, 2011.

FANTE JÚNIOR, L.; REICHARDT, K.; JORGE, L.A.C.; CRESTANA, S. Distribuição do sistema radicular do milho em Terra Roxa Estruturada Latossólica: I. Comparação de metodologias. **Scientia Agricola**, v.51, p.513-518, 1994.

FORNASIERI FILHO, D. **Manual da cultura do milho**. Funep, Jaboticabal, SP, Brasil, 2007. 574p.

GAVA, G.J.C.; TRIVELIN, P.C.O.; OLIVEIRA, M.W.; HEINRICHS, R.; SILVA, M.A. Balanço do nitrogênio da uréia (^{15}N) no sistema solo-planta na implantação da semeadura direta na cultura do milho. **Bragantia**, v.65, p.477-486, 2006.

HARPER, L.H.; SHARPE, R.R. Nitrogen dynamics in irrigated corn: soil-plant nitrogen and atmospheric ammonia transport. **Agronomy Journal**, v.87, p.669-675, 1995.

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

HIREL, B.; GOUIS, J.L.; NEY, B.; GALLAIS, A. The challenge of improving nitrogen use efficiency in crop plants: towards a more central role for genetic variability and quantitative genetics within integrated approaches. **Journal of Experimental Botany**, v.58, p.2369-2387, 2007.

HOAD, S.P.; RUSSEL, G.; LUCAS, M.E.; BINGHAM, I.J. The management of wheat, barley, and oat root systems. **Advances in Agronomy**, v.74, p.193-246, 2001.

JAVIER GHIBERTO, P.; LIBARDI, P.L.; BRITO, A.S.; TRIVELIN, P.C.O. Nitrogen fertilizer leaching in a Oxisol cultivated with sugarcane. **Scientia Agricola**, v.68, p.86-93, 2011.

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

KONDO, M.; PABLICO, P.P.; ARAGONES, D.V.; AGBISIT, R.; MORITA, S.; COURTOIS, B. Genotypic and environmental variations in root morphology in rice genotypes under upland field conditions. **Plant and Soil**, v.255, p.189-200, 2003.

LANGE, A.; LARA CABEZAS, W.A.R.; TRIVELIN, P.C.O. Recuperação do nitrogênio das fontes sulfato e nitrato de amônio pelo milho em sistema semeadura direta. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, p.123-130, 2008.

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

LARA CABEZAS, W.A.R.; ARRUDA, M.R.; CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P.C.O.; BENDASSOLLI, J.A. Imobilização de nitrogênio da uréia e do sulfato de amônio

aplicado em pré-semeadura ou cobertura na cultura de milho no sistema plantio direto.

Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.29, p.215-226, 2005.

LARA CABEZAS, W.A.R.; COUTO, P.A. Imobilização de nitrogênio da uréia e do sulfato de amônio aplicado em pré-semeadura ou cobertura de milho, no sistema plantio direto.

Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.31, p.739-752, 2007.

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

LEITE, L.F.C.; CARDOSO, M.J.; COSTA, D.B.; FREITAS, R.C.A.; RIBEIRO, V.Q.; GALVÃO, S.R.S. Estoques de C e de N e produtividade do milho sob sistemas de preparo e adubação nitrogenada em um Latossolo Vermelho-Amarelo do cerrado piauiense. **Ciência Rural**, v.39, p.2460-2466, 2009.

LEMAIRE, G.; OOSTEROM, E.; SHEEHY, J.; JEUFFROY, M.H.; MASSIGNAM, A.; ROSSATO, L. Is crop N demand more closely related to dry matter accumulation or leaf area expansion during vegetative growth?. **Field Crops Research**, v.100, p.91-106, 2007.

MAI, M.E.M.; CERETTA, C.A.; BASSO, C.J.; SILVEIRA, M.J.; PAVINATO, A.; PAVINATO, P.S. Manejo da adubação nitrogenada na sucessão aveia-preta/milho no sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, p.125-131, 2003.

MARSCHNER, H. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. 2ed. Academic Press, San Diego, CA, USA, 1995. 889p.

MARTENS, D.A. Management and crop residue influence soil aggregate stability. **Journal Environmental Quality**, v.29, p.723-727, 2000a.

MARTENS, D.A. Plant residue biochemistry regulates soil carbon cycling and carbon sequestration. **Soil Biology & Biochemistry**, v.32, p.361-369, 2000b.

MELO, F.B.; CORÁ, J.E.; CARDOSO, M.J. Fertilização nitrogenada, densidade de plantas e rendimento de milho cultivado no sistema plantio direto. **Revista Ciência Agronômica**, v.42, p.27-31, 2011.

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

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

OLIVEIRA, J.R.A.; VILELA, L.; AYARZA, M.A. Adsorção de nitrato em solos de cerrado do Distrito Federal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, p.1199-1205, 2000.

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 & Biochemistry**, v.23, p.83-88, 1991.

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

PERIN, A.; SANTOS, R.H.S.; URQUIAGA, S.C.; 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**, v.39, p.35-40, 2004.

PÖTTKER, D.; WIETHÖLTER, S. Épocas e métodos de aplicação de nitrogênio em milho cultivado no sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v.34, p.1015-1020, 2004.

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

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

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

SÁ, J.C.M.; CERRI, C.C.; LAL, R.; DICK, V.A.; VENZKE FILHO, S.P.; PICCOLO, M.C.; FEIGL, B.E. Organic matter dynamics and sequestration rates for tillage cronosequence in Brazilian Oxisol. **Soil Science Society of America Journal**, v.64, p.1486-1499, 2001.

SANTOS, M.M.; GALVÃO, J.C.C; SILVA, R.I.; MIRANDA, G.V.; FINGER, F.L. Épocas de aplicação de nitrogênio em cobertura na cultura do milho em plantio direto, e alocação do nitrogênio (^{15}N) na planta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.1185-1194, 2010.

SAINJU, U.M.; SINGH, B.P.; WHITEHEAD, W.F. Comparison of the effects of cover crops and nitrogen fertilization on tomato yield, root growth, and soil properties. **Science Horticultural**, v.91, p.201-214, 2001.

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

SCIVITTARO, W.B.; MURAOKA, T.; BOARETTO, A.E.; TRIVELIN, P.C.O. Utilização de nitrogênio de adubos verde e mineral pelo milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 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**, v.38, p.1427-1433, 2003.

SILVA, E.C.; BUZETTI, S.; GUIMARÃES, G.L.; LAZARINI, E.; SÁ, M.E. Doses e épocas de aplicação de nitrogênio na cultura do milho em plantio direto sobre Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.353-362, 2005a.

SILVA, E.C.; FERREIRA, S.M.; SILVA, G.P.; ASSIS, R.L.; GUIMARÃES, G.L. Épocas e formas de aplicação de nitrogênio no milho sob plantio direto em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.725-733, 2005 b.

SILVA, E.C.; MURAOKA, T.; BUZETTII, S.; ESPINAL, F.S.C.; TRIVELIN, P.C.O. Utilização do nitrogênio da palha de milho e de adubos verdes pela cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.2853-2861, 2008 a.

SILVA, E.C.; MURAOKA, T.; BUZETTII, S.; TRIVELIN, P.C.O. Manejo de nitrogênio no milho sob plantio direto com diferentes plantas de cobertura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.41, p.477-486, 2006a.

SILVA, E.C.; MURAOKA, T.; BUZETTII, S.; VELOSO, M.E.C.; TRIVELIN, P.C.O. Aproveitamento do nitrogênio (^{15}N) da crotalária e do milheto pelo milho sob plantio direto em Latossolo Vermelho de Cerrado. **Ciência Rural**, v.36, p.739-746, 2006 b.

SILVA, A.A.; SILVA, P.R.F.; SANGOI, L.; PIANA, A.T.; STRIEDER, M.L.; JANDREY, D.B.; ENDRIGO, P.C. Produtividade do milho irrigado em sucessão a espécies invernais para produção de palha e grãos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.43, p.987-993, 2008 b.

SIQUEIRA NETO, M.; PICCOLO, M.C.; VENZKE FILHO, S.P.; FEIGL, B.J.; CERRI, C.C. Mineralização e desnitrificação do nitrogênio no solo sob sistema plantio direto. **Bragantia**, v.69, p.923-936, 2010.

STANGER, T.F.; LAUER, J.G. Corn grain yield response to crop rotation and nitrogen over 35 years. **Agronomy Journal**, v.100, p.643-650, 2008.

STRIEDER, M.L.; SILVA, P.R.F.; ANGHINONI, I.; MEURER, E.J.; RAMBO, L.; ENDRIGO, P.C. Época de aplicação da primeira dose de nitrogênio em cobertura em milho e espécies antecessoras de cobertura de inverno. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, p. 879-890, 2006.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal**. 4. Ed. Artmed, Porto Alegre, RS, Brasil, 2009.

UNGER, P.W.; McCALLA, T.M. Conservation tillage systems. **Advances in Agronomy**, v.33, p.1-58, 1980.

URQUIAGA, S.; SISTI, C.P.J.; ZOTARELLI, L.; ALVES, B.J.R. Manejo de sistemas agrícolas para seqüestro de carbono no solo. In: Aquino, A.M. de; Assis, R.L. Ed. **Conhecimentos e técnicas avançadas para o estudo dos processos da biota no**

sistema solo-planta. Embrapa Informação Tecnológica, Brasília, DF, Brasil, 2005. p.257-273.

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.

VARVEL, G.E.; WILHELM, W.W. Soybean nitrogen contribution to corn and sorghum in western corn belt rotations. **Agronomy Journal**, v.95, p.1220-1225, 2003.

VENZKE FILHO, S.P.; FEIGL, B.J.; PICCOLO, M.C.; FANTE JÚNIOR, L.; SIQUEIRA NETO, M.; CERRI, C.C. Root Systems and soil microbial biomass under no-tillage system. **Scientia Agricola**, v.61, p.529-537, 2004.

WOLF, D.C.; WAGNER, G.H. Carbon transformations and soil organic matter formation. In: SYLVIA, D.M.; HARTEL, P.G.; FUHRMANN, J.J.; ZUBERER, D.A., eds. **Principles and applications of soil microbiology**. Pearson Education, New Jersey, USA, 2005. p.285-332.

WOLSHICK, D.; CARLESSO, R.; PETRY, M.T.; JADOSKI, S.O. Adubação nitrogenada na cultura do milho no sistema plantio direto em ano com precipitação pluvial normal e com “El Niño”. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p. 461-468, 2003.

ZHANG, H.; CHEN, T.; WANG, Z.; YANG, J.; ZHANG, J. Involvement of cytokinins in the grain filling of rice under alternate wetting and drying irrigation. **Journal of Experimental Botany**, v.61, p.3719-3733, 2010.

ZOTARELLI, L.; AVILA, L.; SCHOLBERG, J.M.S.; ALVES, B.J.R. Benefits of vetch and rye cover crops to sweet corn under no-tillage. **Agronomy Journal**, v.101, p.252-260, 2009.